

Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа

На правах рукописи

УДК 620.179

Бондаренко Артем Юрьевич

**МАГНИТНЫЙ КОЭРЦИТИМЕТРИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ
ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ**

Специальность 05.11.13 – Приборы и методы контроля и
определение состава веществ

диссертация на соискание научной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
академик НАН Украины,
профессор, д.т.н.
Лобанов Леонид
Михайлович

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Введение	4
1. Анализ методов неразрушающего контроля качества и диагностики сварных конструкций	12
1.1. Обзор современных методов неразрушающего контроля качества и диагностики сварных конструкций	12
1.2. Анализ магнитных методов контроля	31
Цель и задачи исследования	46
2. Обоснование принципов и разработка методики исследования технического состояния сварных соединений магнитным коэрцитиметрическим методом	48
2.1. Обоснование выбора магнитного коэрцитиметрического метода и аппаратуры для определения состояния сварных соединений	49
2.2. Разработка физической и математической моделей для выявления локальных особенностей распределения коэрцитивной силы в сварном соединении	58
Выводы по разделу 2	76
3. Исследование влияния деформаций на величины коэрцитивных сил основного металла и сварных соединений	78
3.1. Исследование влияния остаточных пластических деформаций на величину коэрцитивной силы основного металла и сварных соединений при статическом нагружении образцов	78
3.2. Исследование влияния циклических нагрузок на величину и характер изменения коэрцитивной силы в основном металле и сварных соединениях	97
3.3. Исследование влияния структурных повреждений металла сварных соединений на величину коэрцитивной силы	110

3.4. Исследование влияния двухосного напряженного состояния образцов конструкции на величину коэрцитивных сил в сварном соединении	127
Выводы по разделу 3	139
4. Оценка остаточного ресурса сварных соединений трубопроводов магнитным коэрцитиметрическим методом	141
4.1 Разработка методики оценки и прогнозирования остаточного ресурса сварных соединений трубопроводов с применением магнитного коэрцитиметрического метода	142
4.2. Сравнительный анализ и исследование изменения технического состояния сварных соединений по величине коэрцитивной силы при эксплуатации газопровода	154
Выводы по разделу 4	166
Общие выводы	167
Список использованных источников	169
Приложения	186

ВВЕДЕНИЕ

В условиях увеличения срока эксплуатации сварных конструкций проблема надежности связана с долгосрочной прочностью металла и сварных соединений. Расчетные оценки надежности и прочности конструкций, которые продолжительно работают под действием значительных нагрузений, осуществляются в большинстве случаев без учета влияния фактора времени на изменения механических свойств металла сварных соединений.

Это объясняется двумя основными причинами. Во-первых, в данное время не утвердилась единая концепция о физической природе зависимости механических свойств материалов от сроков их эксплуатации. Во-вторых, фактические сведения о зависимости механических свойств материалов от времени нагружения требуют испытаний и экспериментальных исследований с большим временем их проведения. Поэтому единственным достоверным источником получения фактических сведений о влиянии времени на трудоспособность материалов являются результаты обследований реальных конструкций. В связи с вышеизложенным особое значение приобретают исследования и разработка метода для оценки технического состояния сварных конструкций, который позволил бы получить необходимый комплекс параметров сварных соединений.

Задача обеспечения промышленной безопасности в условиях физического и морального износа конструкций ответственного назначения, срок действия которых продлевается, обуславливает повышение роли мониторинга с применением методов и средств диагностики, так как аварии могут приводить к человеческим жертвам, загрязнению окружающей среды и большим экономическим потерям. В связи с этим очень важно владеть научно обоснованными методами определения технического состояния сварных конструкций за пределами нормативного срока.

Анализ современных методов и технологий неразрушающих испытаний сварных соединений показывает, что, несмотря на широкое применение этих

методов, вопрос оценки технического состояния и поврежденности металла сварных соединений в процессе эксплуатации с целью определения индивидуального остаточного ресурса в ряде случаев остается нерешенным. Снижение ресурса сварных конструкций связано главным образом с накоплением повреждений в сварных соединениях. Для объективной оценки остаточного ресурса сварных конструкций необходимо детальное изучение состояния различных зон сварных соединений применительно к реальным условиям эксплуатации, особенно в местах концентрации напряжений и пластических деформаций, а также действия циклических нагрузжений.

Учитывая то, что стоимость ликвидации отказа может достигать значительной доли стоимости сварной конструкции, задача разработки и внедрения методов и технологий контроля определения остаточного ресурса конструкций, является актуальной. Решение этой задачи будет содействовать предупреждению отказов и уменьшению удельных затрат на их эксплуатацию и ремонт, что является чрезвычайно важным.

Состояние отечественной экономики заставляет производителей продлевать сроки эксплуатации сварных конструкций свыше тех, что обусловлены эксплуатационной и нормативной документацией. При этом не учитывается такое явление, как поврежденность структуры металла сварных соединений, что также является предметом исследования. Для обеспечения эксплуатационной надежности сварных конструкций важно иметь возможность оценить их фактическое техническое состояние в разные периоды эксплуатации. Поэтому важно располагать информацией о наличии не только макродефектов, но и микродефектов – субструктурных изменений в сварных соединениях.

Выявлением макродефектов в сварных соединениях занимается дефектоскопия и этот вопрос считается достаточно разработанным на сегодняшний день, в то время как проблема контроля субструктурного состояния сварных соединений практически не решена.

Необходимо отметить, что в данное время широкое применение в промышленности при производстве металлопродукции для измерения магнитных

характеристик и определения физико-механических свойств металлопроката находят магнитные методы.

В данной работе предлагается расширить область применения магнитных методов и оценивать величину пластической деформации и усталости металла сварных соединений конструкций при эксплуатации с целью прогнозирования их остаточного ресурса путем определения величины коэрцитивной силы в местах наибольших напряжений.

Все вышеизложенное определяет *актуальность проблемы*, которая решается в диссертации – разработка магнитного коэрцитиметрического метода контроля технического состояния сварных соединений на различных стадиях эксплуатации конструкций для прогнозирования их индивидуального остаточного ресурса.

Связь работы с научными программами, планами, темами свидетельствует про ее актуальность. Диссертационная работа выполнялась в соответствии с:

- целевой научной программой НАН Украины в 2002-2006 г. “Фундаментальные проблемы создания материалов с заданно заданными свойствами, методами их соединения и обработки” по теме «Разработка эффективных методов прогнозирования и продления ресурса сварных конструкций на основе создания принципиально новых подходов к диагностике, повышению прочности и регулирование напряженно-деформированного состояния соединений». Номер темы согласно плану ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины 8/33. Выполняется согласно постановлению бюро ВФТПМ НАНУ прот. № 3 от 05.02.02.
- ведомственным заказом НАН Украины в 2000-2002 г. «Разработка и исследование сварных оболочковых и панельных конструкций высокой точности и крупногабаритных конструкций превращаемого объема, создание эффективных методов их диагностики». Номер темы согласно плану ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины 8,31/13. Выполняется согласно постановлению бюро ВФТПМ НАНУ прот. № 7 от 20.04.2000.

- поисковой научной темой НАН Украины в 2003 г. “Исследование изменения магнитных характеристик металла сварных соединений трубных сталей при действии эксплуатационных нагрузок для дальнейшего прогнозирования остаточного ресурса”. Номер темы согласно плану ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины 8/15-П. Выполняется согласно постановлению ИЭС прот. № 20 от 31.01.03.
- целевой научно-технической программой «Проблема ресурса и безопасности эксплуатации конструкций, сооружений и машин (“Ресурс”)» по теме «Разработка и исследование новых средств оценки и удлинение ресурса сварных соединений конструкций в условиях их эксплуатации на основе развития спекл-интерферометрического и магнитного коэрцитиметрического методов определения технического состояния и на основе электродинамической обработки конструкционных материалов» Номер темы согласно плану ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины 8/39. Выполняется согласно постановлению Президиума НАНУ прот. № 214 от 04.04.2005.

Все вышеуказанные работы выполнялись с непосредственным участием соискателя, в т.ч. как ответственного исполнителя.

Цель работы: состоит в теоретическом обосновании и построении методологии магнитного коэрцитиметрического метода контроля сварных соединений на разных стадиях эксплуатации конструкций для прогнозирования индивидуального остаточного ресурса.

Для достижения поставленной цели необходимо решить такие **задачи:**

- 1) в соответствии с результатами анализа существующих методов неразрушающего контроля и диагностики сварных конструкций обосновать выбор магнитного коэрцитиметрического метода для оценки технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса сварных соединений;
- 2) на основе анализа физических свойств сварного соединения предложить и исследовать физическую модель сварного соединения для изучения влияния геометрических и магнитных параметров сварного шва, зоны термического

влияния (ЗТВ) и основного металла на величину коэрцитивной силы сварного соединения;

- 3) на основе результатов анализа закономерностей процесса магнитного контроля сварного соединения построить математическую модель зависимости коэрцитивной силы сварного соединения от геометрических и магнитных параметров сварного шва, зоны термического влияния и основного металла для определения локальных особенностей распределения коэрцитивной силы в сварном соединении;
- 4) на основе анализа физических закономерностей исследовать влияние циклического и статического нагружения на информативный параметр магнитного метода – коэрцитивную силу сварного соединения; определить пороговые значения коэрцитивной силы, соответствующие состоянию предразрушения;
- 5) исследовать влияние структурных изменений металла сварных соединений на его магнитные свойства и определить причины изменения величины коэрцитивной силы;
- 6) разработать методику оценки технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса сварных соединений трубопроводов с использованием коэрцитиметрического метода контроля;
- 7) исследовать влияние реальных условий эксплуатации газопровода на изменение величины коэрцитивной силы в сварных соединениях.

Научная новизна полученных результатов состоит в том, что:

- установлена взаимосвязь между геометрическими и магнитными параметрами сварного шва, ЗТВ и основного металла, в результате чего разработана математическая модель коэрцитивной силы сварного соединения, которая дает возможность локальной оценки поврежденности сварных соединений;
- исследовано влияние циклического и статического нагружения на величину коэрцитивной силы сварного соединения и впервые обосновано использование пороговых значений величины коэрцитивной силы в локальных зонах сварного

соединения, а также анизотропии для оценки технического состояния конструкций;

- впервые использованы статистические методы анализа величин изменения коэрцитивных сил H_c^{3TB} и H_c^{III} на разных этапах эксплуатации сварных конструкций, полученных в процессе мониторинга, что позволяет оценить их техническое состояние;
- впервые предложен метод оценки технического состояния сварных соединений трубопроводов с применением магнитного коэрцитиметрического метода, который состоит в локальной оценке пороговых значений величины коэрцитивной силы сварных соединений на образцах-свидетелях и анализе кинетики изменения полученных при мониторинге ее текущих значений для прогнозирования остаточного ресурса.

Практическое значение полученных результатов состоит в разработке:

- методики прогнозирования остаточного ресурса сварных соединений трубопроводов с применением магнитного коэрцитиметрического метода;
- физической модели сварного соединения для оценки влияния геометрических и магнитных параметров сварного шва, зоны термического влияния и основного металла на величину коэрцитивной силы сварного соединения;
- функциональных схем испытательных стендов, позволяющих установить влияние статического и циклического нагружений, а также остаточной пластической деформации на величину коэрцитивной силы в сварном соединении.

Личный вклад соискателя. Основные положения и результаты диссертационной работы получены автором самостоятельно:

- предложена и исследована физическая модель сварного соединения для определения влияния геометрических и магнитных параметров сварного шва, зоны термического влияния и основного металла на величину коэрцитивной силы сварного соединения;

- построена математическая модель зависимости коэрцитивной силы сварного соединения от геометрических и магнитных параметров сварного шва, зоны термического влияния и основного металла для определения локальных особенностей распределения коэрцитивной силы в сварном соединении;
- исследовано влияние циклической и статической нагрузки на информативный параметр магнитного метода — коэрцитивную силу сварного соединения; определены пороговые значения коэрцитивной силы;
- исследовано влияние субструктурных повреждений металла сварных соединений на коэрцитивную силу и определены причины изменения магнитных свойств металла;
- разработана методика оценки технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса сварных соединений трубопроводов с использованием коэрцитиметрического метода контроля;
- исследовано влияние реальных условий эксплуатации газопровода на изменение величины коэрцитивной силы сварных соединений.

Апробация результатов диссертации. Основные результаты диссертационной работы были доложены на Международной конференции «Зварні конструкції» (Киев, 2000 г.); на 3-й Международной конференции «Диагностика трубопроводов» (Москва, 2000 г.); на 54-й, 55-й, 57-й и 59-й ежегодных конференциях Международного института сварки - 5-ая комиссия "Контроль и обеспечение качества" (Словения, 2001 г., Дания, 2002 г., Япония, 2004 г., Канада, 2006 г.); на научно-техническом семинаре «Підвищення експлуатаційної надійності магістральних трубопроводів газотранспортної системи ДК «Укртрансгаз» (Киев, 2002 г.); на 10-й Юбилейной международной конференции «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики» (Ялта, 2002 г.); на 3-й научно-технической конференции «Современные приборы, материалы, технологии для неразрушающего контроля и технической диагностике промышленного оборудования» (Ивано-Франковский национальный технический университет

нефти и газа, 2002 г.), на 4-й и 5-й Национальных научно-технических конференциях «Неруйнівний контроль і технічна діагностика» (Киев, 2003 г., Киев, 2006 г.), на 11-й и 12-й Международных конференциях «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики» (Ялта 2003 г., Ялта 2004 г.), а также докладывались и обсуждались на научных семинарах ИЭС им. Е. О. Патона и кафедры "Методы и приборы контроля качества и сертификации продукции" ИФНТУНГ.

Публикации. Материалы диссертационной работы полностью освещены в 23 печатных работах автора, среди которых 10 статей, в т.ч. две единоличные, в специальных изданиях "Техніческа діагностика і неразрушаючий контроль" и «Методи та прилади контролю якості»; 13 докладов и тезисов докладов на международных и национальных научно-технических конференциях и семинарах.

РАЗДЕЛ 1

АНАЛИЗ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА И ДИАГНОСТИКИ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Значение сварных конструкций, широко используемых в строительстве, энергетике, транспорте, судостроении и других отраслях промышленности, неуклонно растет. Они работают на Земле, под водой, в космосе, при нормальных, высоких и криогенных температурах, в агрессивных средах и в условиях интенсивного радиационного облучения [1]. Вместе с тем большое количество эксплуатируемых во многих странах ответственных сварных конструкций приблизилось к своему критическому возрасту. Это обусловлено значительными сроками службы конструкций, снижением их несущей способности вследствие деформационного старения и накопления усталостных повреждений, как в основном металле, так и в сварных швах.

Поэтому весьма актуальной является проблема разработки научных подходов к оценке и продлению ресурса сварных конструкций, а также применения современных средств и методов технической диагностики для оценки предельных состояний сварных соединений при различных условиях нагружения.

1.1. Обзор современных методов неразрушающего контроля качества и диагностики сварных конструкций

В процессе эксплуатации сварные конструкции подвергаются воздействию как постоянных, так и повторно-переменных нагружений, приводящих к накоплению необратимых изменений в металле сварных соединений.

На практике оценка состояния сварных соединений, как правило, строится преимущественно на информации о макродефектности металла. При этом применяются следующие методы дефектоскопии: ультразвуковая, рентгеновская, капиллярная, магнитопорошковая и пр.

Наиболее широко распространены методы радиационной дефектоскопии. В зависимости от того, какой детектор применяется при просвечивании сварного шва, различают следующие виды радиационной дефектоскопии: радиографию, радиоскопию и радиометрию [2].

Детекторами радиографического контроля могут быть фоточувствительная пленка [3, 4], фотобумага или полупроводниковая пластина. В отличие от радиографии в радиационной интроскопии (радиоскопии) видимое динамическое изображение внутренней структуры изделия, просвечиваемого ионизирующим излучением, получают с помощью флуороскопических экранов, сцинтилляционных кристаллов, электронно-оптических преобразователей или рентгеновидиконов.

Применение радиоскопии в сварочном производстве непрерывно возрастает [5]. Для массовой продукции этот метод более экономичен, поскольку не требует дорогих пленок, химических и других расходных материалов. Однако по своей чувствительности, равной 3...4%, метод несколько уступает радиографии [6].

В основу радиационной дефектоскопии положены законы ослабления ионизирующих излучений, проходящих через конструкционный материал [7, 8]. При прохождении ионизирующего излучения через просвечиваемый объект его интенсивность, то есть количество энергии, проходящей через единицу площади, меняется в зависимости от плотности материала и толщины объекта. По изменению интенсивности излучения определяют наличие в объекте несплошностей.

За последние годы наметился активный переход от разработки традиционных систем рентгенографии к разработке так называемых систем цифровой рентгенографии (СЦР) [9]. Основными причинами являются: малый динамический диапазон рентгеновской пленки, увеличение стоимости пленки, химреативов и фотопроявочной техники; длительность процесса проявления пленки; интенсивное развитие средств вычислительной техники.

В настоящее время под термином «цифровая рентгенография» понимают совокупность методов неразрушающего радиационного контроля и диагностики,

при которых радиационное изображение просвечиваемого объекта преобразуется на определенном этапе в цифровой сигнал [10-13]. В дальнейшем этот цифровой сигнал заносится в память компьютера и перераспределяется в двумерный массив измерительных данных (цифровое изображение), которое подвергается различным видам цифровой обработки (контрастирование, масштабирование, препарирование, сглаживание и т.п.) и, наконец, воспроизводится на экране графического дисплея или ТВ-монитора в виде полутонового изображения, непосредственно воспринимаемого оператором.

Существующие СЦР можно классифицировать по способам детектирования радиационного изображения и формирования полутоновых изображений на следующие основные типы [13, 14]:

- 1) системы на основе оцифровки традиционных рентгенограмм;
- 2) системы на основе запоминающих люминофоров;
- 3) системы на основе фоторезистивных экранов;
- 4) системы на основе усилителей радиационного изображения;
- 5) системы на основе двумерных матричных детекторов;
- 6) сканирующие системы на основе одномерных матричных детекторов;
- 7) сканирующие системы на основе бегущего рентгеновского луча.

Преимуществом применения систем цифровой рентгенографии по сравнению с безплочной технологией визуализации радиационных изображений в сочетании с цифровой обработкой информации является возможность существенно (в 5-100 раз) [9] снизить лучевую нагрузку на исследуемый объект по сравнению с традиционными электронно-плочными системами.

Среди различных типов систем цифровой рентгенографии наиболее интенсивными темпами развиваются сканирующие системы на основе линейки детекторов, что обусловлено целым рядом существенных преимуществ данных систем перед остальными (отсечка рассеянного излучения, малая доза облучения исследуемого объекта, большой динамический диапазон, высокая квантовая эффективность, возможность контроля крупноформатных изделий, наибольшая

восприимчивость к автоматизации).

Вместе с тем радиационным методам контроля присущи и недостатки. К ним следует отнести невозможность выявления таких дефектов как непровары и трещины, плоскость раскрытия которых не совпадает с направлением просвечивания, а также дефекты, совпадающие на снимках с изображениями посторонних деталей или расположенные на углах соединений [5, 15]. Также недостатком радиационных методов контроля является необходимость радиационной защиты персонала, сравнительно высокая себестоимость и трудоемкость контроля [16, 17].

Значительный вклад в разработку физических основ и создание приборов ультразвуковых методов контроля принадлежит ученикам основателя УЗ-дефектоскопии С. Я. Соколова – проф. Меркулову Л. Г., проф. Харитонову А. В., а также специалистам отраслевых институтов – ВИАМ, ЦНИИТМАШ, НИИ МОСТОВ, ЛИИЖТа, ИЭС им. Е. О. Патона, Физико-механического института им. Г. В. Карпенка [129, 132] и других [18]. Важную роль в создании и развитии основ теории и практики УЗ контроля сыграли такие ученые как Гурвич А. К., Ермолов И. Н., Викторов И. А., Химченко Н. В., Троицкий В. А., Назарчук З. Т., Маевский С. М., Белокур И. П., Бабак В. Т. и др.

Акустические методы контроля охватывают диапазон частот колебаний от единиц герц до десятков мегагерц и подразделяются на звуковые от единиц герц до 20 кГц и ультразвуковые – свыше 20 кГц [19].

При ультразвуковом контроле (УЗК) используют три основных метода, различающихся по признаку обнаружения дефекта: теневой метод, эхо-метод, зеркально-теневой метод [20, 21].

Контроль сварных швов, как правило, осуществляют эхо-методом с включением акустического преобразователя по совмещенной схеме [22]. Раздельную и раздельно-совмещенную схемы включения преобразователей применяют, если контроль по совмещенной схеме не обеспечивает достаточную надежность и достоверность.

Особенностью применения ультразвуковых методов контроля является

необходимость специальной подготовки контролируемой поверхности для обеспечения акустического контакта преобразователя с контролируемым изделием [23]. При контроле горизонтальных поверхностей целесообразно применение в качестве контактной среды воды, в других случаях – масла или пасты, особенно при контроле вертикальных стыков. Также при автоматизированном и механизированном контроле применяются электромагнитно-акустические (ЭМА) преобразователи с постоянным и импульсным подмагничивающими полями, работающие в широком диапазоне частот и температур и обеспечивающие возбуждение и прием всего спектра УЗ волн, используемых в неразрушающем контроле [134].

В последнее время получили распространение когерентные методы УЗ-контроля [18]. В некогерентных методах, как известно, получают изображения модуля амплитуды поля, рассеянного дефектами. В когерентных методах за счет дополнительной обработки фазовых данных (аналоговой или цифровой) удается получить более полное изображение поля, рассеянного дефектами. Использование фазовой информации дает возможность получать изображения неоднородностей с высоким разрешением и соответственно определять реальные параметры выявляемого дефекта.

В связи с развитием компьютерной техники наибольшее распространение получили цифровые когерентные методы: акустическая голография и метод синтезированной фокусирующей апертуры. Акустическая голография основана на быстро реализуемом программном обеспечении – быстром преобразовании Фурье. Это дает возможность получать результаты в режиме реального времени.[24].

Также, в последнее время уделяется большое внимание дифракционно-временному методу (time of flight diffraction – TOFT). Он основан на приеме волн, рассеянных на концах дефекта. Используют излучающий и приемный преобразователи, расположенные по разные стороны от дефекта [25]. Метод позволяет контролировать сварные швы толщиной от 6 до 300 мм, причем при контроле небольших толщин используют повышенные частоты: от 4 до 5 МГц

[28].

Недостатком метода является невозможность выявлять дефекты высотой менее 5 мм. Разрешающая способность метода ухудшается при отклонении ориентации дефекта от нормали к поверхности ввода УЗ волны более чем на 10° [24].

Одним из быстроразвивающихся направлений в УЗК является компьютеризация процесса контроля. Применение компьютеров и специального программного обеспечения позволяет визуализировать результаты неразрушающего контроля, существенно поднять достоверность результатов испытаний, обрабатывать большие массивы информации [2].

Компьютеризация УЗК позволяет исключить недостатки, присущие ручным средствам УЗ-контроля, возникающие по вине оператора в ущерб достоверности результатов контроля. Кроме того, большой объем сведений, регистрируемых при контроле с помощью компьютеризированного дефектоскопа, дает возможность использовать другие формы оценки дефектности объекта, например, статистический анализ, исследование спектральных характеристик сигналов и т. п.

Визуализация и документирование данных позволяет специалистам анализировать информацию о местоположении, размере и типе дефекта с учетом имеющегося опыта. С помощью компьютеризированных дефектоскопов реализуется метод дифрагированных волн, позволяющий точно определять размеры внутренних дефектов [5].

Перспективным направлением в решении задач распознавания дефектов по эхосигналам является применение нейронных сетей [26], а также использование новых схем прозвучивания, например, контроль головными волнами, схемой корневой тандем и контроль с помощью хордовых преобразователей [27].

Важную роль в создании и развитии основ теории и практики контроля методом акустической эмиссии (АЭ) сыграли такие ученые как Патон Б.Е., Недосека А. Я., Яременко К. К., Скальский В. В. Метод АЭ основан на регистрации и интерпретации излучения упругих волн, возникающих в процессе

перестройки внутренней структуры твердых тел. АЭ появляется при пластической деформации конструкционных материалов, при возникновении и развитии в них дефектов, например при образовании усталостных трещин. Возникающие при этом дискретные импульсы имеют широкий частотный диапазон — от десятков килогерц до сотен мегагерц в зависимости от материала.

Оценка состояния металлических конструкций включает в себя анализ источников сигналов АЭ на принадлежность к тому или иному классу (сигналы от трения в захватах, от усталостной трещины и т.д.). В настоящее время разработаны различные методики анализа и интерпретации его результата.[29].

Например, при использовании амплитудного критерия находят среднюю амплитуду не менее трех импульсов для каждого источника АЭ за выбранный интервал наблюдения и сравнивают ее с пороговым уровнем [30]. Затем источник сигналов АЭ классифицируют по одному из четырех классов активности.

Метод АЭ в отличие от других методов неразрушающего контроля позволяет классифицировать повреждения по степени их опасности. В работе [29] предлагаются следующие критерии, определяющие их потенциальную опасность для конструкции в целом.

Интегральный критерий предусматривает определение активности источников сигналов АЭ через число событий в интервале времени.

Локально-динамический критерий в качестве основных параметров использует число выбросов и энергию сигналов АЭ. При этом определяют нормированную величину, зависящую от кинетики развития дефекта, и судят об источнике сигналов АЭ, сравнивая ее с пороговым значением.

Интегрально-динамический критерий предусматривает определение коэффициента концентрации источника сигнала и его суммарной энергии. Кроме того, определяют величину, характеризующую характер энерговыделения источника сигнала АЭ во времени.

Сложность применения метода АЭ при диагностики стальных конструкций также состоит в решении задачи, позволяющей связать накопленную поврежденность материала с основными параметрами механики разрушения

(коэффициентом интенсивности напряжений, скоростью роста усталостной трещины и т.д.) и сигналами АЭ [31]. Без решения данной задачи нельзя создать эффективные методы прогнозирования предельного состояния и остаточного ресурса конструкции.

Известен метод диагностики предразрушающего состояния материалов по отклонению от устойчивых (инвариантных) соотношений статистических параметров пуассоновского потока акустической эмиссии [32]. Суть такого подхода заключается в следующем. В силу случайного характера потока микроповреждений на некоторых стадиях деформации твердых тел можно найти устойчивые (инвариантные) соотношения параметров АЭ [33]. Тогда появление отклонений регистрируемых значений соотношений от их инвариантных значений может служить критерием перехода на следующую стадию деформации.

Однако, главным недостатком современных АЭ-систем является потеря информации во время обработки сигнала центральным процессором компьютера [34]. Другим важным недостатком является невысокая частота дискретизации АЭ-сигналов (до 1 МГц), что обусловлено низким быстродействием коммутирующих устройств и приводит к уменьшению точности восстановления сигналов, а значит и точности их локализации [35].

В работе [34] предложен новый алгоритм обработки, позволяющий исключить случайные единичные выбросы в реализации сигнала АЭ. В системе осуществляется параллельный ввод информации. Такая система обладает расширенными функциональными возможностями, поскольку каждый канал работает независимо от других. Это позволяет резко повысить ее быстродействие и вычислительные возможности.

Из всех достоинств неразрушающего контроля изделий методом акустической эмиссии немаловажным является определение координат дефектов. Многочисленные исследования [36], проведенные в данной области, показали, что можно отождествить координаты источника АЭ и координаты дефекта.

Существует несколько возможностей определения координат источников АЭ [37]:

1. Локализация с помощью определения разности времен прихода (РВП) сигнала АЭ на пространственно разнесенные приемники акустической эмиссии (ПАЭ). Данный способ расчета основан на условии постоянства скорости распространения волн в материале.
2. Амплитудная локализация – метод, основанный на измерении степени затухания сигнала на разнесенные ПАЭ. Здесь используется приближение, учитывающее, что амплитуда сигнала затухает строго экспоненциально с увеличением расстояния от источника.

Наряду с несомненными достоинствами амплитудной локализации, такими как возможность определять координаты источников непрерывной АЭ, данный метод имеет недостатки, которые в ряде случаев делают недопустимым его применение. Его недостатки связаны с невозможностью изготовления совершенно одинаковых ПАЭ, каждый датчик имеет свою уникальную амплитудно-частотную характеристику. Установка всех ПАЭ на объект контроля различна, то есть различны качество поверхности и количество контактной смазки под ПАЭ. Все это сильно искажает истинную амплитуду сигнала, а следовательно, и уменьшает точность определения координат данным методом. Метод локализации по определению РВП свободен от большинства вышеназванных недостатков, однако и у него есть свои ограничения.

В отличие от метода АЭ, тепловому методу присуща простота реализации процесса контроля и отсутствие необходимости применения дорогой вычислительной техники. Тепловой метод НК основан на регистрации инфракрасного излучения, исходящего с поверхности нагретого тела, приемниками различного типа. Он применяется для обнаружения расслоений, пустот, раковин и других дефектов сплошности и предусматривает дистанционное исследование температурных полей по собственному излучению объектов в инфракрасном диапазоне. Наиболее просто тепловой метод реализуется с помощью термоиндикаторных жидкостей, наносимых на поверхность исследуемого объекта.

Для теплового метода НК характерны следующие особенности [2]: а)

высокая чувствительность к температурным сигналам (от десятых до тысячных долей градуса, в зависимости от параметров оптической системы приемника); б) хорошее разрешение по мгновенному углу зрения; в) высокое быстродействие, ограниченное при активном тепловом контроле (ТК), как правило, мощностью нагревателя, а при пассивном ТК — особенностями оптико-механического сканирования и инерционностью приемника; г) зависимость выходного сигнала от свойств контролируемой поверхности и канала передачи инфракрасного излучения.

В последнее время во многих отраслях промышленности нашли достаточно широкое применение при неразрушающем контроле различных объектов тепловизионные методы исследования [38]. С их помощью обнаруживают трещины, расслоения элементов конструкций, выявляются перегревы, вызванные дефектами контактных соединений в оборудовании электростанций и т. д. Дистанционно измерять температуру и формировать тепловое изображение исследуемого объекта позволяют промышленно выпускаемые тепловизионные или инфракрасные (ИК) камеры [39].

В качестве регистрирующего (фотоприемного) модуля в них, как правило, используются полупроводниковые одиночные, линейчатые или матричные детекторы ИК-излучения. В последнем случае фотоприемники различаются по типу и степени дискретизации матрицы.

Экспресс-метод определения характера распространения теплового потока в материалах с помощью ИК-камеры представлен в работе [40]. Исследуемому объекту короткими импульсами электромагнитного излучения при помощи вспышки сообщается некоторое количество энергии, приводящей к разогреву. Регистрируемое тепловизором изменение температурного поля образца в зависимости от времени позволяет количественно оценить распространение теплового потока в трех взаимно перпендикулярных направлениях. Данный метод используется для исследования новых материалов, применяемых в аэрокосмической технике [38].

Тепловизионный метод с достаточно высокой температурной чувствительностью и подходящим рабочим диапазоном измеряемых температур также используют для визуального исследования тепловых полей объектов в процессе их деформирования по интенсивности сопровождающего эти процессы инфракрасного излучения [41-43]. При этом тепловые поля объектов, локально разогретых в процессе пластического деформирования, отображаются в виде термограмм (тепловых карт). В отличие от контактных методов измерения температуры в точке, например, с помощью термопар, бесконтактные методы регистрируют тепловое поле сразу всей исследуемой поверхности, чем существенно повышается информативность метода [44, 45].

При наличии высокочувствительных быстродействующих инфракрасных камер матричного типа с высоким пространственным разрешением тепловизионные методы можно с успехом применять в дефектоскопии изделий и исследовании деформирования и разрушения элементов конструкций с концентраторами напряжений [38].

Однако на практике регистрация сигналов от дефекта в десятые и сотые доли градуса тепловым методом НК затруднена из-за специфических помех, которые можно разделить на две группы. Помехи первой группы обусловлены шумами приемника и вибрацией оптической головки, а также чувствительностью метода к качеству поверхности изделия.

Наиболее существенны помехи второй группы, так как они возрастают пропорционально росту температуры объекта. В эту группу входят прежде всего помехи, вызванные флуктуациями собственного излучения, а также неоднородностью изделия и неравномерной скоростью нагрева. Поэтому применение данного метода в полевых условиях затруднительно.

Широкое применение в сварочном производстве нашел капиллярный метод контроля [47]. Метод основан на проникновении индикаторных жидкостей (пенетрантов) в полости поверхностных дефектов и регистрации индикаторного рисунка (цветного, люминесцентного, контрастного) [46]. Его применяют для обнаружения слабо видимых невооруженным глазом поверхностных дефектов.

Выделяют три этапа капиллярной дефектоскопии. Первый из них заключается в обработке поверхности цвето- или светоконтрастным пенетрантом, который под действием капиллярных сил втягивается в дефект. Второй этап — проявление дефектов, т. е. извлечение из несплошностей пенетранта на поверхность. Это достигается за счет сорбционных свойств проявляющих веществ и явлений диффузии. Третий этап — индикация несплошностей по цветным пятнам пенетранта в местах его выхода на поверхность.

Особенностью капиллярного контроля является необходимость строгого соблюдения режимов технологических операций для достижения оптимальной чувствительности [48]. Отклонение в выполнении одного из режимов технологических операций может привести к изменению чувствительности всего процесса капиллярного контроля.

Наиболее перспективным из существующих средств, используемых для задач оценки эффективности операций капиллярного контроля, является автоматическая регистрация, анализ и оценка его результатов с применением системы технического зрения (СТЗ) [49, 50].

Основная цель применения СТЗ заключается в возможности обеспечивать надежный и достоверный контроль на основе объективной количественной оценки его результатов. При капиллярном контроле СТЗ используются для автоматической разбраковки контролируемых объектов [51, 52], оценки качества наборов и отдельных свойств дефектоскопических материалов [53], определения эффективности основных технологических операций [54].

Основными компонентами системы являются персональный компьютер (ПК), источник освещения, приемник изображения, набор оптических фильтров, АЦП для оцифровки аналогового сигнала от приемника изображения и передачи его в блок буферной памяти ПК, программное обеспечение для обработки изображений контролируемой поверхности [55].

Результаты оценки эффективности таких основных операций капиллярного контроля как предварительная очистка [56], пропитка контролируемой поверхности пенетрантом [57], проявление дефектов [58], показали высокую

производительность, надежность и достоверность получаемых результатов. Оценка результатов контроля на основе объективных количественных критериев, характеризующих выявляемость дефектов, позволяет достаточно эффективно определять оптимальные режимы этих операций с учетом применяемой технологии и условий проведения контроля [59].

Так, например, в работе [60] описан способ повышения порога чувствительности капиллярного контроля за счет предварительного нагрева объектов контроля непосредственно перед применением проникающей жидкости. Использование нагрева контролируемых объектов до температур, превышающих начальные на 20-40°C, на стадии проявления дефектов позволяет выявлять дефекты со значительно меньшей шириной раскрытия. Оптимальные результаты с точки зрения минимизации продолжительности процесса контроля и значений ширины раскрытия выявляемых дефектов достигаются при совместном применении нагрева объекта контроля как непосредственно перед применением пенетранта, так и на стадии проявления [62].

Один из наиболее распространенных неразрушающих физических методов дефектоскопии стальных деталей является магнитопорошковый метод. Благодаря объективности, наглядности, простоте и универсальности применяемых методик и аппаратуры, высокой чувствительности и надежности этот метод нашел широкое применение при изготовлении, ремонте и эксплуатации машин ответственного назначения.

Магнитопорошковым методом хорошо обнаруживаются трещины, волосовины, закаты, надрывы, расслоения и другие дефекты, выходящие на поверхность или расположенные близко к поверхности [62]. Выявляемость дефектов зависит от их расположения, магнитных характеристик металла, степени намагничивания, чистоты поверхности, а также от качества индикатора, размеров зерен порошка, его характеристик, в частности остаточного магнитного момента. [63].

При проведении магнитопорошкового контроля ферромагнитные частицы, взвешенные в жидкости или в воздухе, попадая в магнитное поле,

намагничиваются и притягиваются друг к другу, образуя цепочки, ориентированные по магнитным силовым линиям поля. В работе [64] показано, что магнитная коагуляция (соединение частиц в цепочки) происходит под действием внешнего намагничивающего поля или поля полюсов детали еще до оседания их над дефектом. Короткие цепочки (длиной 0,01-0,1 мм) позволяют получить четкий рисунок над дефектами с большим градиентом поля (усталостными, шлифовочными трещинами, волосовинами и др.). Они слабо осаждаются в полях малого градиента (рисками, наклепом и др.).

На интенсивность магнитной коагуляции оказывает влияние следующие факторы [64]: концентрация, дисперсность, магнитные характеристики, предыдущее магнитное состояние порошка, вязкость дисперсной среды, напряженность и градиент поля, длительность его действия, автокоагуляция.

Таким образом, магнитная коагуляция играет двоякую роль: при оптимальной интенсивности она повышает выявляемость дефектов. При высокой же интенсивности выявляемость дефектов уменьшается из-за низкой чувствительности длинных цепочек к магнитным полям мелких дефектов и значительного фона из частиц порошка, образующегося на проверяемой поверхности.

При магнитопорошковом контроле способом приложенного магнитного поля режим намагничивания часто устанавливают только по тангенциальной составляющей напряженности поля на проверяемой поверхности. В то же время установлено [65], что выявляемость дефектов зависит не только от значения тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля, но и от отношения нормальной к тангенциальной напряженности поля. При определенных соотношениях осаждение порошка над дефектами не происходит, они не выявляются даже при оптимальном значении других параметров контроля.

При выявлении поверхностных дефектов возможно применение магнитных полей повышенной частоты, с увеличением которой зоны выявляемости значительно расширяются [5]. При частоте магнитного поля 400 Гц зона выявляемости охватывает почти всю поверхность детали [65]. Расширение зоны

выявляемости при увеличении частоты намагничивающего поля объясняется процессами скин-эффекта и уменьшением размагничивающих полей проверяемой детали.

Определение напряженного состояния сварных конструкций является одной из ключевых задач при определении надежности и долговечности. Одним из методов определения напряженного состояния конструкций является метод рентгеновской дифрактометрии. Метод основан на измерении параметра кристаллической решетки для определения величины и знака напряжений. Для проведения измерений требуется предварительная специальная подготовка поверхности с окончательной электрополировкой. Глубина исследуемого слоя составляет не более 10-13 мкм [66]. Определяемые напряжения являются суммой приложенных и остаточных напряжений. Погрешность метода составляет ± 35 МПа [67]. Прикладываемые упругие напряжения приводят к смещению линий на рентгенограмме на угол $\Delta\theta$.

Первоначально метод рентгеновской дифракции применялся для измерения напряжений в авиационной и автомобильной промышленности. Позднее метод получил применение для контроля не только сталей, но и керамики, композитов и интерметаллидов. Метод также применяется для исследования напряжений в сварных швах сосудов давления.

Общими недостатками метода являются: относительно большое время экспозиции (около 20 сек.), не позволяющее эффективно сканировать большие поверхности; необходимость полировки поверхности; крайне малая глубина измерения напряжений; необходимость применения специальных мер радиационной защиты; возникновение ошибок измерения за счет влияния величины зерна, наклепа и микроструктуры [68].

К преимуществам метода следует отнести отсутствие калибровочных образцов и удовлетворительную точность измерения.

Определение напряжений на основе вычисления межплоскостного расстояния в поликристалле применяется также и в методе нейтронной радиографии и радиоскопии. Однако, в отличие от метода рентгеновской

дифракции, метод нейтронной радиографии и радиоскопии основан на регистрации нейтронов, рассеянных на объекте контроля. Источниками нейтронных пучков служат ядерные реакторы, ускорители заряженных частиц, а также радионуклидные источники. Для регистрации нейтронного излучения используются пропорциональные счетчики, сцинтилляторы, трековые детекторы в виде пластин, проявляемых после экспонирования в щелочных растворах [69]. Глубина исследуемого слоя составляет 3-4 см [69]. В связи с высокой чувствительностью (до 1%) и высоким пространственным разрешением (до 25 мкм) метод может использоваться для определения механических констант. Основным недостатком метода – большие габариты источников нейтронных пучков и высокая стоимость результатов измерений.

В отличие от предыдущих методов неразрушающего контроля эксплуатационных и остаточных напряжений ультразвуковой метод основан на зависимости скорости ультразвука от напряжений [59]. Основное преимущество метода – портативность и высокая производительность. Основным недостатком – влияние на скорость ультразвука, помимо напряжений, других характеристик материала (микроструктуры, текстуры, твердости, геометрии изделия) [70-72]. Предварительно проводится калибровка каждого вида изделия для установления тарировочной зависимости между значениями остаточных напряжений и скоростью акустических волн.

Однако последние исследования позволяют в ряде случаев преодолевать эти трудности. Это может быть достигнуто путем исследования угловой зависимости скорости ультразвука [73]. Метод не требует построения калибровочных характеристик на эталонных образцах. Результирующие данные не зависят от текстуры материала и позволяют определить по ним упругие константы материала.

Особенностью метода является незначительность самого эффекта влияния напряжений на скорость ультразвука [74]. При изменении напряжений от -160 до +160 МПа скорость распространения ультразвуковых сдвиговых волн в низкоуглеродистых сталях изменяется всего на 0,08 ... 0,2%. Поэтому скорость

ультразвука должна измеряться с погрешностью менее 0,01%. Кроме того, применение метода в производственных условиях ограничивается трудностями ввода в контролируемое изделие поперечных волн и необходимостью шлифовки поверхности для обеспечения акустического контакта. Также структурные отклонения, ориентация зерен или отклонения химического состава могут искажать влияние напряжений. Этого можно избежать, измеряя скорости двух поперечных волн [74].

Широкие возможности применения метода акустоупругости, основанного на измерении критически отраженных акустических волн, так называемых L_{CR} – волн, показаны в работе [75]. Из особенностей метода следует отметить также невысокое пространственное разрешение, поэтому выявление локальных участков с критическими напряжениями является проблематичным.

В последнее время большое внимание уделяется магнитным методам неразрушающего контроля. Эти методы применяются в основном для контроля изделий из ферромагнитных материалов, то есть из материалов, которые способны существенно изменять свои магнитные характеристики под воздействием внешнего (намагничивающего) магнитного поля. Операция намагничивания при магнитном методе неразрушающего контроля является обязательной. Съем информации может быть осуществлен с полного сечения образца (изделия) либо с его поверхности.

В зависимости от решаемых задач, типа контролируемого материала, требуемой производительности метода могут использоваться те или иные информационные параметры. К числу наиболее распространенных относятся следующие информационные параметры: коэрцитивная сила, намагниченность, индукция (остаточная индукция), магнитная проницаемость, напряженность, эффект Баркгаузена.

По способу получения первичной информации различают следующие методы магнитного контроля, представленные на рис. 1.1.

С помощью магнитных методов могут быть выявлены закалочные и шлифовочные трещины, волосовины, закаты, усталостные трещины и другие

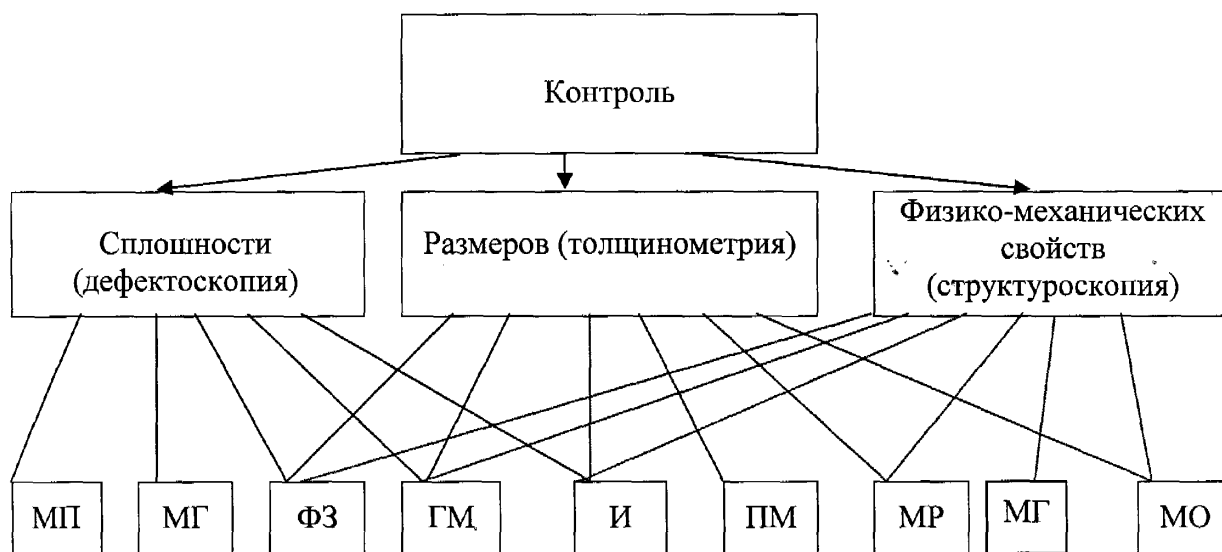


Рис. 1.1. Способы получения первичной информации при магнитном контроле: МП – магнитопорошковый; МГ – магнитографический; ФЗ – феррозондовый; ГМ – гальваноманитный; И – индукционный; ПМ – пандероматорный; МР – магниторезисторный; МО – магнитооптический или магнитодоменный; МГ – параметров петли магнитного гистерезиса [95]

поверхностные дефекты шириной раскрытия несколько микрометров. Такие методы как феррозондовый, эффекта Холла, индукционный, магнитографический можно использовать на грубых поверхностях, при этом минимальная глубина выявленных дефектов составляет трехкратную высоту шероховатостей поверхности [76]. В связи с необходимостью сканировать поверхности изделий такие методы как феррозондовый, эффекта Холла и индукционный особенно удобно применять для контроля цилиндрических изделий. Метод магнитографии успешно применяется для контроля сварных швов.

Из геометрических параметров с помощью магнитных методов наиболее часто определяют толщину немагнитных покрытий на магнитной основе, толщину стенок изделий из магнитных и немагнитных материалов.

Контроль структурных и механических свойств изделий осуществляют путем установления корреляционных связей между контролируемым параметром (температура закалки и отпуска, твердостью и т.д.) и какой-либо магнитной характеристикой (или несколькими).

1.2. Анализ магнитных методов контроля

Многочисленные исследования, проведенные на протяжении десятков лет, позволили установить наличие определенных закономерных связей между структурным состоянием, химическим и фазовым составами, прочностными характеристиками материалов и изделий с одной стороны, магнитными и электрическими свойствами, с другой. Все это послужило основой развития одного из направлений физики неразрушающего контроля – магнитного структурного анализа сталей и сплавов, развивающегося на стыке двух наук: физики магнитных явлений и физического металловедения [131].

Краеугольным камнем в разработке методов и средств магнитного неразрушающего контроля (магнитного структурного анализа) является современная теория ферромагнетизма, развитие которой В. К. Аркадьевым [80], С. В. Вонсовским [81, 82], Я. И. Френкелем [83], Я. Г. Дорфманом [84], Н. С. Акуловым [85], Е. И. Кондорским [86], К. П. Беловым [87], Я. З. Янусом [88] и др. в СССР, Р. Бозортом (США) [89], Р. Беккером, М. Керстеном, В. Деренгом (Германия), Л. Неелем (Франция), С. Тикадзуми (Япония) [90] и др., позволило понять механизм процессов намагничивания и перемагничивания таких гетерогенных ферромагнетиков, как стали. Работы А. С. Займовского, Б. Г. Лившица, В. С. Меськина, С. С. Штейнберга, В. Д. Садовского [91], Г. В. Курдюмова, Б. А. Апаева [26], К. Н. Сироты, А. П. Гуляева, Р. Кана, Е. Берковича, Е. Кнеллера в области физики магнитных явлений, физического металловедения и материаловедения сыграли важную роль в разработке магнитных методов для оценки структурного состояния и прочностных свойств сталей и сплавов.

Особое место в развитии магнитного структурного анализа принадлежит трем школам физиков-магнитологов Н. С. Акулова, Р. И. Януса, М. Н. Михеева [93, 94, 131], работами которых заложены основы практического использования магнитных методов контроля качества термической и химико-термической обработки изделий, текстурного анализа сталей.

Область применения этих методов включает [79]:

- контроль структуры и механических свойств проката, качества термической обработки и прочностных характеристик стальных изделий;
- контроль структурного состояния, физико-механических свойств и толщины поверхностно упрочненных различными методами слоев (закалка, химико-термическая обработка) материалов и изделий;
- сортировку изделий по маркам, качественную оценку содержания легирующих элементов.

Однако, область применения данных методов, связанная с оценкой технического состояния сварных конструкций, не вполне исследована.

Для выбора вида, метода и средств магнитного контроля необходимо знание возможного диапазона изменения физических свойств и параметров материалов объекта контроля, его структуры, технологии производства, влияющей на этот диапазон, а также условий эксплуатации конструкций [95].

Необходимо отметить, что не все магнитные свойства одинаково чувствительны к изменению структурного и фазового состава вещества. Так, например, температуру Кюри θ , естественную кристаллографическую анизотропию и намагниченность насыщения M_s следует отнести к структурно нечувствительным или слабочувствительным магнитным свойствам, которые в основном определяются количеством, типом атомов и их расположением в кристаллографической решетке.

При этом кривая намагничивания, форма и площадь петли магнитного гистерезиса, а также основные параметры, характеризующие их, зависят от структурного состояния и фазового состава ферромагнетика, то есть потери энергии на перемагничивание, коэрцитивную силу, магнитную проницаемость и ряд других магнитных параметров кривой намагничивания и петли магнитного гистерезиса следует отнести к структурно чувствительным характеристикам.

Важными являются *статические и динамические магнитные характеристики* ферромагнетиков. К статическим относят *кривую намагничивания и предельную петлю гистерезиса* (рис.1.2), состоящую из

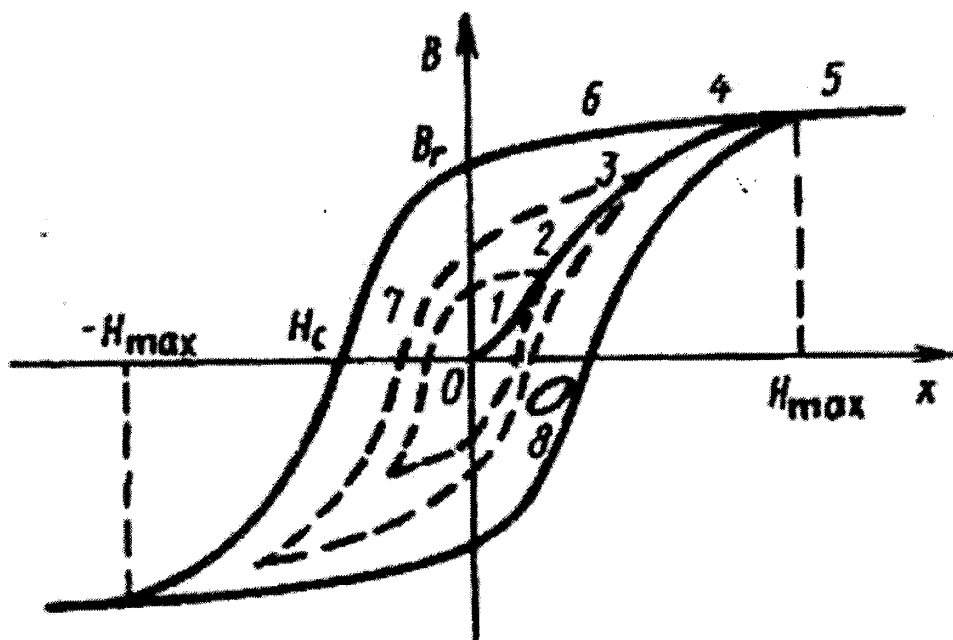


Рис. 1.2. Кривая намагничивания и петли гистерезиса ферромагнетика [95]: 1-5 – участки кривой намагничивания; 6 – предельная петля гистерезиса; 7 – частные петли гистерезиса; 8 – несимметричные частные циклы гистерезиса

области начального намагничивания, области Рэлея, области резкого возрастания намагниченности (относительная магнитная проницаемость достигает максимального значения), области приближения намагниченности к насыщению и области парапроцессов или области так называемого истинного намагничивания, наступающего после технического намагничивания. Явление гистерезиса состоит в том, что физическая величина, характеризующая состояние вещества (например, намагниченность или магнитная индукция), неоднозначно зависит от внешних факторов (например, напряженности магнитного поля). Явление наблюдается в тех случаях, когда в процессе намагничивания состояние объекта в определенный момент времени определяется состоянием в предшествующие моменты времени.

Параметрами предельной петли магнитного гистерезиса служат *остаточная индукция* B_r и *коэрцитивная* (от лат. *coercitio*— удерживание) сила H_c .

Если время установления напряженности поля соизмеримо с временем перемагничивания материала, то определяемые в этом режиме характеристики называют динамическими. Основным, влияющим на положение динамических характеристик, фактором, который можно учитывать при магнитном контроле, являются *вихревые токи*.

По использованным магнитным информативным параметрам различают следующие разновидности магнитной структуроскопии:

- а) коэрцитиметрия;
- б) контроль по остаточной намагниченности;
- в) контроль по магнитной проницаемости;
- г) контроль по магнитным шумам;
- д) ферритометрия;
- е) метод высших гармоник.

Методы определения магнитных характеристик различаются, во-первых, способами создания намагничивающего поля, т. е. магнитного поля, которое

воздействует на испытываемый объект, и, во-вторых, способами измерения индукции и напряженности магнитного поля.

По способу создания намагничивающего поля методы контроля, согласно [76] разделяются на три группы: с импульсным изменением напряженности поля; с непрерывно изменяющейся по заданному закону напряженностью поля (переменное поле); с комбинированным перемагничиванием — импульсным намагничиванием и плавным непрерывным перемагничиванием (рис. 1.3).

В большинстве случаев практического применения [95] используется одна из характеристик предельной петли магнитного гистерезиса материала изделия: коэрцитивная сила H_c , остаточная намагниченность J_R , намагниченность насыщения J_s , максимальная магнитная проницаемость μ_{max} .

Метод эффекта Баркгаузена (МЭБ) также относится к магнитным методам и обладает рядом особенностей, дающим ему важные преимущества при контроле напряженного состояния [130]. К ним относятся:

- чувствительность к остаточным напряжениям;
- относительная простота регистрации и большое разнообразие преобразователей, позволяющих адаптировать их практически к любой форме поверхности;
- незначительный магнитоупругий гистерезис;
- высокое пространственное разрешение (до 1 мм);
- наличие нескольких независимых параметров магнитного шума, селективно характеризующих различные свойства поверхностных слоев;
- наличие магнито-акустического эффекта Баркгаузена, позволяющего разделить вклад доменных границ различных типов;
- возможность определения главных напряжений;
- возможность послойного анализа свойств и напряжений в пределах глубины проникновения (до 1,2 мм).

Естественными ограничениями являются область контролируемых материалов (ферромагнитные стали и чугуны), ограниченная глубина



Рис. 1.3. Магнитные методы контроля металлов [76]

проникновения, влияние микроструктуры, отклонений химического состава и состояния поверхности.

Скачкообразное изменение намагниченности, в свою очередь, приводит к локальным микродеформациям и распределению акустических волн, которые могут быть зарегистрированы акустическими преобразователями. Магнито-акустический эффект Баркгаузена (МАЭБ) [98] связан преимущественно со смещением 90° доменных границ, и в этом он принципиально отличается от МЭБ. Другой особенностью МАЭБ является возможность регистрации акустических волн на расстояниях, значительно больших, чем это возможно для электромагнитных волн, вызванных смещениями доменных границ.

В последние годы было много сделано для адаптации МЭБ к разнообразным аспектам измерения напряженного состояния. Появилась возможность измерять напряжения в поверхностных упрочненных слоях с разрешением по глубине [99]. Созданы четырехполосные преобразователи, обеспечивающие измерение шума Баркгаузена при угловом сканировании магнитного поля возбуждения [100]. Разработан, так называемый, микроскоп Баркгаузена [101], позволяющий воспроизводить топографию магнитных полей рассеивания с пространственным разрешением в несколько десятков микрон, то есть практически на доменном уровне. Следует упомянуть также работы Фраунтгоферовского института по калибровке МЭБ, в том числе, для измерений при двухосном напряженном состоянии.

Применение МЭБ в промышленности возможно для оценки состояния поверхности, в том числе напряженного состояния, после механической обработки [102, 103]; дефектов в зубьях шестерен [104]; упрочнения, в том числе послойного анализа после упрочнения любыми видами поверхностной пластической деформации [105, 106, 107]; остаточных напряжений в оболочках, сосудах под давлением, резервуарах, рельсах, железнодорожных осях, корпусах дизельных двигателей, стержневых и трубчатых фермах, рельсах, элементах авиационных конструкций и др. [108].

В последние годы активно развивается метод магнитной памяти (ММП) металла основан на выявлении локального усиления остаточного магнитного поля и смены его полярности (знака), что отображается в виде импульсов на осциллограммах приборов. Вид, размеры дефектов и глубина их залегания не расшифровываются при данном методе.

Методика проведения ММП-контроля не требует специальной зачистки поверхности контроля абразивным инструментом и искусственного намагничивания (используется естественная намагниченность изделий) [109].

В работе [110] приведена интерпретация линии смены полярности остаточного магнитного поля $H_p = 0$ как линии главных напряжений, указывающей место расположения площадки скольжения, перпендикулярно которой действуют максимальные растягивающие, а вдоль нее - сжимающие напряжения. А также указывается, что основным признаком (качественным критерием) зоны концентрации напряжений (КН) является наличие в этой зоне линий, характеризующихся сменой знака нормальной составляющей магнитного поля рассеяния.

По величине и характеру изменения нормальной составляющей напряженности магнитного поля рассеяния H_p , измеряемого прибором над поверхностью контролируемых объектов, в работах [110, 111] предлагается определять, как зоны концентрации напряжений на оборудовании, структурные изменения металла и подповерхностные дефекты, так и поверхностные дефекты.

Однако, следует подчеркнуть, что магнитное поле рассеяния возникает не только над дефектами, но и в зоне любых локальных изменений однородности магнитных свойств. Интенсивность поля рассеяния в этом случае зависит от соотношения проницаемостей магнитных и немагнитных сред. Поэтому наличие поверхностных дефектов, коррозии, окалины, неровностей т.п. будет вызывать локальное возбуждение магнитного поля.

Из практики применения метода магнитной памяти металла при контроле оборудования, в подтверждение вышеизложенного, можно привести много примеров, когда шлифовка металла по линии $H_p=0$ на глубину 0,5-0,6 мм

полностью устраняла саму линию $H_p=0$ [119].

Таким образом, следует заключить, что применение ММП без соответствующей подготовки поверхности контроля, приводит к неэффективности метода для выявления микроповрежденности металла.

Также следует согласиться с оценкой метода магнитной памяти, данной в работах [112, 113], и заключить, что метод характеризуется недостаточной достоверностью в выявлении сварочно-технологических дефектов в металле шва и не обнаруживает типичные эксплуатационные трещины в зоне термического влияния сварных соединений.

Для диагностики состояния металла конструкций подземного залегания (трубопроводы, резервуары и пр.) с поверхности Земли применяется бесконтактный магнитометрический метод [120, 121]. Метод основан на выявлении местоположения дефектов за счет регистрации изменения магнитной проницаемости при изменении напряжений под действием механических нагрузок или структурных изменений металла трубопровода (деформация трубы, внутренняя и наружная коррозия, провисы, оползневые нагрузки и т.п.). Аналогичный принцип лежит в основе выявления дефектов по регистрации магнитных полей насыщения при работе магнитного прибора-дефектоскопа. Эффективность выявления дефектов металла при этом сопоставима с аналогичным показателем внутритрубной дефектоскопии и составляет не менее 75 %.

Метод позволяет выявлять трещиноподобные дефекты (закаты, плены, риски), дефекты сварных швов, локальные коррозионные язвы, изменения толщины стенок труб, вмятины, гофры, отклонения от проектной оси залегания.

Минимальная протяженность выявляемых дефектов составляет 10 мм при раскрытии дефектов более 300 мкм. Недостатком метода является бо́льшая погрешность измерения – до 30%.

Применение метода вихревых токов возможно для материалов, у которых существует зависимость электрической проводимости или магнитной проницаемости от напряжений. Если последняя зависимость хорошо выражена в

широком диапазоне магнитных полей, то зависимость электропроводности от напряжений для обычных конструкционных материалов очень слабая. Она наиболее значительна для слабопроводящих металлических материалов, например титановых сплавов, однако и для них она не превышает 3% при достижении предела упругости. Поэтому перспективы имеют технологии, обеспечивающие высокую точность измерений проводимости на фоне возможных отклонений зазора и других параметров измерений. Среди них следует особо выделить метод меандровой магнитометрии (МММ). Имеется большое число работ, посвященных теории и применению МММ технологии, в том числе для измерений напряжений [96, 97]. Метод обладает высокой производительностью и точностью и позволяет получать цветные изображения распределения проводимости на больших поверхностях во времени, близкого к реальному. Глубина измерения напряжений обычно не превышает 1 мм. Имеются примеры успешного применения метода для контроля остаточных напряжений в трубах, а также пластической деформации [114, 115].

Для оценки остаточных сварочных напряжений применяют также неразрушающий магнитоупругий метод. Магнитоупругий метод основан на использовании магнитоупругого эффекта — изменении магнитных характеристик в результате деформации ферромагнитного материала [116].

Известно, что под действием механических напряжений значительно изменяются свойства ферромагнитных материалов. Это объясняется тем, что при наличии в кристаллическом теле напряжений σ деформируется решетка, и атомы смещаются относительно положения, которое они занимали в отсутствие напряжений, в результате чего изменяется и характер магнитного взаимодействия между атомами кристалла. Иными словами, изменяется либо магнитная проницаемость μ , либо индукция B . Связь между изменением магнитной проницаемости ε_μ и деформацией ε можно описать выражением [123]:

$$\varepsilon_\mu = \frac{\Delta\mu}{\mu} = k\varepsilon \quad (1.1)$$

где $\Delta\mu$ —изменение магнитной проницаемости под действием напряжения; μ — магнитная проницаемость ферромагнитного материала; ε_μ —относительная магнитная проницаемость; ε - относительная деформация материала, k — относительная чувствительность магнитоупругого материала.

На рис. 1.4 приведена зависимость $\varepsilon_\mu = f(\sigma)$, которая имеет нелинейный характер. Однако при значении $\sigma > 20 \text{ Н/мм}^2$ эта зависимость практически линейная в пределах упругих деформаций металла. Причем максимальное изменение магнитной проницаемости будет иметь место по направлению действия максимальных (главных) напряжений. В направлении действия напряжений растяжения магнитная проницаемость возрастает, а в направлении сжимающих напряжений — падает.

Таким образом, измерив изменение магнитной проницаемости в результате действия напряжений и пользуясь графиком $\varepsilon_\mu = f(\sigma)$, можно определить величину действующего в металле напряжения.

Основными недостатками данного метода являются значительное влияние магнитного зазора на результаты измерений и отсутствие методической основы применения метода для двухосного напряженного состояния. Применение метода для оценки напряженного состояния возможно только в области упругой деформации [117].

Магнитоупругий метод также применяется для контроля уровня радиационного охрупчивания металла сварных соединений корпусов реакторов атомных электростанций. При этом величина магнитной проницаемости при облучении образцов увеличивается на 50% [122].

Метод каппаметрии основан на оценке магнитной восприимчивости χ_c — физической величины, характеризующей связь между магнитным моментом (намагниченностью) и напряженностью магнитного поля исследуемого материала. Магнитная восприимчивость определяется по методам Гауи и Фарадея. В работе [124] метод каппаметрии предложено использовать для определения пластической деформации и плотности дислокаций монокристаллических, поликристаллических и стальных образцов. Определение магнитной

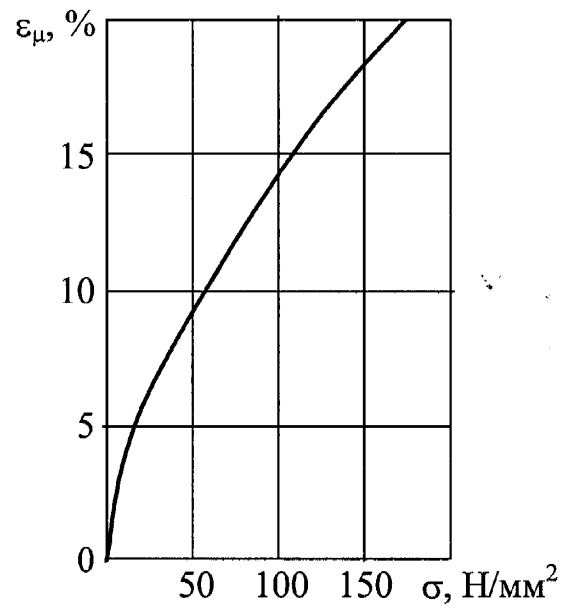


Рис. 1.4. Зависимость относительной магнитной проницаемости стали от механических напряжений [116]

восприимчивости связано с необходимостью приложения магнитного поля большой напряженности. Поэтому в работе [124] предложено определять параметр c , как параметр более чувствительный к плотности дислокаций чем коэрцитивная сила H_c , и измерять магнитную восприимчивость χ_c при существенно меньших магнитных полях (c напряженностью близкой H_c). Параметр c может быть определен из следующего выражения:

$$\chi_c = \frac{c}{H^3}, \quad (1.2)$$

где H – напряженность внешнего магнитного поля. Выражение (1.2) имеет смысл при следующем допущении для намагниченности M :

$$M = M_s \cos \Theta \approx M_s \left(1 - \frac{\Theta^2}{2}\right), \quad (1.3)$$

где Θ – угол между напряженностью магнитного поля и магнитным моментом M_s . Поэтому определение параметра c возможно в узком диапазоне напряженностей магнитного поля:

$$p_1 H_c < H < p_2 H_c, \quad (1.4)$$

где p_1 и p_2 – параметры, ограничивающие напряженность магнитного поля.

Преимуществом метода каппаметрии является независимость параметра c от геометрических размеров образцов, способа приложения пластической деформации и вида нагружения (статическое или циклическое).

В последнее время благодаря высокой чувствительности к структурным изменениям и фазовым превращениям, достаточной простоте, значительной точности, слабой зависимости от геометрических размеров и возможности проведения измерений в локальных участках изделий из всех магнитных методов неразрушающего контроля наиболее широкое распространение получили коэрцитиметрические методы [95, 133].

Измерение напряженности магнитного поля в образце основано на использовании граничного условия на границе раздела двух сред, т. е. на равенстве тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля в

воздухе вблизи поверхности образца (измеренной индукционным или гальваномангнитным преобразователем) и внутри образца.

Установление взаимосвязи между параметрами предельной петли гистерезиса ферромагнитных материалов (с учетом возможных диапазонов их изменения) и контролируемыми физико-механическими свойствами определяют возможности магнитного метода контроля механических свойств металла стальных конструкций [79].

Наиболее широко в структуроскопии используется зависимость между твердостью углеродистых и низколегированных сталей и их коэрцитивной силой. Так как твердость стали зависит от режима ее термической обработки, то практически во всех случаях корреляция между твердостью и коэрцитивной силой позволяет установить также и зависимость между коэрцитивной силой и температурой закалки и отпуска.

Таким образом, действие коэрцитиметра основано на использовании корреляции между размагничивающим током, пропорциональным коэрцитивной силе, и определенными механическими свойствами объекта контроля.

Современная теория указывает на три возможные причины магнитного гистерезиса (см. рис. 1.2):

1. Гистерезис, обусловленный необратимыми процессами вращения вектора намагниченности, когда в ферромагнетике (предварительно намагниченном до насыщения) в отсутствие поля нет зародышей обратной магнитной фазы и отсутствуют условия для ее образования при перемагничивании.

2. Гистерезис, вызванный задержкой роста зародыша обратной магнитной фазы вследствие увеличения поверхности и поверхностной энергией граничного слоя, отделяющего зародыш от основного домена.

3. Гистерезис, обусловленный необратимыми смещениями доменных границ между различными магнитными фазами в результате взаимодействия доменных границ с неоднородностями материала и различного рода дефектами кристаллического строения ферромагнетика.

Необходимым условием реализации в ферромагнетике первой причины, приводящей к гистерезису, является сохранение однодоменного состояния частиц вплоть до напряженностей обратного магнитного поля, при которых совершается необратимый процесс вращения [118]. Реально такая ситуация может иметь место в случае идеального однородного ферромагнетика, находящегося в однодоменном состоянии.

Сопоставление коэрцитивной силы H_c железа и углеродистых сталей с эффективным полем анизотропии показывает, что в этих материалах гистерезис не связан с первой причиной.

Гистерезис, обусловленный задержкой роста зародышей обратной магнитной фазы, наблюдается практически во всех ферромагнетиках. В таких ферромагнетиках, как железо и его сплавы, зародышеобразование происходит легко, поэтому коэрцитивная сила будет в основном определяться величиной H_k (критическое поле, необходимое для преодоления смещающейся доменной границы всех потенциальных барьеров, возникающих из-за наличия различного рода дефектов в реальном ферромагнетике), то есть вступает в силу третий вид гистерезиса, обусловленный задержкой смещения доменных границ. Подробно для различных случаев зародышеобразования величину поля старта и критического поля определил Гудинаф [119].

Таким образом, из анализа различных теорий коэрцитивной силы следует, что H_c является структурно чувствительной характеристикой, реагирующей на изменения структурного состояния вещества.

В теории коэрцитивной силы используется качественное описание процессов перемагничивания в сталях при прогнозировании изменения магнитных свойств в результате изменения структурного состояния и фазового состава.

Однако ни одна из теорий коэрцитивной силы не учитывает силового воздействия, возникающего в процессе эксплуатации стальных конструкций, учет которого необходим для количественного расчета остаточного ресурса.

Изменение свойств материала в процессе эксплуатации (старения), а также в результате различных нарушений технологии производства сварных конструкций, требует применения методов и средств, которые бы могли оценивать реальную несущую способность материала и конструкции - остаточный ресурс.

Таким образом, опираясь на теории процессов намагничивания и перемагничивания, устанавливающих закономерные связи магнитных свойств вещества с его структурным состоянием, а также исследуя эти связи экспериментально, можно развивать и совершенствовать направления физики магнитных методов испытаний сталей и сварных конструкций. Поэтому цель данной работы заключается в теоретическом обосновании и построении методологии магнитного коэрцитиметрического метода контроля сварных соединений на разных стадиях эксплуатации конструкций для прогнозирования индивидуального остаточного ресурса.

В связи с этим необходимо решить следующие задачи:

- 1) в соответствии с результатами анализа существующих методов неразрушающего контроля и диагностики сварных конструкций обосновать выбор магнитного коэрцитиметрического метода для оценки технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса сварных соединений;
- 2) на основе анализа физических свойств сварного соединения предложить и исследовать физическую модель сварного соединения для изучения влияния геометрических и магнитных параметров сварного шва, зоны термического влияния (ЗТВ) и основного металла на величину коэрцитивной силы сварного соединения;
- 3) на основе результатов анализа закономерностей процесса магнитного контроля сварного соединения построить математическую модель зависимости коэрцитивной силы сварного соединения от геометрических и магнитных параметров сварного шва, зоны термического влияния и основного металла для определения локальных особенностей распределения коэрцитивной силы в сварном соединении;

- 4) на основе анализа физических закономерностей исследовать влияние циклического и статического нагружения на информативный параметр магнитного метода – коэрцитивную силу сварного соединения; определить пороговые значения коэрцитивной силы, соответствующие состоянию предразрушения;
- 5) исследовать влияние структурных изменений металла сварных соединений на его магнитные свойства и определить причины изменения величины коэрцитивной силы;
- 6) разработать методику оценки технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса сварных соединений трубопроводов с использованием коэрцитиметрического метода контроля;
- 7) исследовать влияние реальных условий эксплуатации газопровода на изменение величины коэрцитивной силы в сварных соединениях.

РАЗДЕЛ 3

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ НА ВЕЛИЧИНЫ КОЭРЦИТИВНЫХ СИЛ ОСНОВНОГО МЕТАЛЛА И СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

В процессе эксплуатации сварные конструкции подвергаются воздействию целого комплекса технических, технологических, а иногда и геодинамических факторов, что вызывает изменение характера и интенсивности нагружения сварных соединений, перераспределение напряжений, а в отдельных случаях достижение ими предельных значений.

Для оценки технического состояния сварных соединений, а также прогнозирования их остаточного ресурса необходимо исследовать влияние различных эксплуатационных факторов, вызывающих сложный комплекс механизмов деградации металла, на параметры магнитного коэрцитиметрического метода.

В этом разделе представлены результаты экспериментальных исследований влияния остаточных пластических деформаций, структурных изменений, а также циклических и статических нагрузок на величины коэрцитивных сил основного металла и сварных соединений, полученные на образцах из сталей нефтегазового сортамента. Определены пороговые значения коэрцитивной силы.

3.1. Исследование влияния остаточных пластических деформаций на величину коэрцитивной силы основного металла и сварных соединений при статическом нагружении образцов

Существенное влияние на надежность и остаточный ресурс сварных соединений оказывает пластическая деформация. Она может возникать в зонах конструктивных концентраторов напряжений (места вварки тройников, отводов в трубопроводах), различного рода дефектов (трещины, непровары, несплавления,

вмятины, царапины, риски), изменения геометрии трубы. Вязкость разрушения трубных сталей после пластического деформирования значительно уменьшается.

Для изучения зависимости коэрцитивной силы сварных соединений и основного металла от величины остаточных пластических деформаций проводились исследования на испытательном стенде (рис. 3.1), состоящем из разрывной установки BALWING - 100, самописца и устройства регистрации SONY-RZ, а также коэрцитиметра КРМ-Ц-2М с приставным магнитным устройством.

Исследования проводились на образцах, изготовленных по ГОСТ 6996-66 из трубной стали 10Г2С1 двух типов – со сварным швом, и без шва. Химический состав стали представлен в табл. 3.1. Механические свойства следующие: $\sigma_T = 335$ кг/мм², $\sigma_B = 480$ кг/мм². Образцы со сварным швом имели следующие размеры: ширина в рабочей части образцов составляла 60 мм, толщина - 28 мм, длина рабочей части образцов - 80 мм. Образцы без сварного шва имели следующие размеры: ширина в рабочей части образцов составляла 60 мм, толщина - 28 мм, длина рабочей части образцов - 230 мм. Сварной шов был выполнен ручной дуговой сваркой в нижнем положении электродами УОНИ 13/55 на образцах с X – образной разделкой кромок. В результате были получены сварные соединения следующей структуры: металл шва представлял собой смесь феррито-перлитно-бейнитной составляющих (рис. 3.2 - 3.4). Основной металл имел строчечную феррито-перлитную структуру (рис. 3.5).

Алгоритм выполнения исследований зависимости величины коэрцитивной силы основного металла и сварных соединений от остаточных пластических деформаций представлен на рис. 3.6.

Проведенные исследования состояли из двух этапов. На первом этапе исследовалось влияние остаточных пластических деформаций на величину коэрцитивной силы основного металла. В процессе статических испытаний образцы без сварного шва нагружали ступенчато до разрушения (рис.3.7). При ступенчатом нагружении образцов после каждого увеличения нагрузки до максимального напряжения σ_{max} производили разгрузку образцов до $\sigma = 0$.

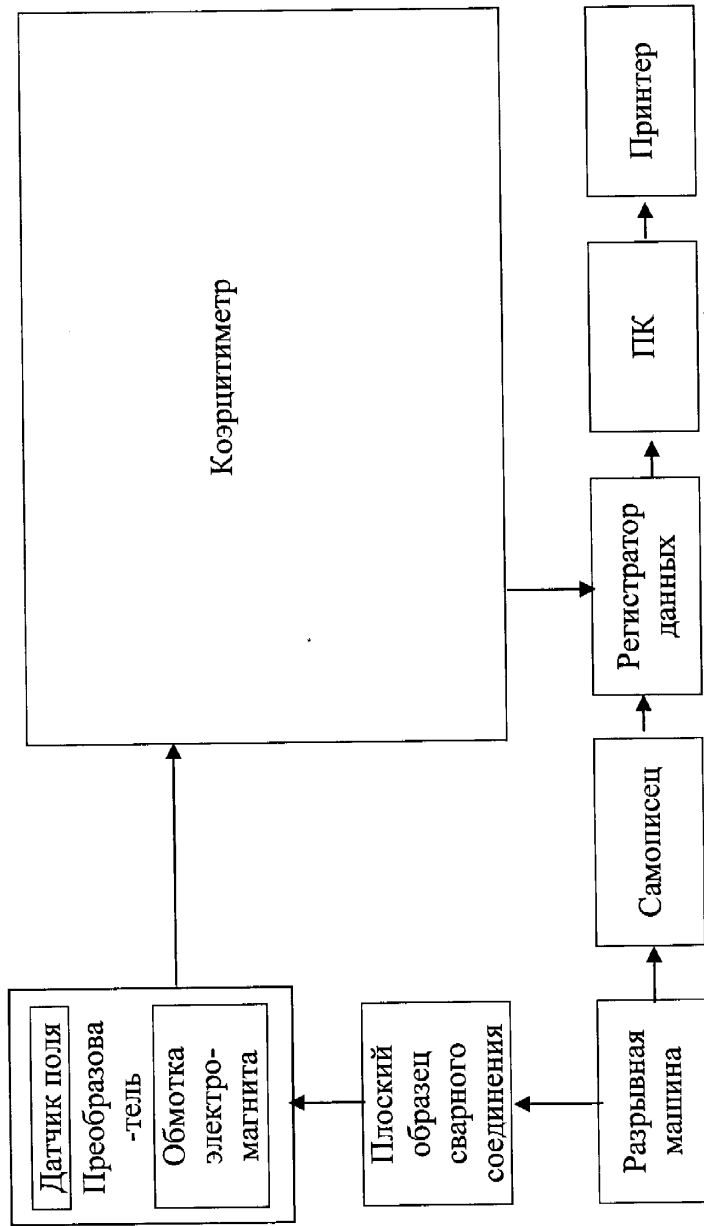


Рис. 3.1. Блок-схема разработанного испытательного стенда для оценки воздействия остаточных пластических деформаций на величину коэрцитивной силы образцов сварных соединений и основного металла

Таблица 3.1.

Химический состав стали 10Г2С1

Процентное содержание химического элемента									
Si	N	Mn	Cu	As	Ni	S	C	P	Cr
0,95	0,004	1,45	0,15	0,06	0,21	0,02	0,12	0,01	0,28

Таблица 3.2.

Характерные значения величин коэрцитивной силы сварного соединения и основного металла стали 10Г2С1

Объект измерения	Состояние	Угол φ	Характерное значение	
			Условное обозначение	Величина коэрцитивной силы, А/м
Основной металл	исходное	0	$ H_c^{o.m.} _0^0$	266
		90	$ H_c^{o.m.} _0^{90}$	270
	разрушения	0	$ H_c^{o.m.} _{разр}^0$	645
		90	$ H_c^{o.m.} _{разр}^{90}$	470
Сварное соединение	исходное	0	$ H_c^{св.с.} _0^0$	400
		90	$ H_c^{св.с.} _0^{90}$	447
	разрушения	0	$ H_c^{св.с.} _{разр}^0$	650
		90	$ H_c^{св.с.} _{разр}^{90}$	570

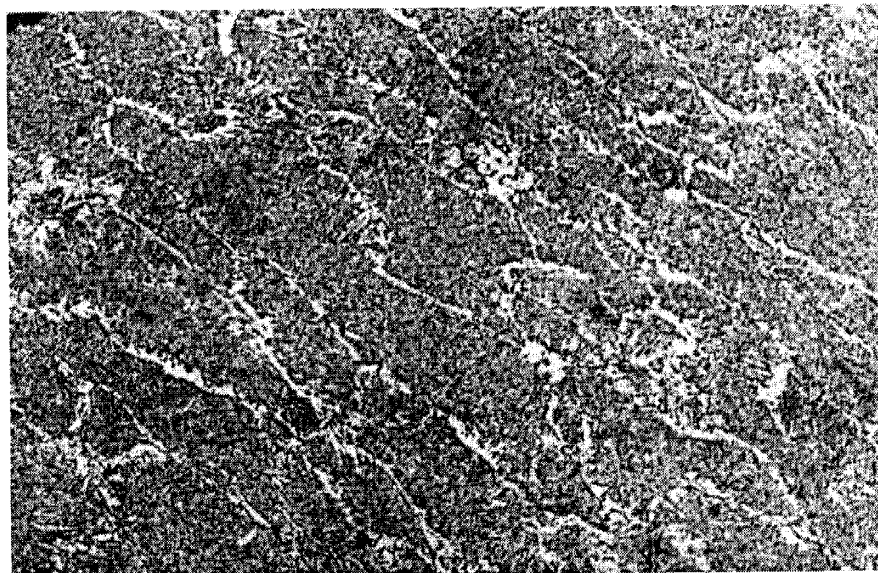


Рис. 3.2. Участок доэвтектоидного феррита, выделившегося в виде прослоек по границам кристаллитов, в сварном шве ($\times 320$)

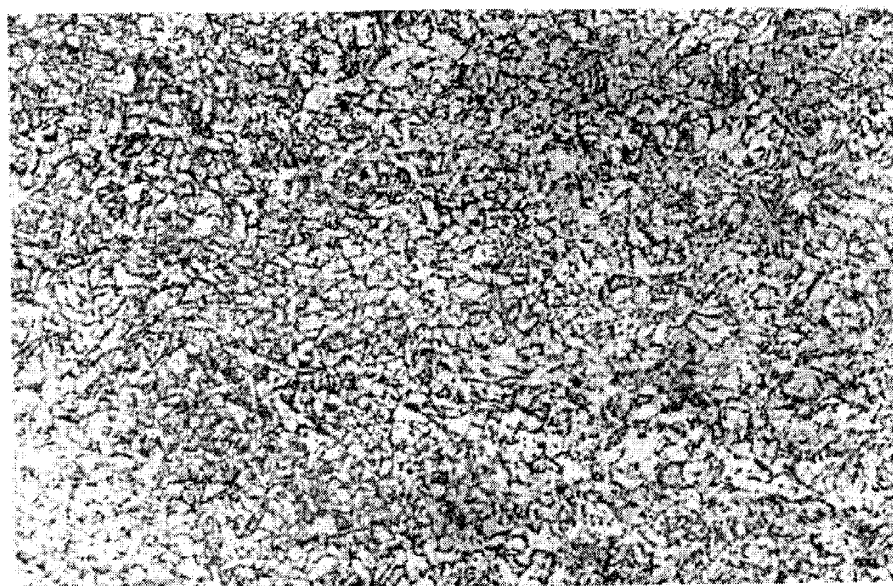


Рис. 3.3. Участок нормализованной структуры сварного шва, образованный в результате повторного воздействия термического цикла сварки на литую структуру ($\times 320$)

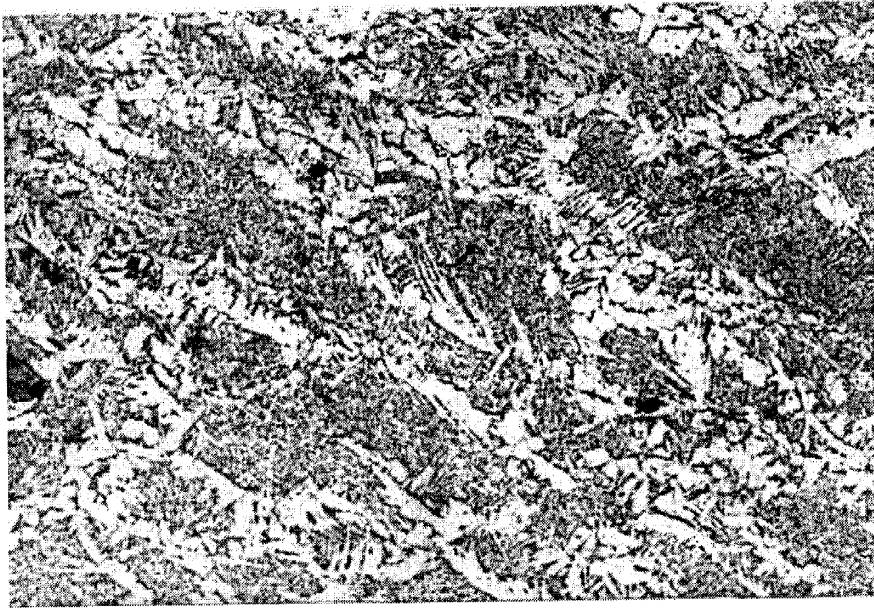


Рис. 3.4. Участок сварного шва, имеющий структуру феррита с ориентировкой по видманштетту ($\times 320$)

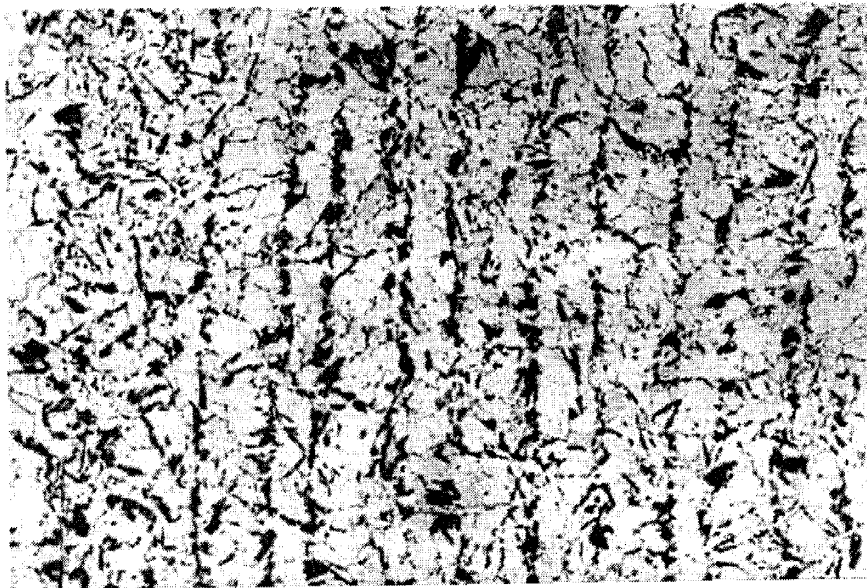


Рис. 3.5. Строчечная феррито-перлитную структура основного металла ($\times 320$)

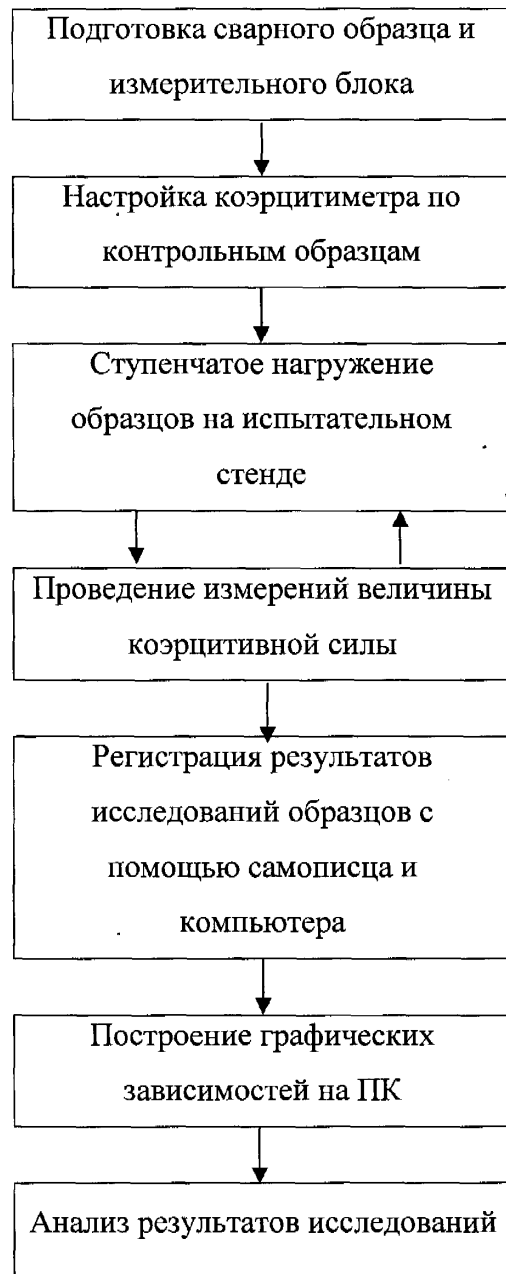


Рис. 3.6. Алгоритм исследований зависимости коэрцитивной силы основного металла и сварных соединений от остаточных пластических деформаций

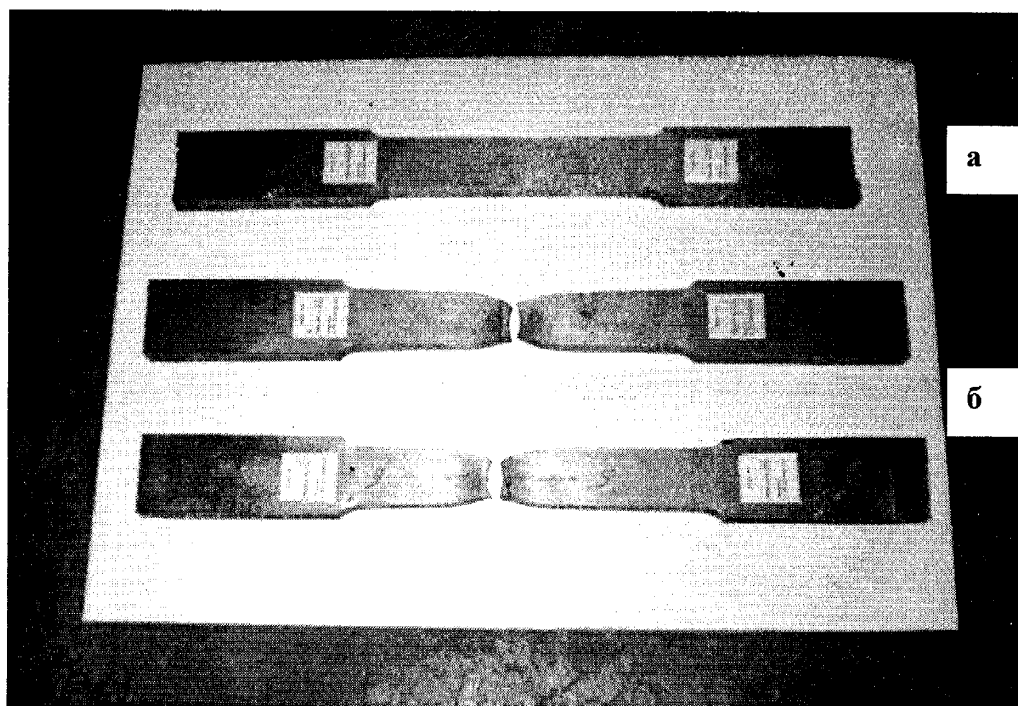


Рис. 3.7. Образцы для исследования воздействия остаточных пластических деформаций на величину коэрцитивной силы образцов основного металла: а – до испытаний, б – после испытаний

Регистрация результатов измерения коэрцитивных сил образцов в продольном $|H_c^{o.m.}|^0$ и поперечном $|H_c^{o.m.}|^{90}$ направлениях по отношению к прикладываемой нагрузке производилась в разгруженном состоянии.

Применение приставного магнитного устройства позволило оперативно измерять величину коэрцитивной силы в различных направлениях по отношению к направлению приложения нагрузки (рис.3.8). Одновременно с помощью самописца записывали диаграмму нагружения образцов и фиксировали начало пластического течения металла. Результаты измерений заносятся в базу данных устройства регистрации. Применение такого алгоритма исследований позволило установить влияние пластической деформации на величину коэрцитивной силы образцов.

Путем проведения многократных измерений величины коэрцитивной силы на одном и том же образце и определения статистических показателей точности измерений (среднее значение коэрцитивной силы и выборочная дисперсия) установлено, что для испытуемых образцов достаточно проводить 4 измерения, в этом случае точность измерения коэрцитивной силы будет определяться точностью поверки эталонного образца.

Результаты экспериментальных исследований зависимости коэрцитивной силы основного металла от остаточных пластических деформаций образцов представлены на рис. 3.9, 3.10. Зависимости $H_c^{o.m.}(\epsilon)$ построены по средним из 4 измерений значений коэрцитивной силы. Характерные значения коэрцитивной силы основного металла, измеренные в исходном состоянии и после разрушения, представлены в табл. 3.2.

В результате проведенных исследований была установлена связь величины коэрцитивной силы основного металла с остаточными пластическими деформациями.

Кривые полученных зависимостей $|H_c^{o.m.}|^0 = f(\epsilon_{пл.ост.})$ и $|H_c^{o.m.}|^{90} = f(\epsilon_{пл.ост.})$ носят нелинейный характер и состоят из двух участков. Точки перегибов кривых лежат в областях значений остаточных пластических деформаций порядка 2 %.

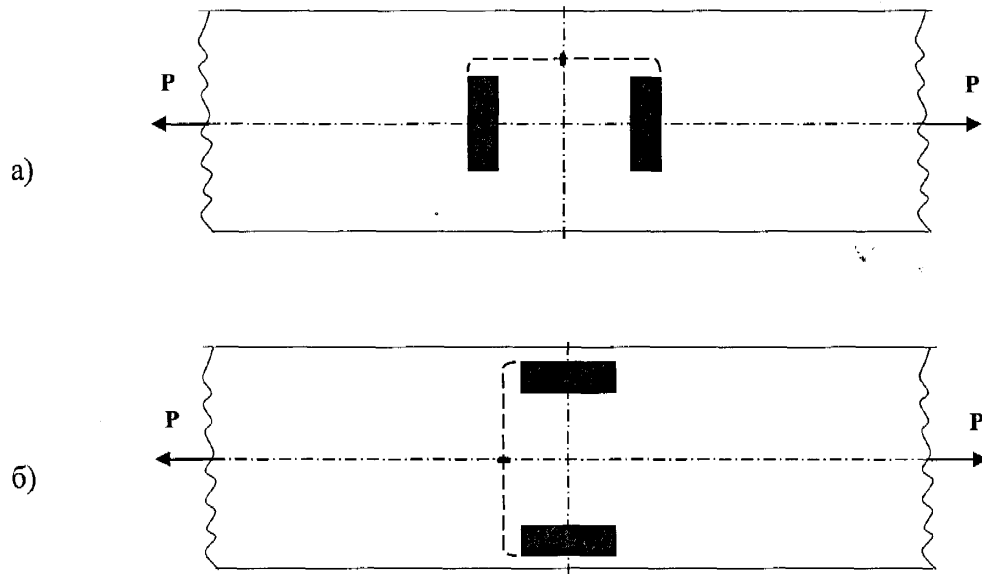


Рис. 3.8. Продольное (а) и поперечное (б) позиционирование измерительного устройства коэрцитиметра при испытании образцов из трубной стали 10Г2С1

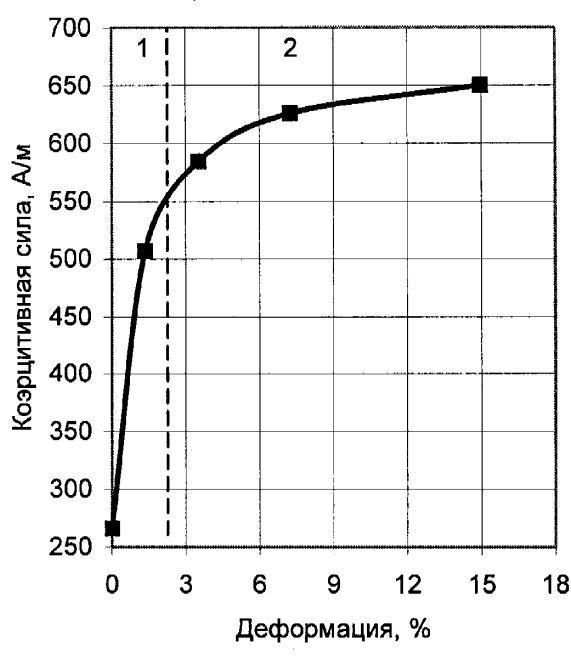


Рис. 3.9. Зависимость величины коэрцитивной силы основного металла (сталь 10Г2С1), измеренной в продольном направлении в разгруженном состоянии, от остаточной пластической деформации $\epsilon_{пл.ост}$: 1, 2 – участки зависимости

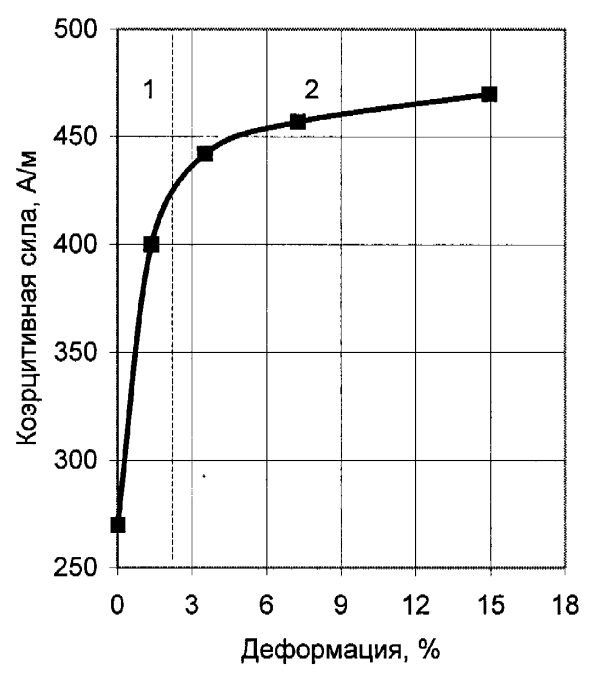


Рис. 3.10. Зависимость величины коэрцитивной силы основного металла (сталь 10Г2С1), измеренной в поперечном направлении в разгруженном состоянии, от остаточной пластической деформации $\epsilon_{пл.ост}$: 1, 2 – участки зависимости

Участок 1 кривых $|H_c^{o.m.}|^0(\epsilon_{пл.ост.})$ и $|H_c^{o.m.}|^{90}(\epsilon_{пл.ост.})$ характеризуется резким возрастанием величин $|H_c^{o.m.}|^0$ и $|H_c^{o.m.}|^{90}$ с увеличением уровня остаточных пластических деформаций. Возрастание величины коэрцитивной силы, измеренной под углом 0° по отношению к прикладываемой нагрузке, составило 112%, под углом 90° - 63%. На данном участке зависимости $|H_c^{o.m.}|^0 = f(\epsilon_{пл.ост.})$ и $|H_c^{o.m.}|^{90} = f(\epsilon_{пл.ост.})$ близки к линейным.

На участке 2 кривых $|H_c^{o.m.}|^0(\epsilon_{пл.ост.})$ и $|H_c^{o.m.}|^{90}(\epsilon_{пл.ост.})$ с увеличением уровня остаточных пластических деформаций наблюдается менее выраженное возрастание величин $|H_c^{o.m.}|^0$ и $|H_c^{o.m.}|^{90}$. Возрастание величины коэрцитивной силы, измеренной под углом 0° по отношению к прикладываемой нагрузке, составило 28%, под углом 90° - около 11%. Зависимости $|H_c^{o.m.}|^0 = f(\epsilon_{пл.ост.})$ и $|H_c^{o.m.}|^{90} = f(\epsilon_{пл.ост.})$ на данном участке также близки к линейным.

Таким образом, наибольшая чувствительность к остаточным пластическим деформациям наблюдается при измерении величины коэрцитивной силы под углом 0° (рис. 3.9) по отношению к прикладываемой нагрузке. В целом величина коэрцитивной силы образцов после разрушения изменилась по сравнению с исходным значением на 140% при измерении под углом 0° по отношению к прикладываемой нагрузке и на 74% при измерении под углом 90° соответственно.

На втором этапе исследовалось влияние остаточных пластических деформаций на величину коэрцитивной силы сварных соединений. В процессе статических испытаний сварные образцы нагружали ступенчато до разрушения (рис.3.11). При ступенчатом нагружении образцов после каждого увеличения нагрузки до максимального напряжения σ_{max} производили разгрузку образцов до $\sigma = 0$. Регистрация результатов измерения коэрцитивных сил образцов производилась в разгруженном состоянии.

Предварительное снятие усиления сварных швов образцов позволило также проводить измерения величины коэрцитивной силы в поперечном направлении по отношению к прикладываемой нагрузке $|H_c^{св.с.}|^{90}$ (рис.3.12). Одновременно с помощью самописца записывали диаграмму нагружения сварных образцов и

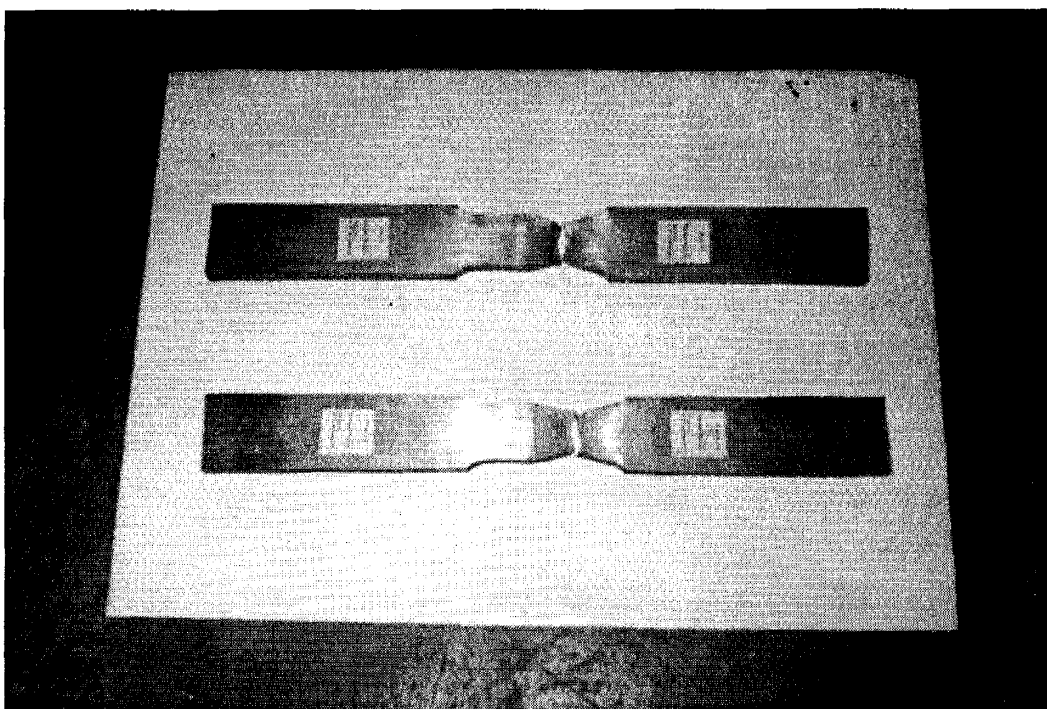


Рис. 3.11. Образцы (после испытаний) для исследования воздействия остаточных пластических деформаций на величину коэрцитивной силы сварных соединений

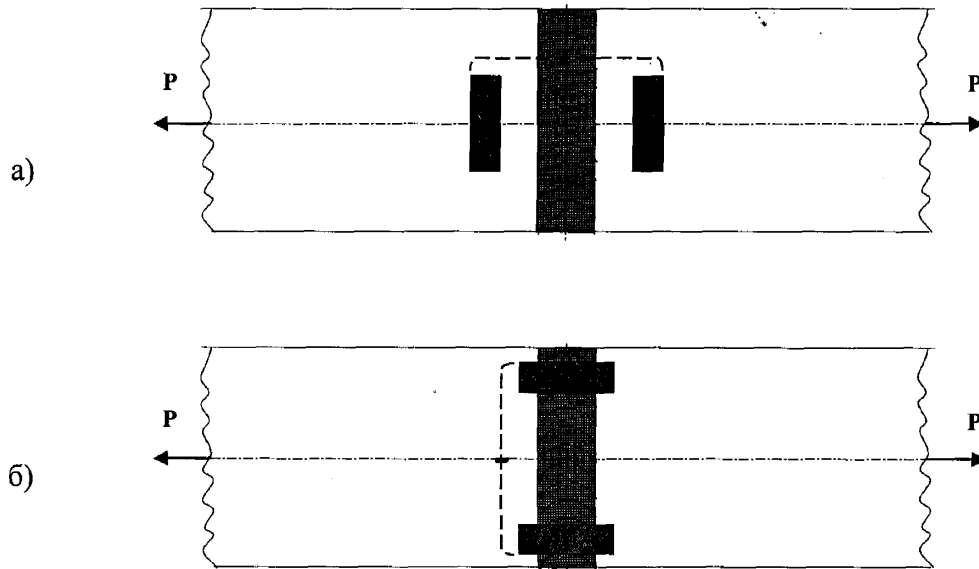


Рис. 3.12. Продольное (а) и поперечное (б) позиционирование измерительного устройства коэрцитиметра при испытании сварных образцов из трубной стали 10Г2С1

фиксируют начало пластического течения металла. Результаты измерений заносятся в базу данных устройства регистрации.

Результаты экспериментальных исследований зависимости коэрцитивной силы сварных соединений от остаточных пластических деформаций образцов представлены на рис. 3.13, 3.14. Зависимости $H_c^{св.с.}(\epsilon)$ построены по средним из 4 измерений значений коэрцитивной силы. Характерные значения коэрцитивной силы сварного соединения, измеренные в исходном состоянии и после разрушения, представлены в табл. 3.2.

В результате проведенных исследований была установлена связь величины коэрцитивной силы сварных соединений с остаточными пластическими деформациями.

Кривые полученных зависимостей $|H_c^{св.с.}|^0 = f(\epsilon_{пл.ост.})$ и $|H_c^{св.с.}|^{90} = f(\epsilon_{пл.ост.})$ носят нелинейный характер и состоят из двух участков. Точки перегибов кривых лежат в областях малых значений остаточных пластических деформаций порядка 2 %.

Участок 1 кривых $|H_c^{св.с.}|^0(\epsilon_{пл.ост.})$ и $|H_c^{св.с.}|^{90}(\epsilon_{пл.ост.})$ характеризуется резким возрастанием величин $|H_c^{св.с.}|^0$ и $|H_c^{св.с.}|^{90}$ с увеличением уровня остаточных пластических деформаций. Возрастание величины коэрцитивной силы, измеренной под углом 0° по отношению к прикладываемой нагрузке, составило 40%, под углом 90° - 15%. На данном участке зависимости $|H_c^{св.с.}|^0 = f(\epsilon_{пл.ост.})$ и $|H_c^{св.с.}|^{90} = f(\epsilon_{пл.ост.})$ также близки к линейным.

На участке 2 кривых $|H_c^{св.с.}|^0(\epsilon_{пл.ост.})$ и $|H_c^{св.с.}|^{90}(\epsilon_{пл.ост.})$ с увеличением уровня остаточных пластических деформаций наблюдается менее выраженное возрастание величин $|H_c^{св.с.}|^0$ и $|H_c^{св.с.}|^{90}$. Возрастание величины коэрцитивной силы, измеренной под углом 0° по отношению к прикладываемой нагрузке, составило 23%, под углом 90° - около 13%. Зависимости $|H_c^{св.с.}|^0 = f(\epsilon_{пл.ост.})$ и $|H_c^{св.с.}|^{90} = f(\epsilon_{пл.ост.})$ на данном участке близки к линейным.

Таким образом, наибольшая чувствительность к остаточным пластическим деформациям наблюдается при измерении величины коэрцитивной силы

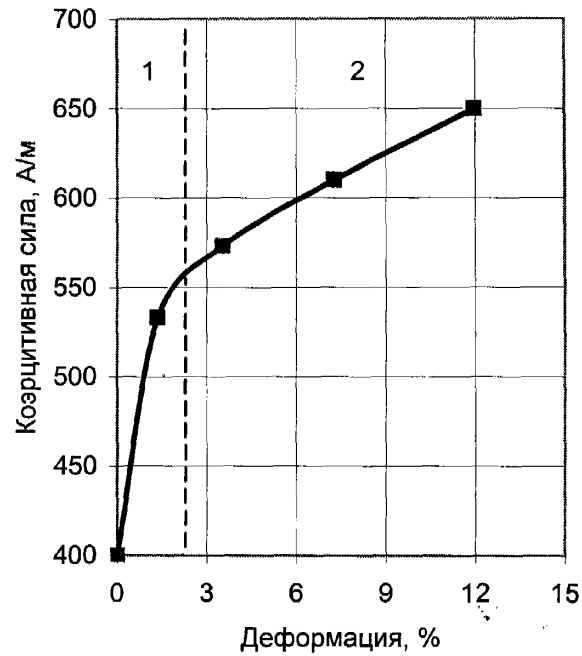


Рис. 3.13. Зависимость величины коэрцитивной силы сварного соединения, измеренной в продольном направлении в разгруженном состоянии, от остаточной пластической деформации $\epsilon_{\text{пл.ост}}$: 1, 2 – участки зависимости

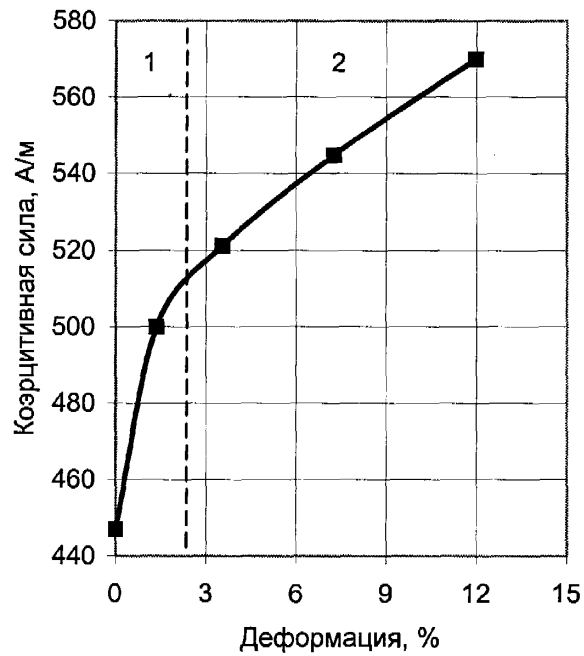


Рис. 3.14. Зависимость величины коэрцитивной силы сварного соединения, измеренной в поперечном направлении в разгруженном состоянии, от остаточной пластической деформации $\epsilon_{\text{пл.ост}}$: 1, 2 – участки зависимости

сварного соединения под углом 0° (рис. 3.13) по отношению к прикладываемой нагрузке. В целом величина коэрцитивной силы образцов после разрушения изменилась по сравнению с исходным значением на 63% при измерении под углом 0° по отношению к прикладываемой нагрузке и на 28% при измерении под углом 90° соответственно.

Анализ полученных результатов исследований показал, что величины коэрцитивных сил $H_c^{св.с.}$ и $H_c^{о.м.}$, измеренные как под углом 0° , так и под углом 90° по отношению к прикладываемой нагрузке, наиболее чувствительны к пластическим деформациям до 2%. При больших значениях пластической деформации зависимости $H_c^{св.с.}(\epsilon_{пл.ост.})$ и $H_c^{о.м.}(\epsilon_{пл.ост.})$ носят менее выраженный характер.

Следует отметить следующие особенности изменения величины коэрцитивной силы в образцах сварных соединений по сравнению с образцами основного металла. Исходное значение величины коэрцитивной силы сварного соединения, как при измерении в продольном, так и при измерении в поперечном направлении, существенно больше исходного значения величины коэрцитивной силы основного металла. Вместе с тем, если анизотропия величины коэрцитивной силы основного металла в исходном состоянии отсутствует и начинает формироваться при внесении в образец небольших остаточных пластических деформациях, то анизотропия величины коэрцитивной силы сварного соединения присутствует в образцах до нагружения, причем в продольном направлении величина коэрцитивной силы больше чем поперек.

Анизотропия определялась как:

$$\Delta H_c = H_c^{90} - H_c^0 \quad (3.1)$$

где H_c^{90} – величина коэрцитивной силы, измеренной в поперечном направлении, H_c^0 – величина коэрцитивной силы, измеренной в продольном направлении.

Зависимости анизотропии величины коэрцитивной силы образцов от остаточной пластической деформации представлены на рис. 3.15, 3.16. Видно, что в зоне малых остаточных пластических деформаций образцов анизотропии

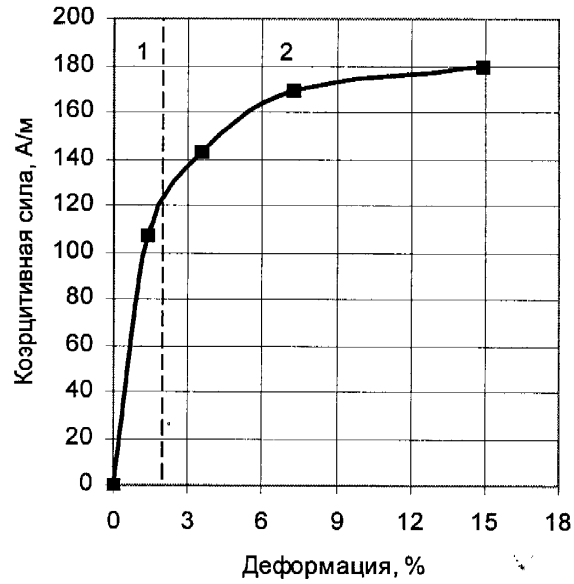


Рис. 3.15. Зависимость анизотропии величины коэрцитивной силы образцов из основного металла (сталь 10Г2С1) от остаточной деформации $\epsilon_{\text{пл.ост}}$: 1, 2 – участки зависимости

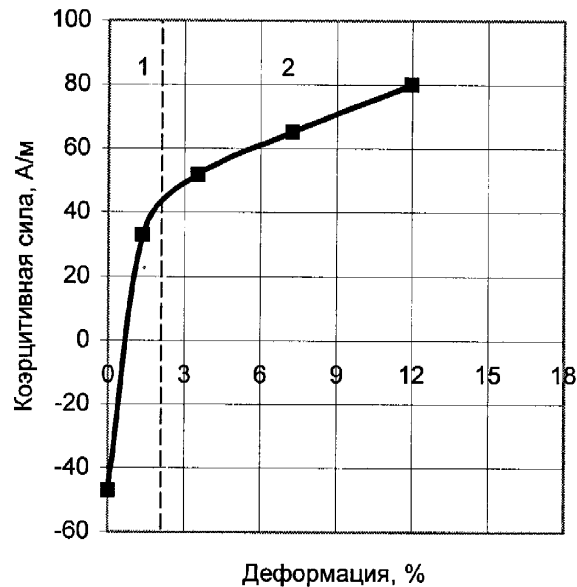


Рис. 3.16. Зависимость анизотропии величины коэрцитивной силы образцов сварных соединений от остаточной деформации $\epsilon_{\text{пл.ост}}$: 1, 2 – участки зависимости

$\Delta H_c^{св.с.}$ и $\Delta H_c^{о.м.}$ резко возрастают. При дальнейшем увеличении приложенных остаточных пластических деформаций анизотропия величины коэрцитивной силы образцов сварных соединений и основного металла увеличивается незначительно.

Таким образом, проведенные исследования подтверждают высокую чувствительность коэрцитивных сил $H_c^{св.с.}$ и $H_c^{о.м.}$ к остаточным пластическим деформациям, как эксплуатационному фактору, способствующему снижению работоспособности сварных соединений и предопределяющему целостность и безопасность сварных конструкций. Это позволяет использовать установленную связь для оценки и прогнозирования остаточного ресурса сварных соединений.

3.2. Исследование влияния циклических нагрузок на величину и характер изменения коэрцитивной силы в основном металле и сварных соединениях

В процессе эксплуатации сварные конструкции часто подвергаются воздействию переменных нагрузок: перемещающихся или перевозимых грузов, волн, ветра, грунта и т.д. [135]. Нефтегазопроводы также эксплуатируются в условиях воздействия циклических нагрузок [136 - 147]. Возникающая при этом цикличность напряжений элементов конструкции совместно со статическими нагрузками может вызвать их разрушение. Наиболее часто усталостные трещины зарождаются в зоне сварных соединений. Усталостное разрушение сварных соединений может вызываться невысокими напряжениями, составляющими только половину статической прочности и менее [135].

Изучение воздействия циклических нагрузок на характер изменения коэрцитивной силы основного металла и сварных соединений проводили на испытательном стенде (рис. 3.17), состоящем из пульсатора, самописца и устройства регистрации SONY-RZ, а также коэрцитиметра КРМ-Ц-2М с приставным магнитным устройством [148-150].

Исследования проводились на образцах, изготовленных по ГОСТ 25.502-79 из стали 10Г2С1 двух типов, – со сварным швом, и без шва. Образцы со сварным швом имели следующие размеры: ширина в рабочей части образцов составляла 60 мм, толщина - 28 мм, радиус закругления рабочей части образцов - 120 мм. Образцы без сварного шва имели следующие размеры: ширина в рабочей части образцов составляла 60 мм, толщина - 28 мм, радиус закругления рабочей части образцов - 120 мм. Сварной шов был выполнен ручной дуговой сваркой в нижнем положении электродами УОНИ 55/13 на образцах с X-образной разделкой кромок. Алгоритм исследования зависимости коэрцитивной силы основного металла и сварных соединений от циклического нагружения представлен на рис. 3.18.

Проведенные исследования состояли из двух этапов. На первом этапе

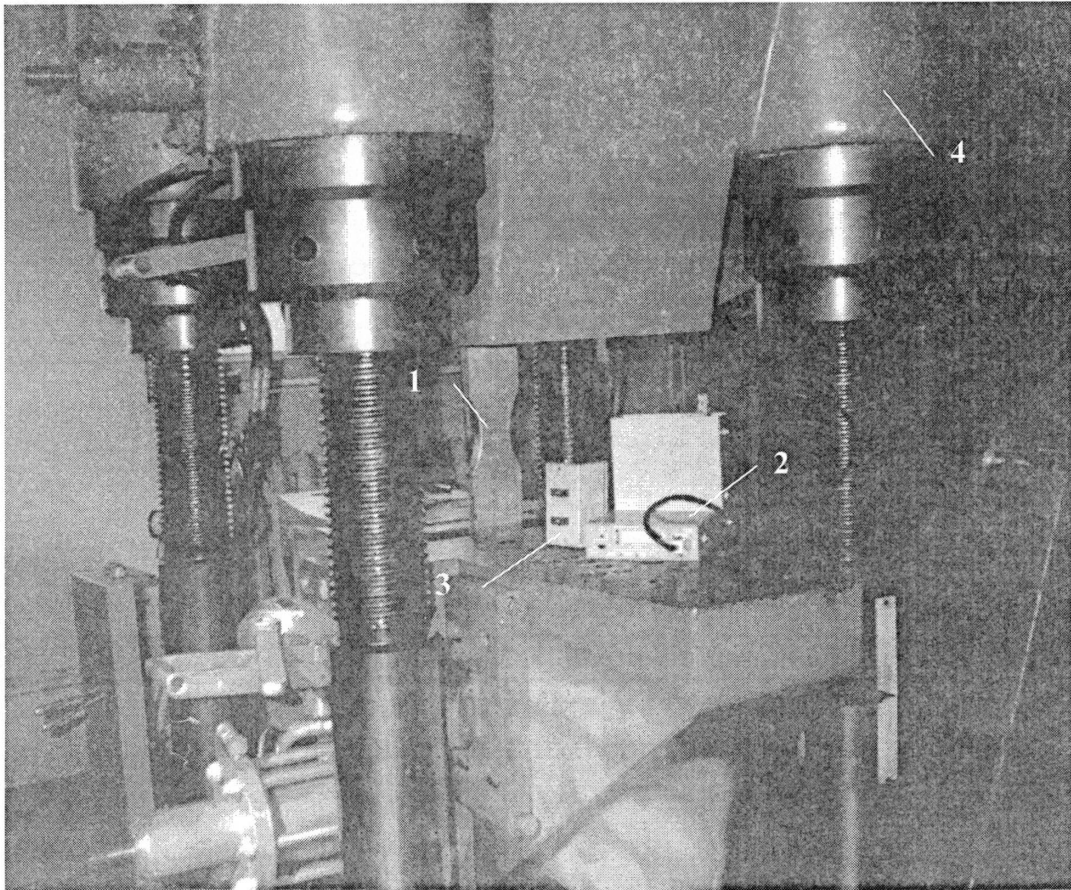


Рис. 3.17. Испытательный стенд: 1 – образец для исследования магнитных свойств основного металла и сварных соединений при испытаниях на циклическую долговечность; 2 – измерительный блок с коэрцитиметром и регистратором; 3 – приставное магнитное устройство; 4 - пульсатор

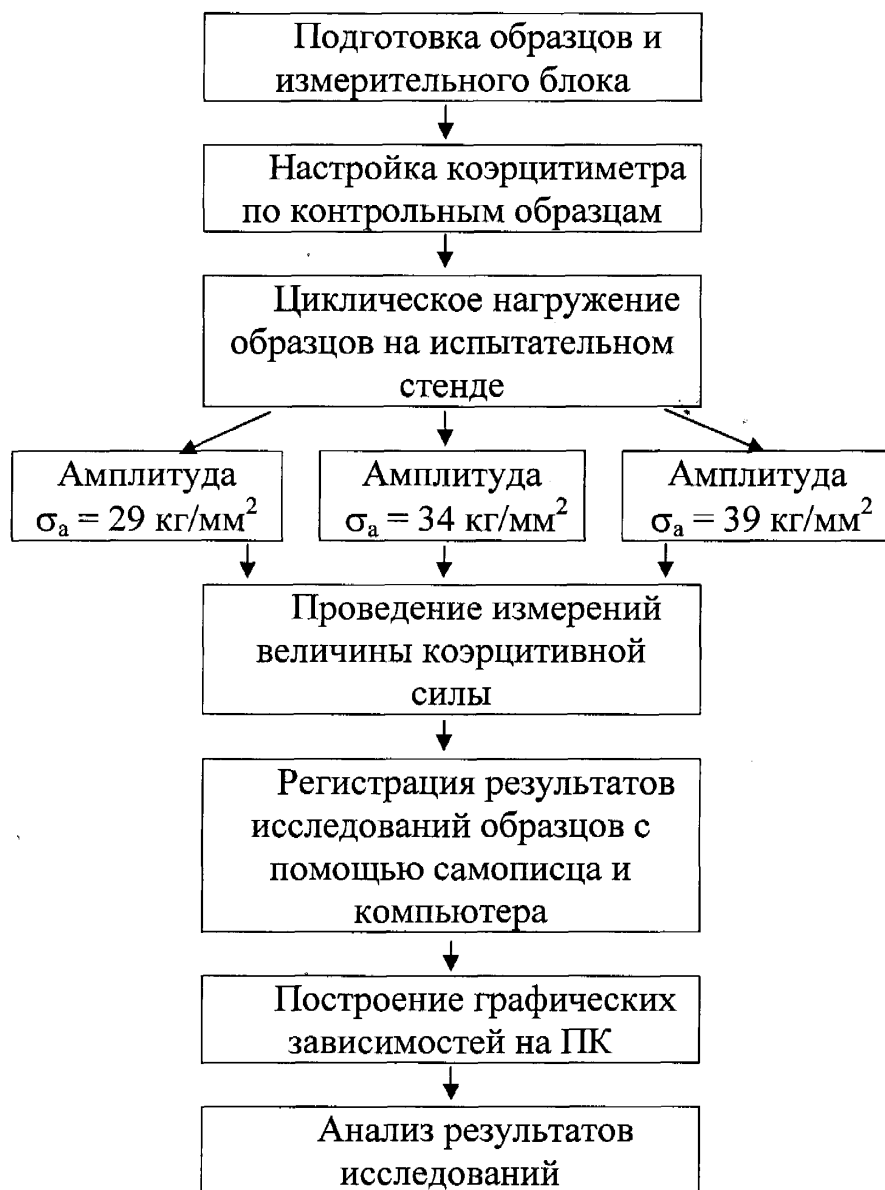


Рис. 3.18. Алгоритм исследований воздействия циклических нагрузок на характер изменения коэрцитивной силы сварных соединений на испытательном стенде.

исследовалось влияние циклического нагружения на величину коэрцитивной силы образцов основного металла (рис. 3.19).

Испытания проводили при отнулевом цикле нагружения с частотой 5 Гц в режиме много- и малоциклового усталости, имитирующем возможные режимы эксплуатации элементов сварных конструкций. Амплитуду нагружения варьировали в диапазоне 29—39 кг/мм². После каждых 5 тыс. циклов нагружения проводились измерения и регистрация данных. Измерения коэрцитивных сил $|H_c^{o.m.}|^0$ и $|H_c^{o.m.}|^{90}$ образцов проводились в продольном и поперечном направлении по отношению к оси действия нагрузки в разгруженном состоянии. Результаты измерений заносились в банк данных устройства регистрации для последующей обработки на ПК. Одновременно с помощью самописца записывали диаграмму нагружения образцов. Образцы испытывались до разрушения.

Результаты экспериментальных исследований зависимости величины коэрцитивной силы при мало- и многоциклового усталости образцов без сварного шва в зависимости от выбранных режимов нагружения представлены на рис. 3.20, 3.21. Коэффициент детерминации полученных зависимостей составил 0,96. При этом были определены характерные значения величины коэрцитивной силы основного металла, измеренные в исходном состоянии (до циклического нагружения) и после разрушения (табл. 3.3). Установленные характерные значения являются близкими к значениям, определенным при пластическом деформировании образцов.

При амплитуде нагружения ниже предела текучести ($\sigma_T = 33$ кг/мм²) и равной $\sigma_a = 29$ кг/мм² на образцах без сварного шва после 11×10^4 циклов нагружения наблюдалось возрастание величины коэрцитивной силы $|H_c^{o.m.}|^0$, измеренной под углом 0° по отношению к приложенной нагрузке, от 270 А/м до $|H_c^{o.m.}|_{разр}^0 = 630 \pm 20$ А/м, соответствующей пределу усталости основного металла - 35×10^4 циклов.

При измерении величины коэрцитивной силы под углом 90° по отношению к приложенной нагрузке после 20×10^5 циклов наблюдалось существенное возрастание величины коэрцитивной силы $|H_c^{o.m.}|^{90}$ до $|H_c^{o.m.}|_{разр}^{90} = 440 \pm 20$ А/м,

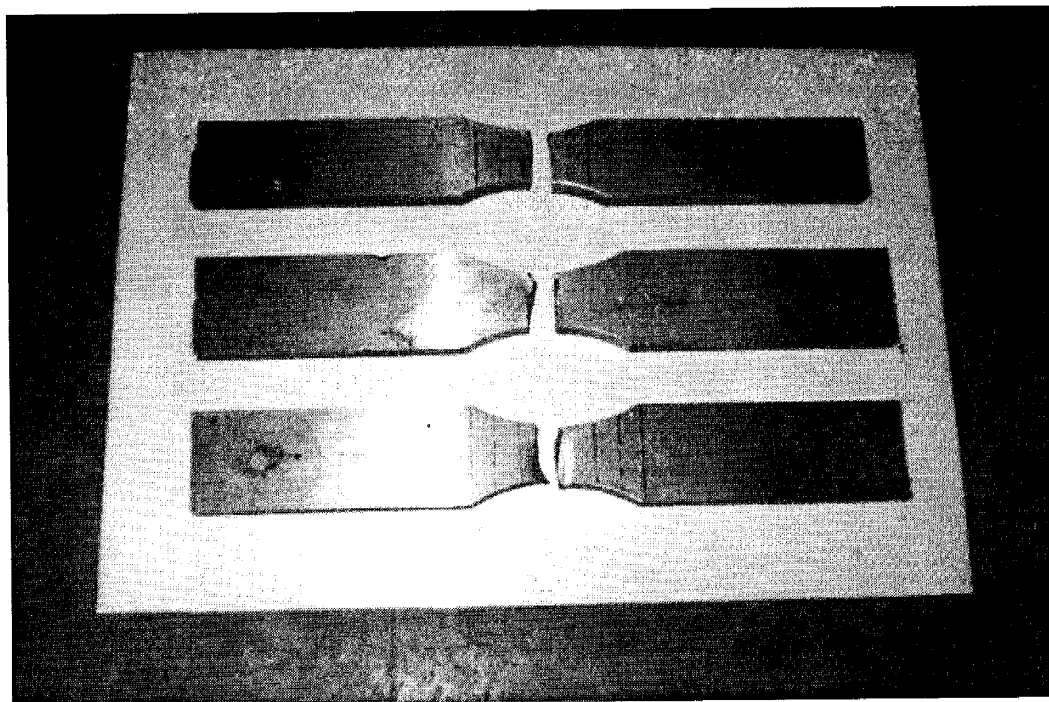


Рис. 3.19. Образцы (после испытаний) для исследования магнитных свойств основного металла при циклическом нагружении

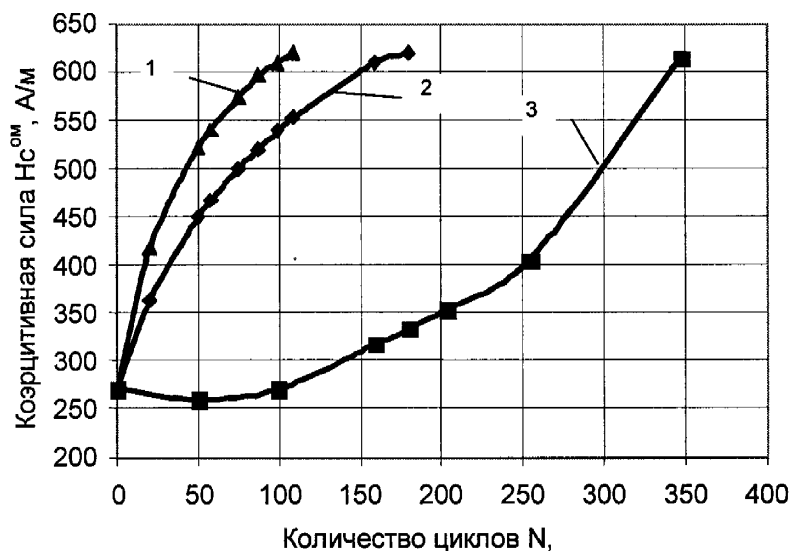


Рис. 3.20. Зависимость величины коэрцитивной силы основного металла (сталь 10Г2С1) от количества циклов и амплитуды напряжений, измеренной в продольном направлении, при циклическом нагружении: 1 - $\sigma_a = 39 \text{ кг/мм}^2$, 2 - $\sigma_a = 34 \text{ кг/мм}^2$, 3 - $\sigma_a = 29 \text{ кг/мм}^2$

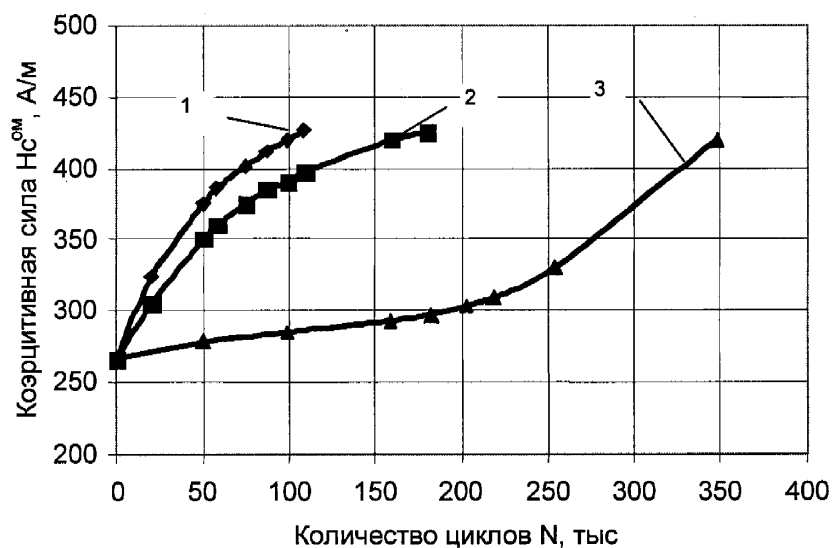


Рис. 3.21. Зависимость величины коэрцитивной силы основного металла (сталь 10Г2С1) от количества циклов и амплитуды напряжений, измеренной в поперечном направлении, при циклическом нагружении: 1 - $\sigma_a = 39 \text{ кг/мм}^2$, 2 - $\sigma_a = 34 \text{ кг/мм}^2$, 3 - $\sigma_a = 29 \text{ кг/мм}^2$

Таблица 3.3.

Характерные значения величин коэрцитивных сил сварных соединений из стали 10Г2С1 при циклическом нагружении

Объект измерения	Состояние	Угол φ , град	Характерное значение	
			Условное обозначение	Величина коэрцитивной силы, А/м
Основной металл	Разрушение	0	$ H_c^{o.m.} _{разр}^0$	630
		90	$ H_c^{o.m.} _{разр}^{90}$	440
Сварное соединение	Разрушение	0	$ H_c^{св.с.} _{разр}^0$	640

соответствующей пределу усталости.

Таким образом, видно, что коэрцитивная сила основного металла, измеренная в продольном направлении, обладает большей чувствительностью к усталостному нагружению образцов при нагрузках ниже σ_T .

При амплитуде нагружения выше предела текучести и равной $\sigma_a = 34 \text{ кг/мм}^2$ на образцах без сварного шва с первых циклов нагружения наблюдалось возрастание величины коэрцитивной силы $|H_c^{o.m.}|^0$, измеренной под углом 0° по отношению к приложенной нагрузке, от 270 А/м до $|H_c^{o.m.}|_{разр}^0 = 630 \pm 20 \text{ А/м}$, соответствующей пределу усталости равному 18×10^4 циклов.

При измерении величины коэрцитивной силы под углом 90° по отношению к приложенной нагрузке также с первых циклов нагружения начиналось возрастание величины коэрцитивной силы до $|H_c^{o.m.}|_{разр}^{90} = 440 \pm 20 \text{ А/м}$, соответствующей пределу усталости металла.

При амплитуде нагружения равной $\sigma_a = 39 \text{ кг/мм}^2$ с первых циклов нагружения образцов, но более интенсивно, чем при амплитуде нагружения равной $\sigma_a = 34 \text{ кг/мм}^2$ наблюдалось возрастание величины коэрцитивной силы $|H_c^{o.m.}|^0$, измеренной под углом 0° по отношению к приложенной нагрузке, от 270 А/м до $|H_c^{o.m.}|_{разр}^0 = 630 \pm 20 \text{ А/м}$.

При измерении величины коэрцитивной силы под углом 90° по отношению к приложенной нагрузке также наблюдалось более интенсивное возрастание величины коэрцитивной силы с увеличением количества циклов нагружения, чем при амплитуде равной $\sigma_a = 34 \text{ кг/мм}^2$. Предел усталости металла при $|H_c^{o.m.}|_{разр}^{90} = 440 \pm 20 \text{ А/м}$ составил 12×10^4 циклов.

Таким образом, наибольшая чувствительность к усталостным изменениям в основном металле наблюдается при измерении величины коэрцитивной силы под углом 0° по отношению к прикладываемой нагрузке.

На втором этапе исследований испытания проводили на сварных образцах. Амплитуду нагружения варьировали в диапазоне $29\text{—}34 \text{ кг/мм}^2$ при частоте 5 Гц . После каждых 5 тыс. циклов нагружения проводились измерения и регистрация

данных. Измерения коэрцитивной силы сварных образцов проводились в продольном направлении по отношению к оси действия нагрузки в разгруженном состоянии, так как в этом направлении коэрцитивная сила обладает большей чувствительностью к усталостному нагружению образцов, чем в поперечном направлении. Результаты измерений заносились в банк данных устройства регистрации для последующей обработки на ПК. Одновременно с помощью самописца записывали диаграмму нагружения сварных образцов. Образцы испытывались до разрушения (рис. 3.22).

Результаты экспериментальных исследований зависимости величины коэрцитивной силы сварного соединения от выбранных режимов нагружения представлены на рис. 3.23. Коэффициент детерминации полученных зависимостей составил 0,97. При этом были определены характерные значения величины коэрцитивной силы сварного соединения, измеренные в исходном состоянии (до циклического нагружения) и после разрушения (табл. 3.3). Эти значения являются близкими к значениям, определенным при пластическом деформировании образцов.

При амплитуде нагружения ниже предела текучести ($\sigma_T = 32 \text{ кг/мм}^2$) и равной $\sigma_a = 29 \text{ кг/мм}^2$ на образцах со сварным швом после 3×10^4 циклов нагружения наблюдалось возрастание величины коэрцитивной силы $|H_c^{св.с.}|^0$, измеренной под углом 0° по отношению к приложенной нагрузке, от 400 А/м до $|H_c^{св.с.}|_{разр}^0 = 640 \pm 20 \text{ А/м}$, соответствующей пределу усталости металла - $5,6 \times 10^4$ циклов.

При амплитуде нагружения выше предела текучести и равной $\sigma_a = 34 \text{ кг/мм}^2$ на сварных образцах с первых циклов нагружения наблюдалось возрастание величины коэрцитивной силы $|H_c^{св.с.}|^0$, измеренной под углом 0° по отношению к приложенной нагрузке, от 400 А/м до $|H_c^{о.м.}|_{разр}^0 = 640 \pm 20 \text{ А/м}$, соответствующей пределу усталости равному 3×10^4 циклов.

Следует отметить следующие особенности изменения величины коэрцитивной силы в образцах сварных соединений по сравнению с образцами основного металла при циклическом нагружении. Исходное значение величины

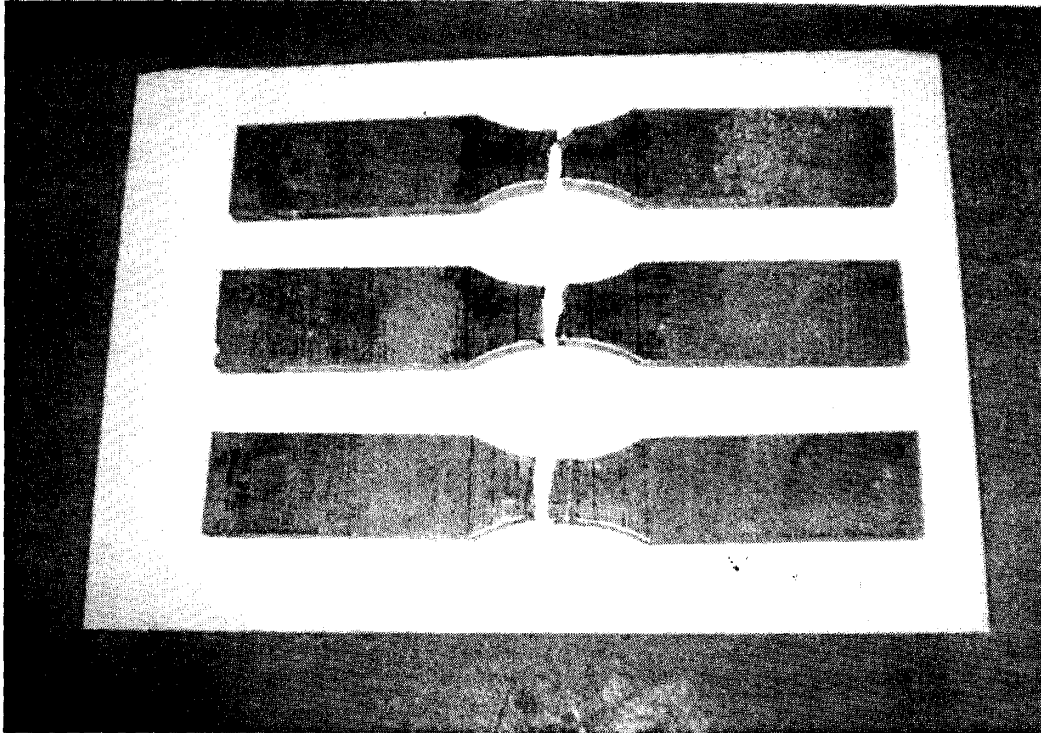


Рис. 3.22. Образцы (после испытаний) для исследования магнитных свойств сварных соединений при циклическом нагружении

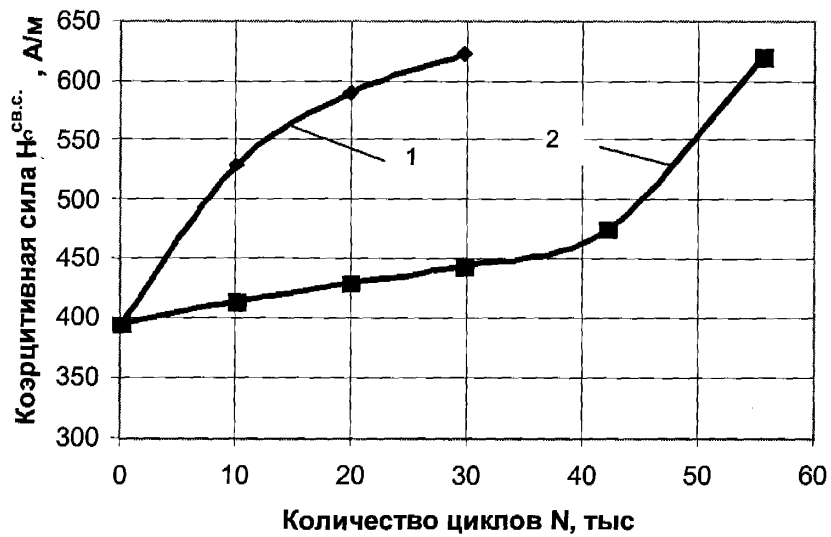


Рис. 3.23. Зависимость величины коэрцитивной силы сварного соединения от количества циклов и амплитуды напряжений, измеренной в продольном направлении, при циклическом нагружении: 1 - $\sigma_a = 34 \text{ кг/мм}^2$, 2 - $\sigma_a = 29 \text{ кг/мм}^2$

коэрцитивной силы сварного соединения существенно больше исходного значения величины коэрцитивной силы основного металла. Вместе с тем, анизотропия величины коэрцитивной силы основного металла в исходном состоянии отсутствует и начинает формироваться при увеличении количества циклов нагружения образцов. Анизотропия определялась по выражению (3.1).

Зависимость анизотропии величины коэрцитивной силы основного металла от количества циклов и амплитуды напряжений при циклическом нагружении представлена на рис. 3.24.

При амплитуде нагружения ниже предела текучести ($\sigma_T = 33 \text{ кг/мм}^2$) и равной $\sigma_a = 29 \text{ кг/мм}^2$ на образцах без сварного шва анизотропия величины коэрцитивной силы $\Delta H_c^{0.M.}$ первоначально незначительно уменьшалась, принимая отрицательное значение. После 10^5 циклов нагружения наблюдалось возрастание анизотропии величины коэрцитивной силы $\Delta H_c^{0.M.}$ от -15 А/м до $\Delta H_c^{0.M.}|_{разр} = 195 \pm 20 \text{ А/м}$, соответствующей пределу усталости основного металла - 35×10^4 циклов.

При амплитуде нагружения выше предела текучести и равной $\sigma_a = 34 \text{ кг/мм}^2$ на образцах без сварного шва с первых циклов нагружения наблюдалось возрастание анизотропии величины коэрцитивной силы $\Delta H_c^{0.M.}$ от нуля до $\Delta H_c^{0.M.}|_{разр} = 195 \pm 20 \text{ А/м}$, соответствующей пределу усталости равному 18×10^4 циклов.

При амплитуде нагружения равной $\sigma_a = 39 \text{ кг/мм}^2$ с первых циклов нагружения образцов, но более интенсивно, чем при амплитуде нагружения равной $\sigma_a = 34 \text{ кг/мм}^2$, анизотропия величины коэрцитивной силы $\Delta H_c^{0.M.}$ также увеличивалась до $\Delta H_c^{0.M.}|_{разр} = 195 \pm 20 \text{ А/м}$. Предел усталости металла при данной амплитуде нагружения составил 12×10^4 циклов.

Таким образом, с увеличением амплитуды нагружения увеличивается интенсивность возрастания величины коэрцитивных сил $H_c^{св.с.}$ и $H_c^{0.M.}$. Установленные характерные значения величины коэрцитивной силы являются близкими к значениям, определенным при изучении зависимости коэрцитивной

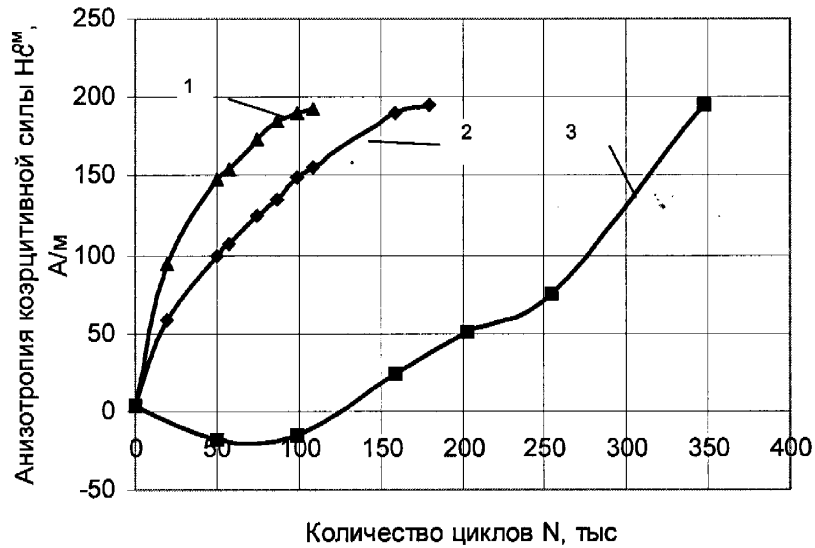


Рис. 3.24. Зависимость анизотропии величины коэрцитивной силы основного металла (сталь 10Г2С1) от количества циклов и амплитуды напряжений при циклическом нагружении: 1 - $\sigma_a = 39 \text{ кг/мм}^2$, 2 - $\sigma_a = 34 \text{ кг/мм}^2$, 3 - $\sigma_a = 29 \text{ кг/мм}^2$

силы сварных соединений и основного металла от величины остаточных пластических деформаций.

Проведенные исследования подтверждают высокую чувствительность коэрцитивных сил $H_c^{св.с.}$ и $H_c^{о.м.}$ к усталостным повреждениям, как в основном металле, так и в сварном соединении в целом, как фактору, снижающему остаточный ресурс стальных конструкций.

3.3. Исследование влияния структурных повреждений металла сварных соединений на величину коэрцитивной силы

Оценка уровня накопления остаточных пластических деформаций и усталостных повреждений (деградация материала конструкции) при циклических деформациях в настоящее время, как правило, проводится по результатам разрушающих испытаний образцов, вырезанных из реальных сварных конструкций, или модельных образцов, изготовленных по технологии аналогичной технологии изготовления исследуемой конструкции [151, 152]. Однако, вырезка образцов из реальных объектов приводит к нарушению целостности конструкции. В то же время и определение уровня накопления повреждений на модельных образцах приводит к искажению результатов из-за неизбежных различий в структуре, химическом составе и т.д. Поэтому определение уровня накопления структурных микрповреждений исследуемого объекта, не нарушая его целостности, является актуальной задачей для прогнозирования остаточного ресурса сварной конструкции.

Как было показано в разделе 3.1, с увеличением уровня остаточной пластической деформации как сварных образцов, так и образцов из основного металла наблюдается возрастание величин $H_c^{св.с.}$ и $H_c^{о.м.}$. Для определения причин изменения магнитных свойств металла были проведены электронно-микроскопические исследования сварных образцов (сталь 10Г2С1). Разрушение образцов в результате статических испытаний на прочность произошло в зоне основного металла (см. рис. 3.11). Поэтому для исследований влияния структурных повреждений металла сварных соединений на коэрцитивную силу было выбрано два участка сварных образцов — имеющих резко отличные магнитные свойства металла — в зоне разрушения и в зоне захватов.

С помощью электроэрозионной резки из металла исследуемых участков сварных образцов были изготовлены пластины толщиной 1...2 мм. Затем из полученных пластин вырезались шайбы (диаметром около 3 мм), которые шлифовались механическим способом (с помощью шлифовальных бумаг

различной зернистости). Для электронно-микроскопических исследований из полученных заготовок изготавливались фольги. Для этого в установке ПТФ (прибор приготовления тонких фольг) было проведено электролитическое утонение шайб. Электролитическое утонение проводилось в смеси уксусной ледяной кислоты и хромового ангидрида при токе 100 мА и напряжении 40 В. Последующее ионное утонение в вакууме ионизированными пучками аргона позволило получить фольги необходимой толщины для проведения электронно-микроскопических исследований [153].

Исследования тонкой структуры (субструктуры) исследуемых участков сварных образцов на просвет проводилось на приборе JEM-200 CX (фирмы JEOL, Япония) при ускоряющем напряжении 200 кВ. Результаты исследований представлены в табл. 3.4.

В ходе исследований недеформированных участков сварных образцов (в зоне захватов) было установлено, что в ферритных зернах наблюдается низкая плотность дислокаций ($\rho \sim 2 \dots 3 \times 10^8 \text{ см}^{-2}$) (рис. 3.32). Распределение дислокаций носит сравнительно равномерный характер, рис. 3.25 а, б, в.

Измерение плотности дислокаций ρ проводилось методом секущей – метод Хэма [154]. Секущие линии образовывали прямоугольную сетку. Расчет ρ проводился по микрофотографиям с увеличением не ниже 30000 раз.

Поле внутренних сдвиговых напряжений, создаваемое дислокационной структурой (плотностью дислокаций), определялось по формуле [155]:

$$\tau^{\text{вн}} = Gbh\rho/\pi(1 - \nu), \quad (3.2)$$

где G – модуль сдвига (для сталей феррито-перлитного класса $G=84 \times 10^3$ МПа); b – вектор Бюргерса ($b=2,5 \times 10^{-8}$ см [157]); h – толщина фольги (2×10^{-5} см); ν – коэффициент Пуассона ($\nu=0,28$); ρ – плотность дислокаций.

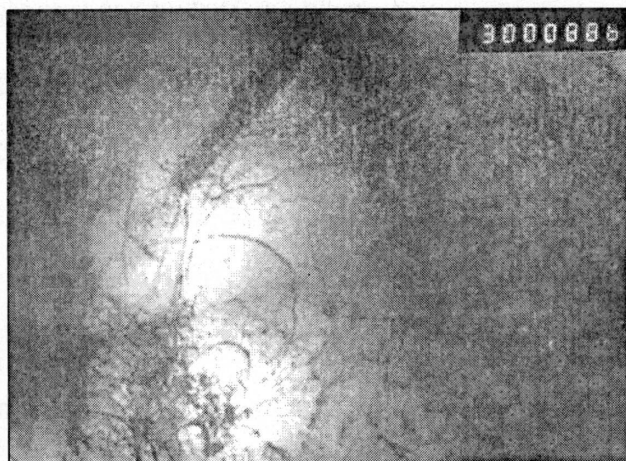
Величина внутренних напряжений в ферритных зернах недеформированных участков сварных образцов составила $\tau^{\text{вн}} \sim G/2,26 \times 10^4 \dots G/1,5 \times 10^4$ (3,7...5,6 МПа), рис. 3.34.

Структура межзеренных границ (феррит-феррит) в ферритной

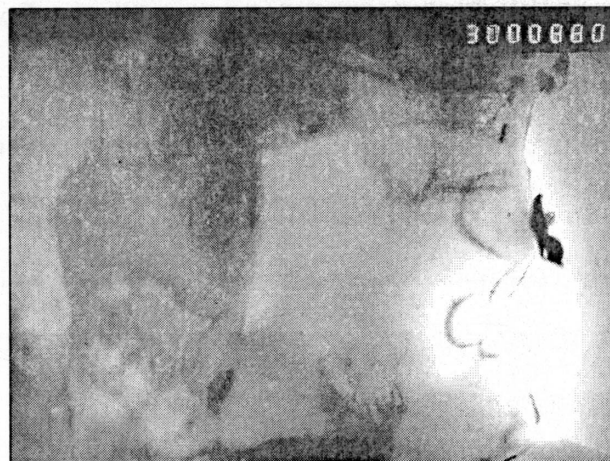
Таблица 3.4.

Параметры микроструктуры стали 10Г2С1 до и после деформации сварных образцов

Структура металла	До деформации			После деформации		
	Плотность дислокаций $\rho, \text{см}^{-2}$	Напряжение τ , МПа		Плотность дислокаций $\rho, \text{см}^{-2}$	Напряжение τ , МПа	
		однородное	скопление		однородное	скопление
Феррит	$\rho \sim 2 \dots 3 \times 10^8$		$G/2,26 \times 10^4 \dots G/1,5 \times 10^4$	$\rho \sim 6 \dots 8 \times 10^8$		$G/7,5 \times 10^3 \dots G/1,7 \times 10^4$
				$\rho \sim 10^8$		$G/4,5 \times 10^4$
Перлит	$\rho \sim 7 \times 10^8$		$G/6,7 \times 10^3$		$\rho \sim 10^9$	$G/4,5 \times 10^3$
					$\rho \sim 8 \dots 9 \times 10^{10}$	$G/5,6 \times 10 \dots G/5,2 \times 10$
Межзренные границы	Ф-П	Ф-П дисперсный			$\rho \sim 8 \times 10^9 \dots 10^{10}$	$G/5,6 \times 10^2 \dots G/4,5 \times 10^2$
		Ф-П крупно кристаллический			$\rho \sim 5 \times 10^{10} \dots 10^{11}$	$G/9 \dots G/11$
		Ф-Ф	$\rho \sim 10^{10}$		$\rho \sim 10^{11}$ и более	$G/10$
		$\rho \sim 6 \times 10^8$	$G/7,5 \times 10^3$		$\rho \sim 5 \dots 8 \times 10^9$	$G/9 \times 10^2 \dots G/5,6 \times 10^2$



а ×30000



б ×30000



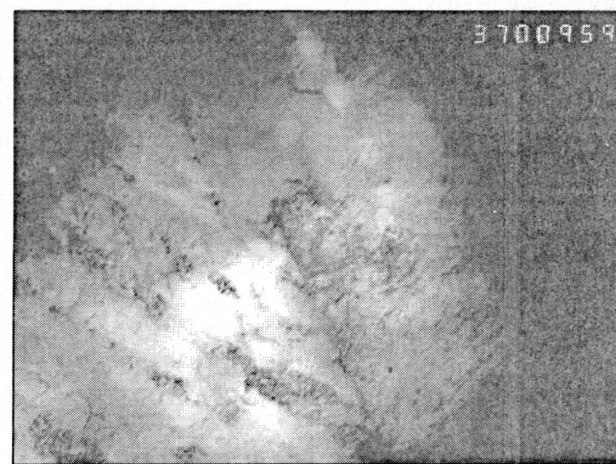
в ×37000



г ×37000



д ×30000



е ×37000

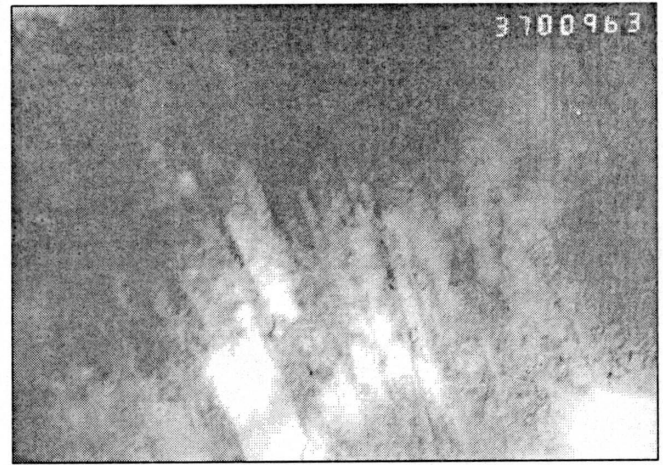
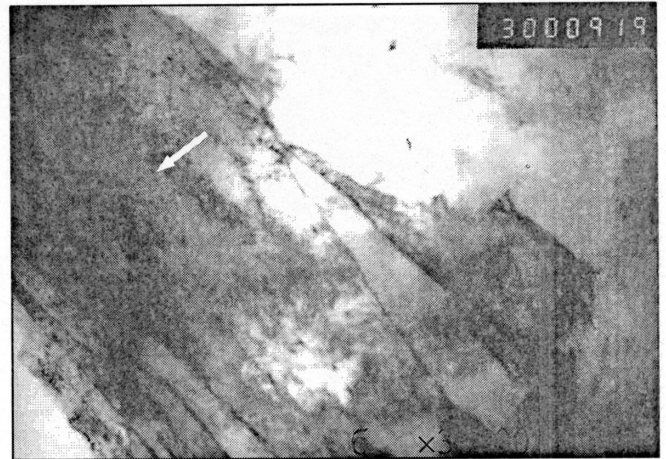
Рис. 3.25. Тонкая структура феррита основного металла образца в недеформированном состоянии

составляющей недеформированных участков образцов носит равновесный характер, что характеризуется невысокой плотностью дислокаций вдоль межферритных границ ($\rho \sim 6 \times 10^8 \text{ см}^{-2}$), рис. 3.25 г, д, е. Вместе с тем указанным межзеренным границам также характерна и более крупнозернистая субзеренная структура, рис. 3.25 б.

В области перлитных зерен (а именно – в межцементитных ферритных прослойках) наблюдается также практически однородное распределение плотности дислокаций ($\rho \sim 7 \times 10^8 \text{ см}^{-2}$) без значительных локальных скоплений, рис. 3.26, 3.27. Величина внутренних напряжений составила $\tau^{\text{вн}} \sim G/6,7 \times 10^3$ (12,5 МПа). Некоторые локальные скопления с плотностью дислокаций $\rho \sim 10^{10} \text{ см}^{-2}$ (отмечены стрелками на рис. 3.26 а, б и 3.27 г) наблюдаются в зоне контакта крупнопластинчатого цементита, что свидетельствует о формировании в зонах подобного типа «всплеска» остаточных напряжений $\tau_{\text{ост}}$ порядка $G/4,5 \times 10^2$ (186 МПа) по межзеренным границам в области формирования крупнозернистого цементита (перлитного), рис. 3.33, рис. 3.35. Величина коэрцитивной силы в исследуемой зоне, как было показано в параграфе 3.1, составляет 266 А/м в продольном направлении и 270 А/м в поперечном.

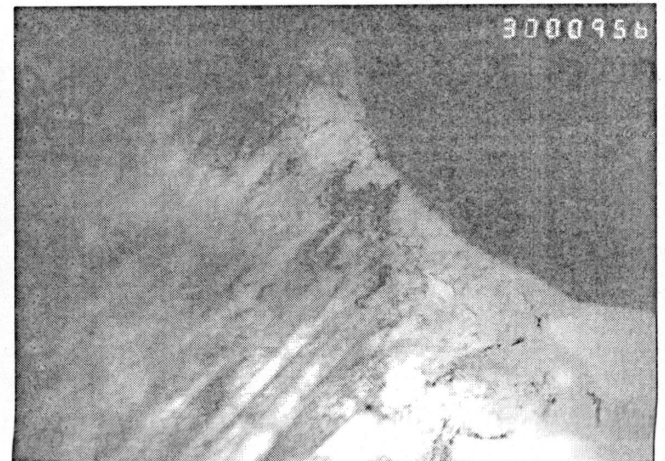
При достижении критического уровня накопления повреждений (разрушение образцов) величина коэрцитивной силы в зоне разрушения сварных образцов увеличилась в 2,4 раза в продольном направлении и в 1,7 раза в поперечном по сравнению с величиной коэрцитивной силы на участке неподверженном деформации.

В свою очередь электронно-микроскопические исследования показали, что в зоне разрушения сварных образцов для ферритных зерен характерна неравномерность в распределении плотности дефектов кристаллической решетки. В некоторых зернах распределение дислокаций сравнительно однородно при невысокой их плотности ($\rho \sim 6 \dots 8 \times 10^8 \text{ см}^{-2}$) и внутренними напряжениями $\tau^{\text{вн}} \sim G/7,5 \times 10^3 \dots G/1,7 \times 10^4$ (11,2 ... 4,9 МПа), рис. 3.28 а, рис. 3.32, рис. 3.34. В других областях наблюдаются локальные скопления дислокаций (рис. 3.28 б), а в некоторых случаях — фрагментация ферритных зерен, что подтверждается



в ×30000

г ×37000



д ×30000

е ×30000

Рис. 3.26. Тонкая структура основного металла в недеформированном состоянии:
а, б, в - межзеренных границ и г, д, е - перлитных зерен



а ×50000



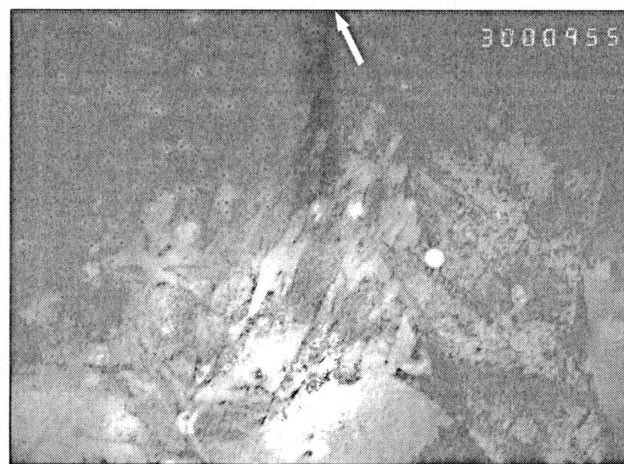
б ×37000



в ×20000



г ×20000



д ×30000
граница

Рис. 3.27. Дислокационные скопления в зоне контакта феррита с цементитом (а - г) и в области межзеренных границ (д) основного металла в недеформированном состоянии

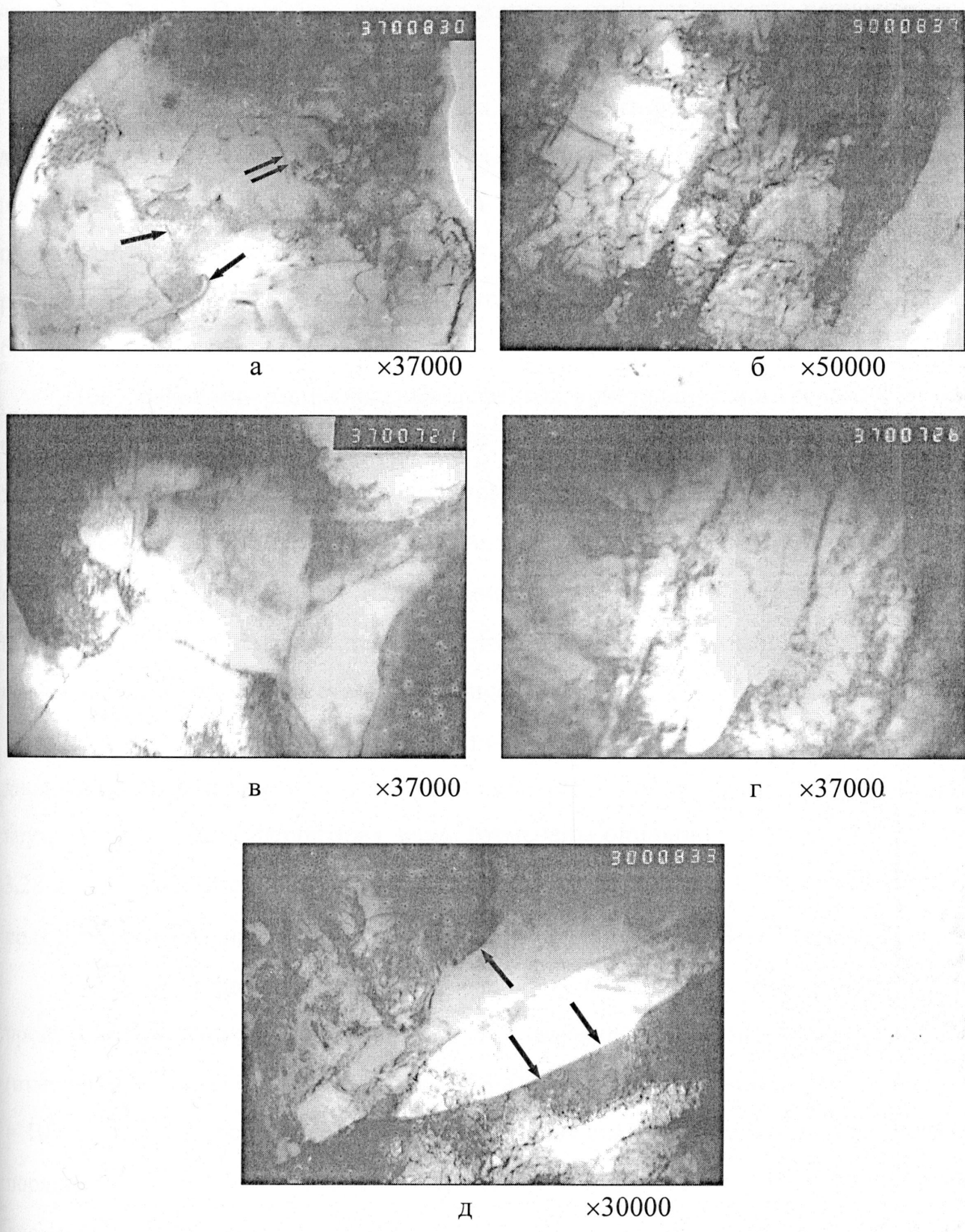


Рис. 3.28 Дислокационная структура в ферритных зернах после деформации

образованием субграниц с высоким углом разориентировки (рис. 3.28 б, в, г), а также границ «ножевого» типа в объемах ферритных зерен (отмечены стрелками на рис. 3.28 д). Последнее свидетельствует о неоднородности распределения деформации в зернах феррита.

На межзеренных границах феррит-феррит; феррит-перлит деформированного металла наблюдается, как правило, более резкое повышение плотности дислокаций (по сравнению с внутризеренными распределениями плотности дислокаций в феррите) и более резкая неоднородность в их распределении (рис. 3.29). Плотность дислокаций достигает от 10^{10} до 10^{11} см^{-2} и более.

При сравнении распределения дефектов кристаллической решетки в зоне формирования грубо- (рис. 3.30, 3.29 е) и тонкопластинчатого перлитного цементита (рис. 3.31) наибольшая неравномерность и плотность дислокаций наблюдается в случае грубопластинчатого перлитного цементита ($\rho = 8...9 \times 10^{10}$ см^{-2}). Величина внутренних напряжений составила $\tau^{\text{вн}} \sim G/5,6 \times 10...G/5,2 \times 10$ (1500...1615 МПа). Вместе с тем градиенты плотности дислокаций границ между ферритными зернами существенно меньше (рис. 3.29 г, д).

Оценки распределения внутренних напряжений по значениям дислокационной плотности в исследуемом материале показали следующее. Во внутренних объемах ферритных зерен (отмечены одинарными стрелками на рис. 3.28 а,) при равномерной плотности дислокаций равной $\rho \cong 10^8$ см^{-2} , создаваемое поле внутренних напряжений даёт величину $\tau^{\text{вн}} \sim G/4,5 \times 10^4$ (1,9 МПа).

На фоне однородного распределения дислокаций в ферритных зернах происходит формирование локальных зон с повышенной плотностью дислокаций (отмечены двойной стрелкой на рис. 3.28 а), а также скоплений дислокаций (до $\rho = 10^9$ см^{-2}), что способствует повышению локальных внутренних напряжений на порядок, т.е. до величины $\tau^{\text{вн}} \sim G/4,5 \times 10^3$ (18,7 МПа). При этом плотных дислокационных скоплений больше, чем зон с равномерным распределением дислокаций.

В межзеренных границах феррит-феррит (отмечены стрелками на рис. 3.28



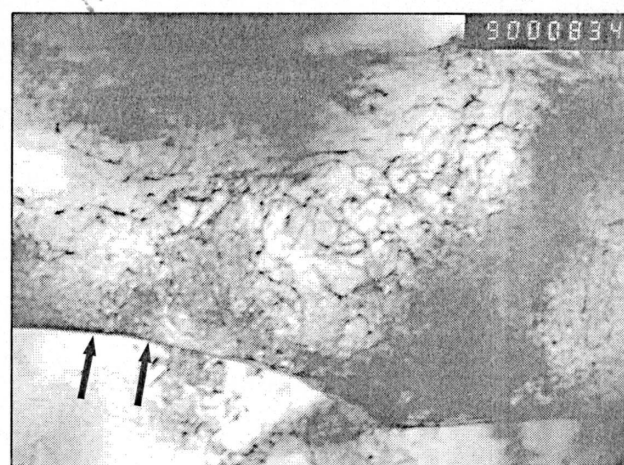
а ×37000



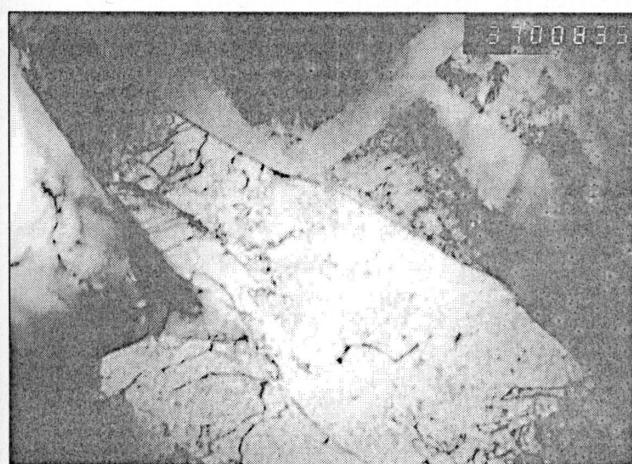
б ×20000



в ×30000



г ×50000



д ×37000



е ×30000

Рис. 3.29. Тонкая структура вдоль межзеренных границ: а - г (феррит/феррит); д - е (феррит/перлит)

г) скопления дислокаций крайне неоднородны. Их плотность составляет порядка $5...8 \times 10^9 \text{ см}^{-2}$. Уровень напряжений в таких зонах - $G/9 \times 10^2 ... G/5,6 \times 10^2$ (93,3...150 МПа).

В участках контакта ферритных прослоек в перлитных зернах (при наличии мелкодисперсного цементита, рис. 3.31 д) плотность дислокаций $\rho = 8 \times 10^9 ... 10^{10} \text{ см}^{-2}$, а величина $\tau^{вн} \sim G/5,6 \times 10^2 ... G/4,5 \times 10^2$ (150...186,6 МПа) не превышает теоретическую прочность $\tau_{теор} = G/10$ [156].

Вдоль межзеренных феррито-перлитных границ (рис. 3.29 д) и крупнопластинчатого перлита (рис. 3.30 в) наблюдается наиболее неравномерное распределение дислокаций, ρ составляет порядка $5 \times 10^{10} ... 10^{11} \text{ см}^{-2}$ и более. Уровень внутренних напряжений в этих участках может достигать от $G/11$ до $G/9$, что сравнимо со значением теоретической прочности материала и объясняет факт образования макротрещин в этой области, а также последующее разрушение сварных образцов. Максимальный уровень по плотности дислокаций (значение ρ более чем 10^{11} см^{-2}) и значениям внутренних напряжений (близким к критическим, т.е. $\sim G/10$) наблюдается преимущественно вдоль массивных и протяженных цементитных образований (рис. 3.30 в, 3.33, 3.35).

На основе результатов исследований получены корреляционные зависимости между величиной коэрцитивной силы и плотностью дислокаций, а также величиной коэрцитивной силы и внутренними напряжениями.

Для однородного феррита металла сварного образца:

$$H_c = A_1 \rho + B_1 \quad (3.3)$$

$$H_c = C_1 \tau_{вн} + D_1 \quad (3.4)$$

где A_1, B_1, C_1, D_1 – коэффициенты, значения которых представлены в табл.

3.5.

Для крупнопластинчатого феррито-перлита металла сварного образца:

$$H_c = A_2 \rho + B_2 \quad (3.5)$$

$$H_c = C_2 \tau_{вн} + D_2 \quad (3.6)$$

где A_2, B_2, C_2, D_2 – коэффициенты, значения которых представлены в табл.

3.6.



а ×37000



б ×30000

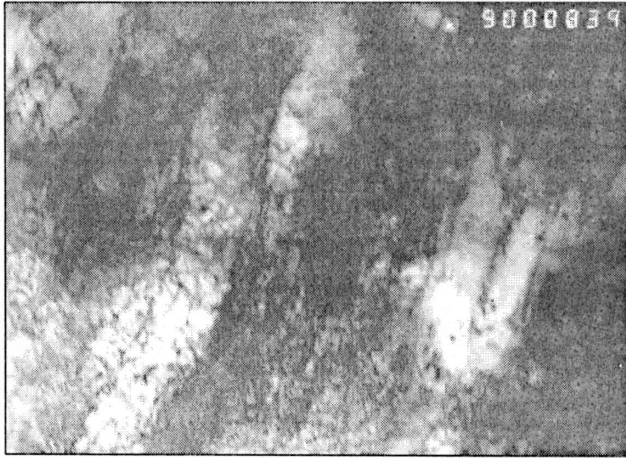


в ×50000

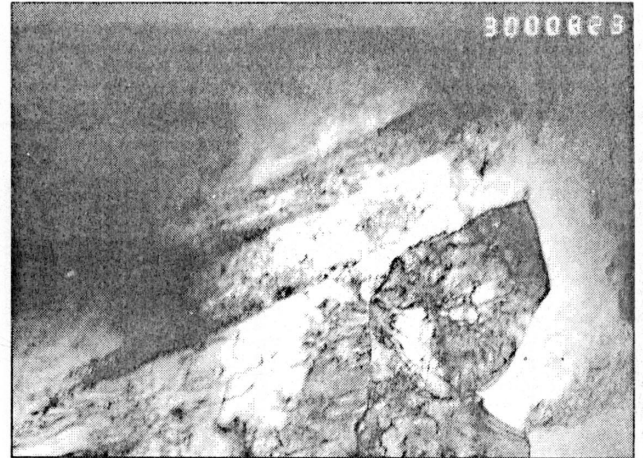


г ×37000

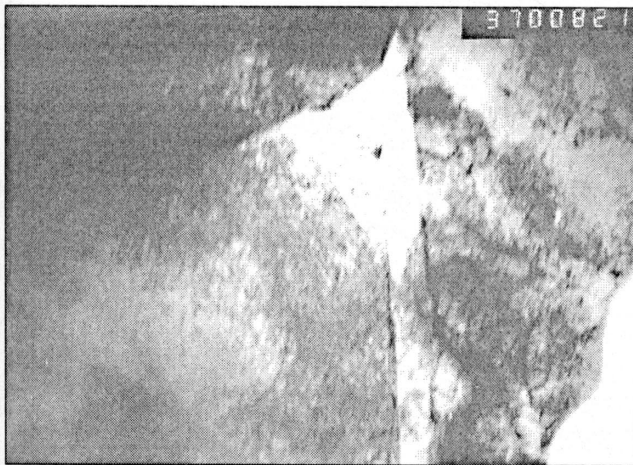
Рис. 3.30. Дислокационная структура в зоне выделения грубопластинчатого цементита



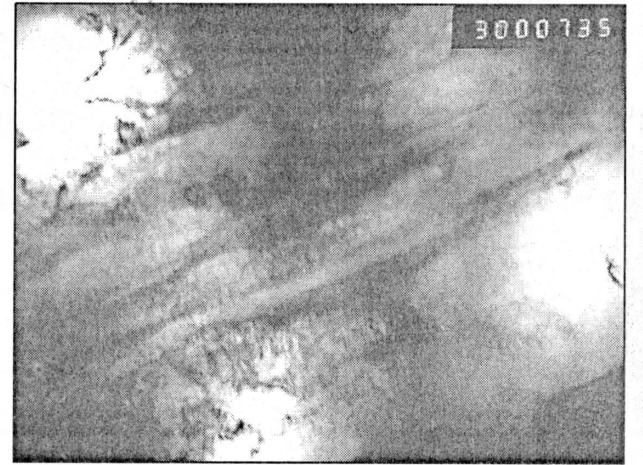
а ×50000



б ×30000



в ×37000



г ×30000



д ×37000



е ×37000

Рис. 3.31. Дислокационная структура в зоне выделения тонкопластинчатого перлита

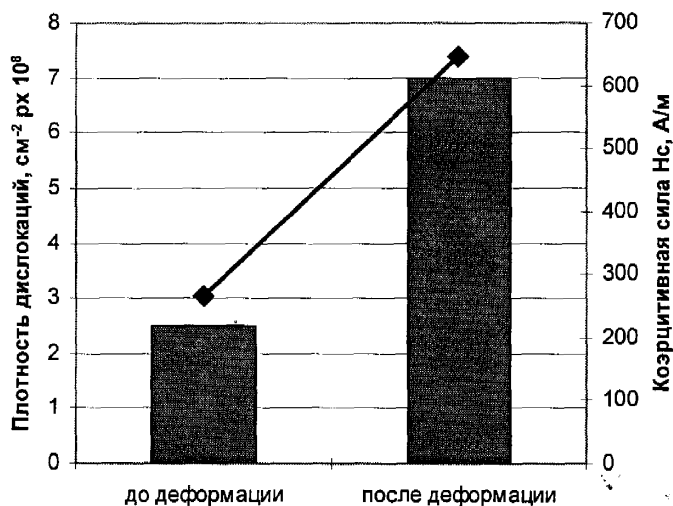


Рис. 3.32. Влияние деформации на плотность дислокаций однородного феррита металла сварного образца: ■ - плотность дислокаций, ◆ - коэрцитивная сила

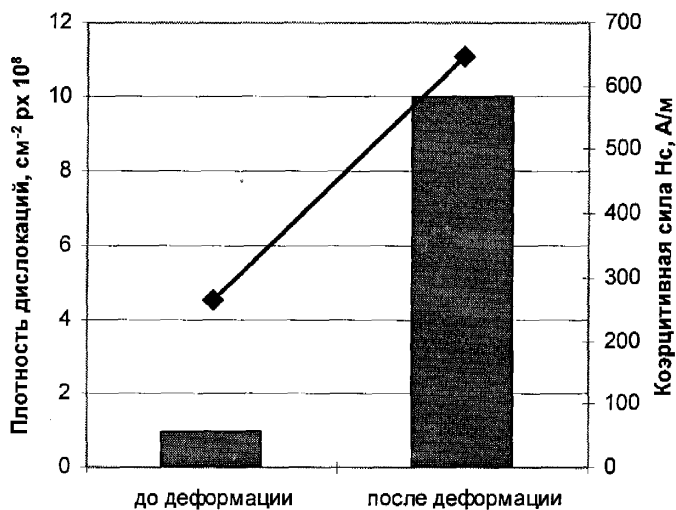


Рис. 3.33. Влияние деформации на плотность дислокаций в крупнопластинчатом феррито-перлите металла сварного образца: ■ - плотность дислокаций, ◆ - коэрцитивная сила

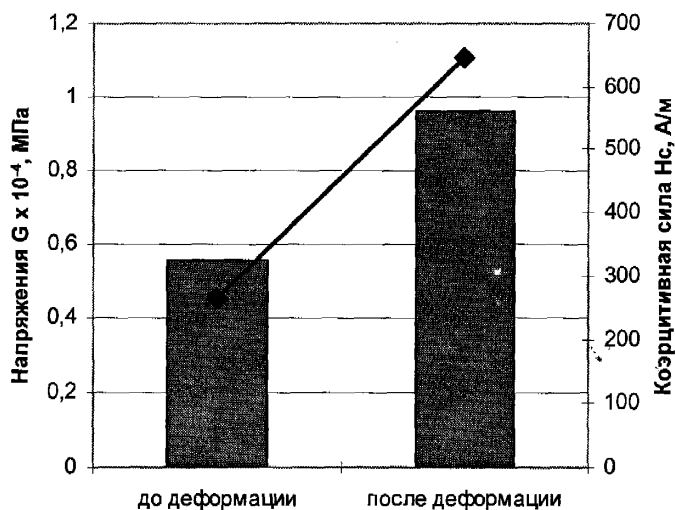


Рис. 3.34. Влияние деформации на внутренние напряжения $\tau_{вн}$ однородного феррита металла сварного образца: ■ - плотность дислокаций, ◆ - коэрцитивная сила

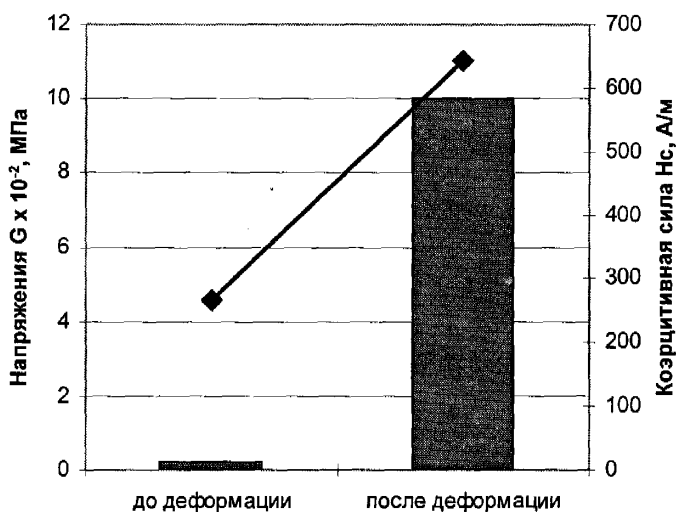


Рис. 3.35. Влияние деформации на внутренние напряжения $\tau_{вн}$ в крупнопластинчатом феррито-перлите металла сварного образца: ■ - плотность дислокаций, ◆ - коэрцитивная сила

Таблица 3.5.

Коэффициенты корреляционных зависимостей между величиной коэрцитивной силы и плотностью дислокаций, а также величиной коэрцитивной силы и внутренними напряжениями для однородного феррита образца

Макроструктура	Коэффициенты			
	$A_1 \times 10^{-4}$, А×м	$B_1 \times 10^{-4}$, А/м	$C_1 \times 10^{-2}$, А×м/Н	$D_1 \times 10^{-4}$, А/м
Феррит (однородный)	84,2	55,4	933,1	38,8

Таблица 3.6.

Коэффициенты корреляционных зависимостей между величиной коэрцитивной силы и плотностью дислокаций, а также величиной коэрцитивной силы и внутренними напряжениями для крупнопластинчатого феррито-перлита

Макроструктура	Коэффициенты			
	$A_2 \times 10^{-4}$, А×м	$B_2 \times 10^{-4}$, А/м	$C_2 \times 10^{-2}$, А×м/Н	$D_2 \times 10^{-4}$, А/м
Феррито-Перлит (крупно- пластинчатый)	42,1	223,8	251,5	257,4

Таким образом, на основе результатов проведенных исследований установлено, что с увеличением, как плотности дислокаций, так и внутренних напряжений в испытуемых образцах сварного соединения, происходит возрастание величины коэрцитивной силы. Это объясняет механизм изменения магнитных свойств металла при эксплуатации сварных конструкций и обосновывает возможность применения магнитного параметра – коэрцитивной силы для оценки технического состояния сварных соединений и прогнозирования их остаточного ресурса.

3.4. Исследование влияния двухосного напряженного состояния образцов конструкции на величину коэрцитивных сил в сварном соединении

Для объективной оценки остаточного ресурса стальных конструкций необходимо детальное изучение поведения различных зон сварных соединений применительно к реальным условиям эксплуатации часто сложным и в течение длительного периода, особенно в местах концентрации напряжений и деформаций. Поэтому распространение способа выявления локальных особенностей распределения коэрцитивной силы в сварном соединении на плоское напряженное состояние имеет большое практическое значение при эксплуатации сварных конструкций.

Исследования влияния двухосного нагружения на величину коэрцитивной силы проводилось на стенде (рис. 3.36), состоящем из гидравлического насоса высокого давления, регистратора данных SONY-RZ, а также коэрцитиметра КРМ-Ц-2М с приставным магнитным устройством. Блок-схема разработанного стенда представлена на рис. 3.37.

Для проведения исследований были изготовлены обечайки из стали 20 с кольцевым сварным швом диаметром 160 мм и толщиной стенки 7 мм (рис.3.38). Кольцевой стыковой многопроходный шов был выполнен ручной дуговой сваркой покрытыми электродами ТМУ-21 диаметром 3,0 мм (ГОСТ 9466-75 и ГОСТ 9467-75).

Алгоритм выполненных исследований представлен на рис. 3.39. Для позиционирования датчика в соответствии с разработанным способом определения величины коэрцитивной силы в локальных зонах сварного соединения, на основе предложенных зависимостей, предварительно на обечайки наносилась координатная сетка по образующим и кольцевым сечениям. Точки пересечения линий сетки были местом измерений параметров магнитным коэрцитиметрическим методом (рис. 3.38).

Для обеспечения возможности нагружения сварной обечайки внутренним давлением к двум торцевым участкам приваривались плоские заглушки. К одной

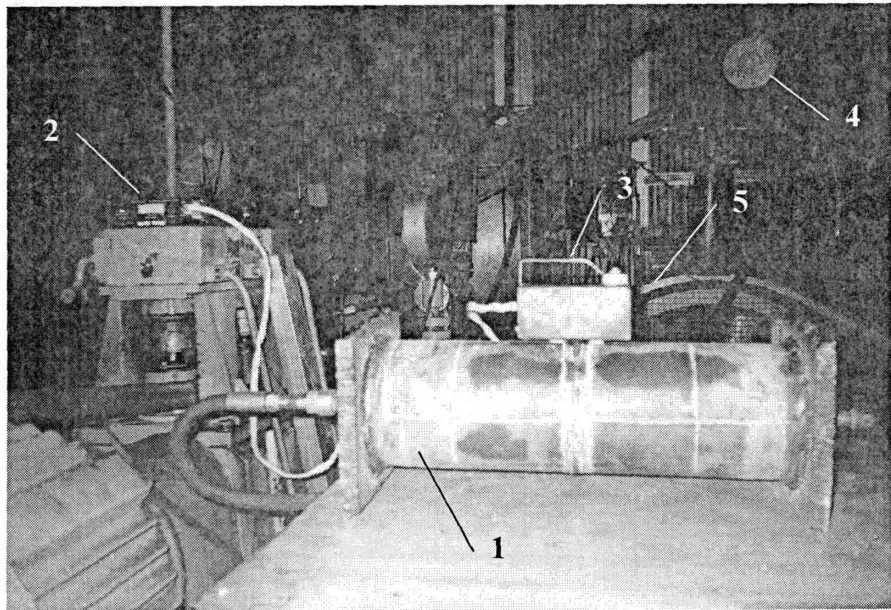


Рис. 3.36. Испытательный стенд: 1 - испытываемая под давлением обечайка с кольцевым швом, 2 - измерительный блок с коэрцитиметром и регистратором, 3 - приставное магнитное устройство, 4 - измерительный манометр, 5 - насос высокого давления

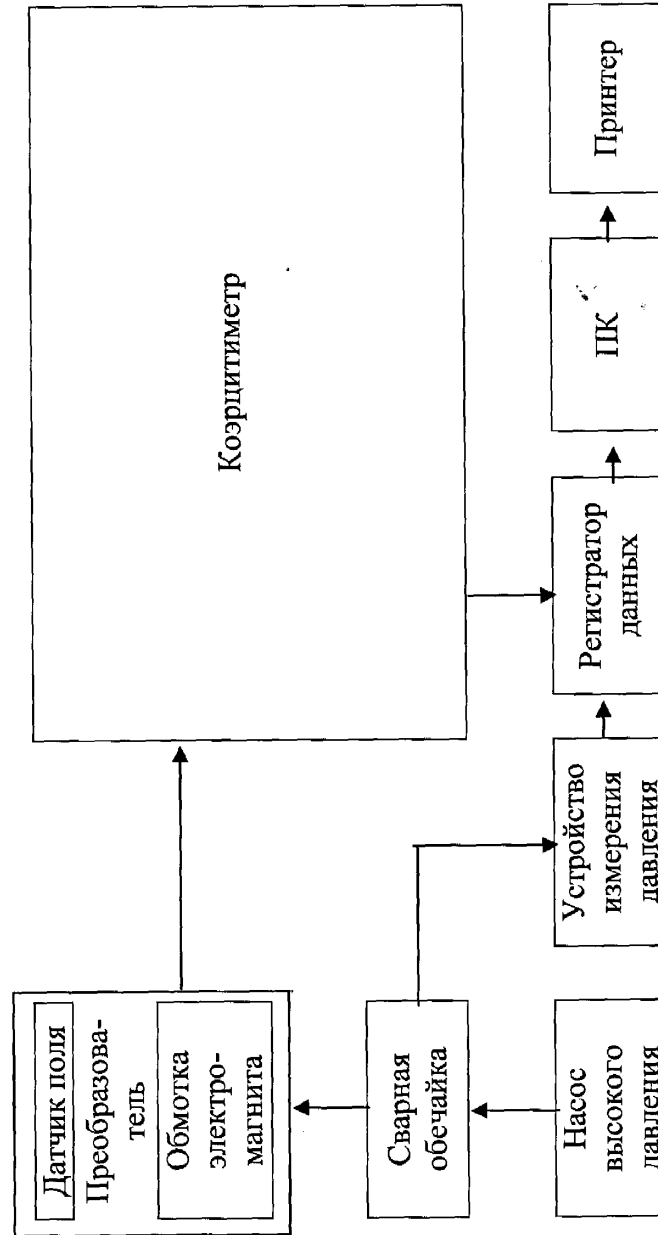


Рис. 3.37. Блок-схема испытательного стенда для исследования влияния двухосного нагружения на характер изменения величин коэрцитивных сил сварных соединений конструкции

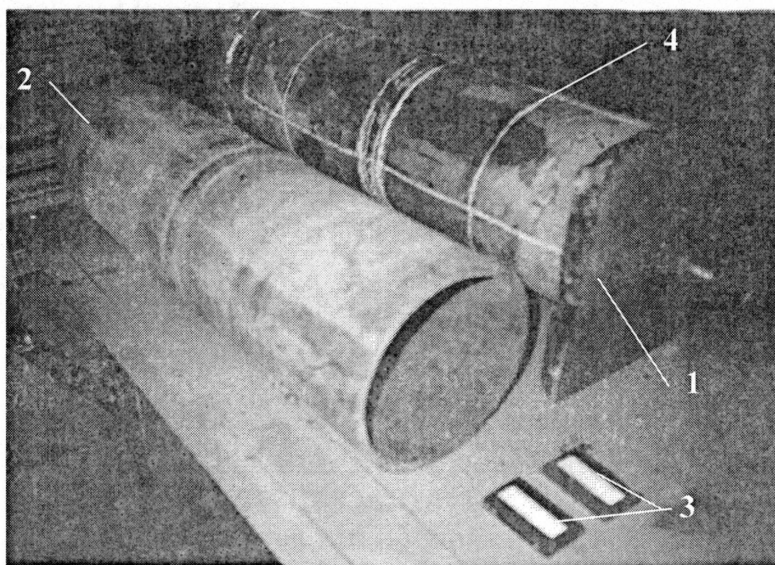


Рис. 3.38. Обечайки с кольцевым швом: 1 – испытываемая под давлением обечайка с кольцевым швом, 2 – обечайка с кольцевым швом (без заглушек), 3 – контрольные образцы для настройки коэрцитиметра 4 – нанесенная координатная сетка

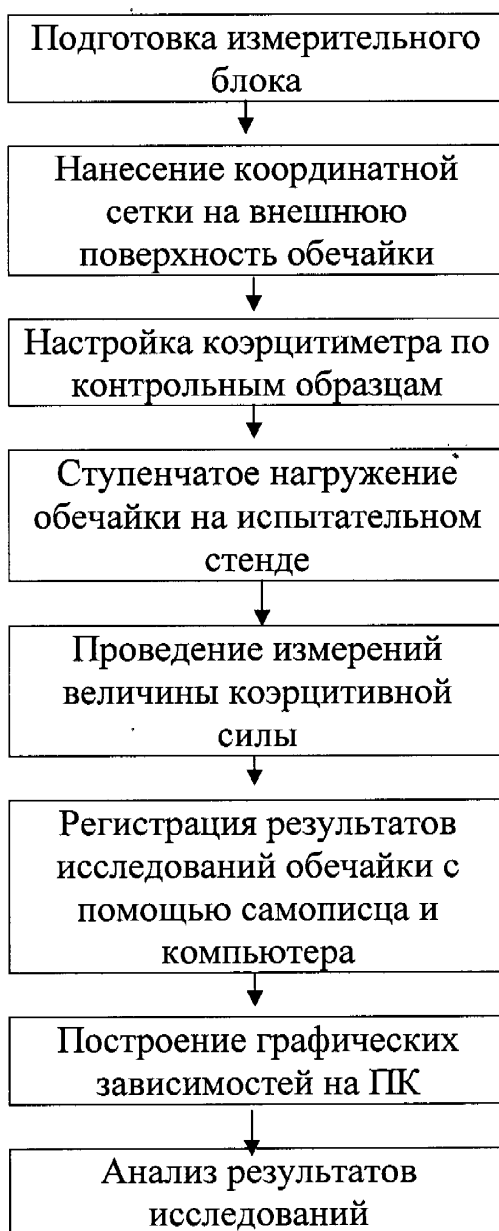


Рис. 3.39. Алгоритм исследований сварных обечаек магнитным коэрцитиметрическим методом на испытательном стенде

из них был приварен штуцер для соединения с гидравлической системой насоса высокого давления.

В процессе испытаний сварные обечайки нагружали давлением ступенчато до разрушения. При поэтапном нагружении образцов после каждого увеличения давления до заданного уровня производили полную разгрузку образцов. Через каждые 50-100 атм. в узлах сетки в направлении перпендикулярном сварному шву производилась регистрация результатов измерения величины коэрцитивной силы. Результаты измерений заносились в банк данных устройства регистрации.

В процессе испытаний было определено:

1. Исходные (до нагружения) значения величины коэрцитивной силы в направлении перпендикулярном сварному шву в позициях измерения, указанных на рис. 2.4 и в направлении параллельном сварному шву в ЗТВ и зоне основного металла (рис. 3.40).
2. Значения величины коэрцитивной силы при напряжении равном пределу текучести σ_T в тех же позициях измерения.
3. Значения величины коэрцитивной силы при напряжении близком к пределу прочности σ_B в тех же позициях измерения.

Установленные зависимости величин коэрцитивных сил $H_c^{св.с.}$ и $H_c^{ЗТВ+О.М.}$ от величины внутреннего давления $P_{вн}$, представлены на рис. 3.41 и 3.42. Коэффициент детерминации полученных зависимостей составил 0,96.

Анализ полученных результатов исследований показал, что при нагружении сварных обечаек давлением, которое создает напряжения, не превышающие предел упругости и последующем снятии нагрузки величины коэрцитивных сил $H_c^{св.с.}$ и $H_c^{ЗТВ+О.М.}$ изменяются по одним и тем же зависимостям (кривая 1 рис. 3.41, 3.42). Следовательно, величины коэрцитивных сил обечаек $H_c^{св.с.}$ и $H_c^{ЗТВ+О.М.}$ в разгруженном состоянии остаются равными значениям коэрцитивных сил в исходном состоянии $[H_c^{св.с.}]_0$ и $[H_c^{ЗТВ+О.М.}]_0$.

Нагружение сварных обечаек давлением, вызывающим пластическое деформирование металла, приводит к смещению кривых зависимостей $H_c^{св.с.} = f(P_{вн})$ и $H_c^{ЗТВ+О.М.} = f(P_{вн})$ при разгрузке и последующем нагружении, и как следствие к возрастанию величины коэрцитивных сил $[H_c^{св.с.}]_0$ и $[H_c^{ЗТВ+О.М.}]_0$ в

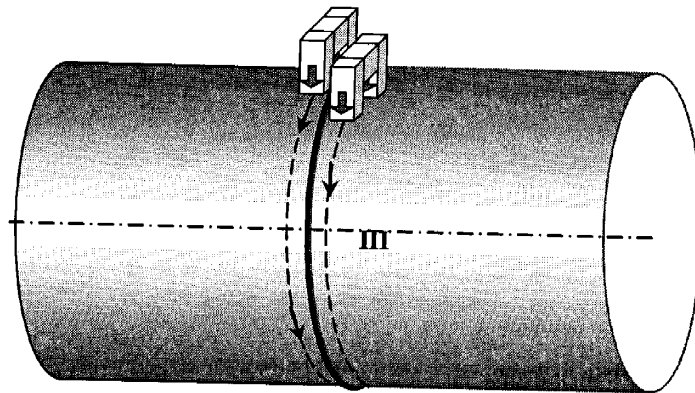


Рис. 3.40. Способ измерения величины коэрцитивной силы H_c^{3TB+OM} сварного соединения в направлении параллельном сварному шву

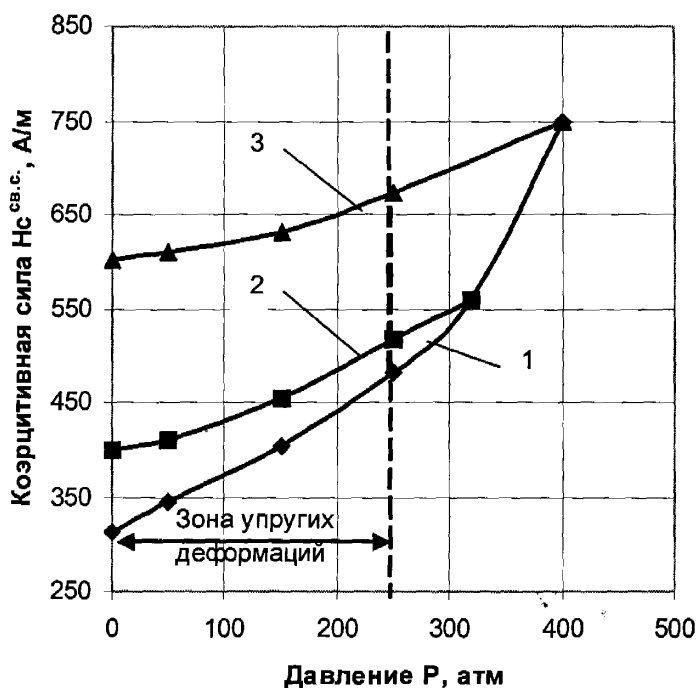


Рис. 3.41. Зависимость коэрцитивной силы $N_c^{св.с.}$ от внутреннего давления: 1 - при нагружении; 2 - при разгрузке выше σ_T ; 3 - при разгрузке для $\sigma \sim \sigma_b$

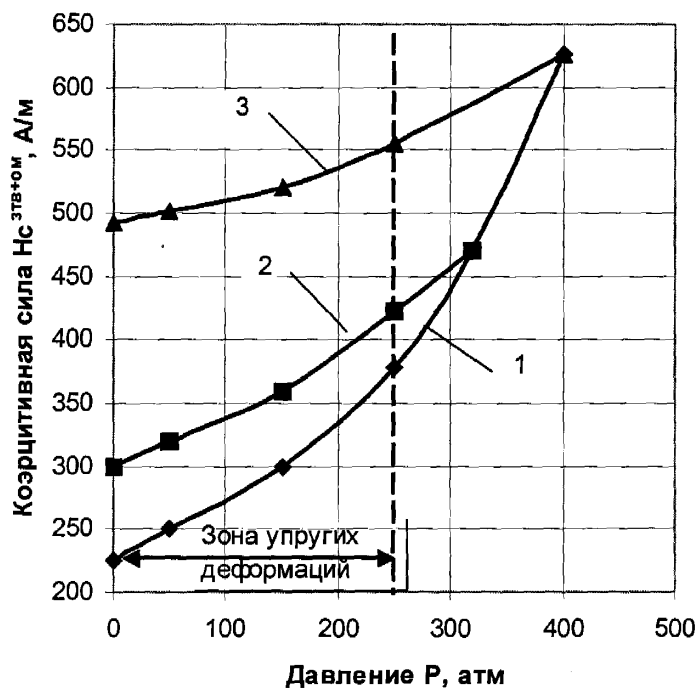


Рис. 3.42. Зависимость коэрцитивной силы $N_c^{зтв+ом}$, измеренной в направлении перпендикулярном сварному шву, от внутреннего давления: 1 - при нагружении; 2 - при разгрузке выше σ_T ; 3 - при разгрузке для $\sigma \sim \sigma_b$

разгруженном состоянии (кривые 2 и 3 рис. 3.41, 3.42). При этом наблюдается однозначная связь между максимальным напряжением σ_{\max} в цикле (нагружение - разгрузка) и величинами $[H_c^{cb.c.}]_0$ и $[H_c^{3TB+0.M.}]_0$ в разгруженном состоянии.

Таким образом, чем больше приложенное напряжение и соответственно величина пластической деформации, тем больше величина коэрцитивной силы в разгруженном состоянии. Это свидетельствует о дополнительной возможности оценки пластической деформации в сварном соединении и основном металле обечаек по величине коэрцитивной силы.

В процессе исследований также определялась анизотропия величины коэрцитивной силы $\Delta H_c^{3TB+0.M.}$. Измерение величины коэрцитивной силы $H_c^{3TB+0.M.}$ в продольном направлении по отношению к сварному шву (рис. 3.43) позволило на основании выражения (3.7) рассчитать $\Delta H_c^{3TB+0.M.}$ и построить зависимость $\Delta H_c^{3TB+0.M.} = f(P_{вн})$ для случая двухосного напряженного состояния (рис. 3.44).

$$\Delta H_c^{3TB+0.M.} = H_{c\perp}^{3TB+0.M.} - H_{c\parallel}^{3TB+0.M.}, \quad (3.7)$$

где $H_{c\perp}^{3TB+0.M.}$ - величина коэрцитивной силы измеренной в направлении перпендикулярном сварному шву в зоне термического влияния и основного металла; $H_{c\parallel}^{3TB+0.M.}$ - величина коэрцитивной силы измеренной в направлении параллельном сварному шву в зоне термического влияния и основного металла.

Полученная зависимость анизотропии величины коэрцитивной силы $\Delta H_c^{3TB+0.M.}$ от внутреннего давления $P_{вн}$ близка к линейной. Значение $\Delta H_c^{3TB+0.M.}$ при напряжении равном σ_b будет пороговым значением коэрцитивной силы, соответствующим состоянию предразрушения, для исследуемых сварных обечаек из стали 20.

Для определения значений коэрцитивной силы в сварном шве и ЗТВ, а также определения пороговых значений величины коэрцитивных сил $[H_c^{III}]_0$ и $[H_c^{3TB}]_0$, был проведен расчет на основе полученных при испытаниях данных.

Величина коэрцитивной силы сварного шва и ЗТВ определялась на основе выражений (2.8), (2.10) приведенных в 2.2 и описывающих соотношение параметров контроля магнитным коэрцитиметрическим методом диагностики сварных соединений $l_{ш}, l_{зтв.}, l_{o.m.}, l_0, H_c^{III}, H_c^{3TB}, H_c^{0.M.}$ и $H_c^{cb.c.}$. В результате расчета

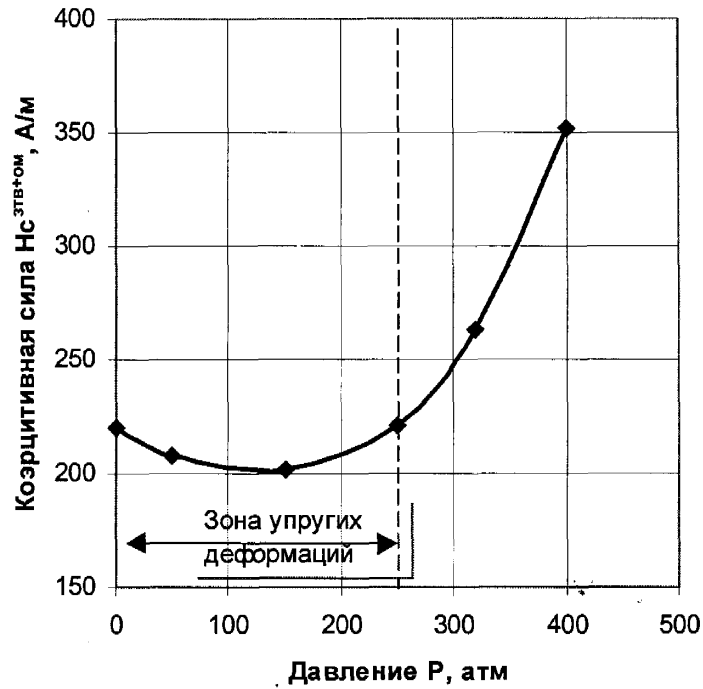


Рис. 3.43. Зависимость коэрцитивной силы $H_c^{\text{зтв+ом}}$, измеренной в направлении параллельном сварному шву, от внутреннего давления

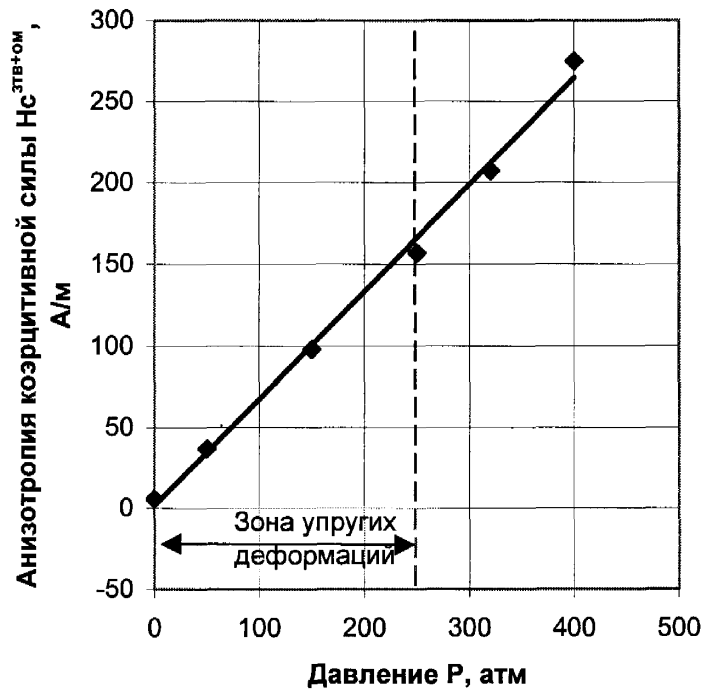


Рис. 3.44. Зависимость анизотропии коэрцитивной силы $\Delta H_c^{\text{зтв+ом}}$ от внутреннего давления

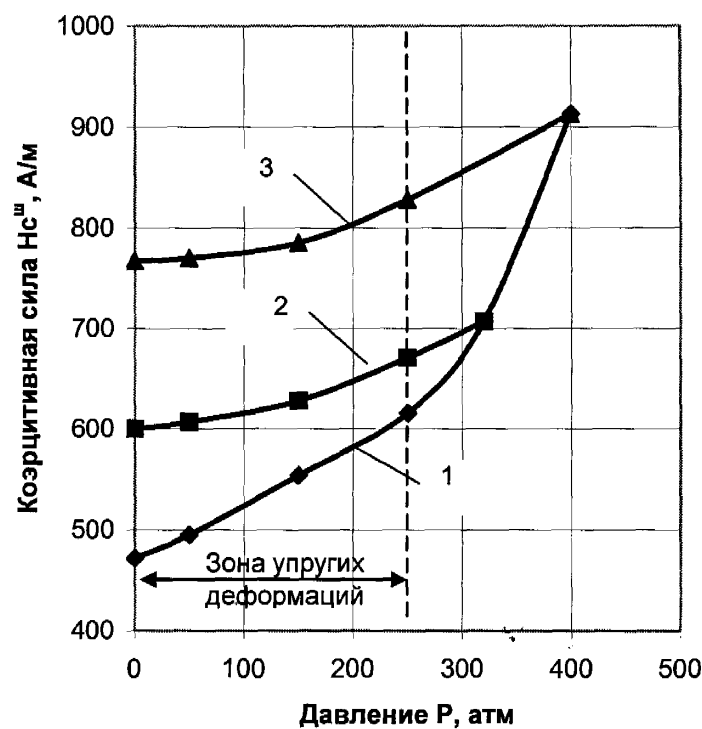


Рис. 3.45. Зависимость коэрцитивной силы H_c^{III} от внутреннего давления: 1 - при нагружении; 2 - при разгрузке выше σ_T ; 3 - при разгрузке для $\sigma \sim \sigma_B$

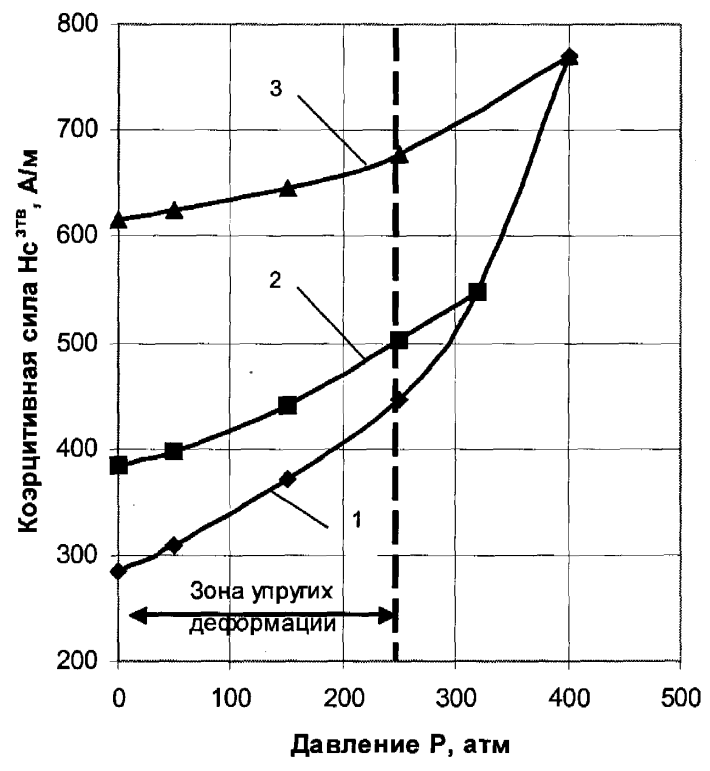


Рис. 3.46. Зависимость коэрцитивной силы H_c^{3TB} от внутреннего давления: 1 - при нагружении; 2 - при разгрузке выше σ_T ; 3 - при разгрузке для $\sigma \sim \sigma_B$

были определены характерные значения коэрцитивных сил $H_c^{ЗТВ}$ и $H_c^{Ш}$ в исходном состоянии, при напряжении равном пределу текучести σ_T , а также при напряжении равном пределу прочности σ_B . На основе полученных результатов исследований построены зависимости $H_c^{Ш} = f(P_{вн})$ и $H_c^{ЗТВ} = f(P_{вн})$ (рис. 3.45, 3.46). Значения $H_c^{ЗТВ}$, $H_c^{ЗТВ}$ и $H_c^{Ш}$ при напряжении равном σ_B будут пороговыми значениями коэрцитивных сил, соответствующими состоянию предразрушения, для исследуемых сварных обечаек из стали 20.

Таким образом, в результате проведенных исследований было установлено влияние двухосного нагружения и пластических деформаций на величину коэрцитивных сил сварного соединения, сварного шва и ЗТВ обечаек, а также анизотропию коэрцитивной силы. А также были определены пороговые значения коэрцитивных сил в локальных зонах сварного соединения.

Это позволяет на основании результатов измерений и расчета величин коэрцитивных сил в локальных зонах сварного соединения, а также на основании сравнения текущих и пороговых значений величин коэрцитивных сил прогнозировать остаточный ресурс сварных конструкций.

ВЫВОДЫ

(Раздел 3)

1. Разработаны функциональные схемы стендов и алгоритмы для исследования влияния статического и циклического нагружения, а также остаточных пластических деформаций на величину коэрцитивной силы.
2. В результате исследований установлены закономерности изменения величины коэрцитивных сил сварного соединения и основного металла (сталь 10Г2С1) в зависимости от величины остаточных пластических деформаций. Показано, что наибольшей чувствительностью к остаточным пластическим деформациям обладает способ измерения коэрцитивной силы под углом 0° по отношению к направлению прикладываемой нагрузки.
3. Величины коэрцитивных сил $H_c^{св.с.}$ и $H_c^{о.м.}$, измеренные как под углом 0° , так и под углом 90° по отношению к прикладываемой нагрузке, наиболее чувствительны к малым пластическим деформациям (до 2%).
4. Установлены закономерности изменения величины коэрцитивной силы сварных соединений и основного металла (сталь 10Г2С1) от циклических одноосных нагрузок. Показано, что увеличение количества циклов нагружения N сварных соединений приводит к возрастанию величины коэрцитивной силы сварного соединения, как в продольном, так и в поперечном направлении измерения. Наибольшая чувствительность к усталостным изменениям в основном металле и сварных соединениях наблюдается при измерении величины коэрцитивной силы под углом 0° по отношению к прикладываемой нагрузке. С увеличением амплитуды нагружения увеличивается интенсивность возрастания величины коэрцитивных сил $H_c^{св.с.}$ и $H_c^{о.м.}$ в обоих направлениях измерения.
5. Установленные характерные значения величины коэрцитивной силы при циклическом нагружении являются близкими к значениям, определенным для зависимости коэрцитивной силы сварных соединений и основного металла от величины остаточных пластических деформаций.

6. На основании результатов проведенных электронно-микроскопических исследований сварных образцов после их разрушения установлено, что одновременно с увеличением, как плотности дислокаций, так и внутренних напряжений, происходит возрастание величины коэрцитивной силы. Это позволяет на основе измерений величины коэрцитивной силы проводить оценку структурных повреждений сварных соединений и прогнозировать остаточный ресурс.
7. Установлено влияние двухосного нагружения и пластических деформаций на величину коэрцитивных сил сварного соединения, сварного шва и зоны термического влияния обечаек (сталь 20). Определены пороговые значения коэрцитивных сил в локальных зонах сварного соединения, а также пороговое значение анизотропии коэрцитивной силы.

РАЗДЕЛ 4

ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТРУБОПРОВОДОВ МАГНИТНЫМ КОЭРЦИТИМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Особенность процессов эксплуатации нефтегазопроводов в конце гарантируемого (назначенного) срока службы и особенно после его окончания, предъявляет специфический, отличающийся от существующего, подход к методам и средствам неразрушающего контроля, а также к его организационным схемам. Эти отличия обусловлены снижением эффективности применения традиционных методов неразрушающего контроля на данном этапе эксплуатации нефтегазопроводов вследствие деградации служебных свойств металла в результате структурных изменений во времени. Без учета этих особенностей могут возникать недопустимые погрешности в оценке трещиностойкости трубопроводов.

Рассмотрение вопросов, связанных с циклическим и статическим нагружением сварных соединений, показало высокую чувствительность коэрцитиметрического магнитного метода. Метод позволяет выявлять и оценивать структурные изменения сварных соединений в процессе эксплуатации трубопроводов.

Исходя из этого, для получения достоверной информации о техническом состоянии трубопроводов и продления назначенного срока их службы при гарантированном обеспечении безопасности их эксплуатации необходимо применение комплекса методов неразрушающего контроля. Конечной задачей такого комплекса является определение остаточного ресурса сварных соединений в рамках создания системы непрерывного мониторинга работоспособности нефтегазопроводов.

4.1 Разработка методики оценки и прогнозирования остаточного ресурса сварных соединений трубопроводов с применением магнитного коэрцитиметрического метода

Разработанная в результате исследований методика может быть представлена следующим алгоритмом (рис. 4.1) и включает определение параметров трех групп (табл. 4.1):

- магнитные;
- геометрические;
- временные.

Перед проведением испытаний сварных соединений трубопровода магнитным коэрцитиметрическим методом необходимо на основе анализа проектной документации обследуемого трубопровода, а также изучения условий и режимов его эксплуатации определить следующее:

- 1) дата введения трубопровода в эксплуатацию;
- 2) рабочее давление трубопровода;
- 3) марка стали труб;
- 4) диаметр трубопровода;
- 5) толщина стенки труб;
- 6) способ сварки стыковых кольцевых соединений трубопровода;
- 7) режимы сварки;
- 8) сварочные материалы;
- 9) вид и размеры разделки кромок;
- 10) размеры сварного шва;
- 11) режимы эксплуатации трубопровода;
- 12) условия эксплуатации трубопровода.

На основе установленных данных составляется «Протокол анализа проектной документации обследуемого трубопровода, условий и режимов эксплуатации» (Приложение 1).

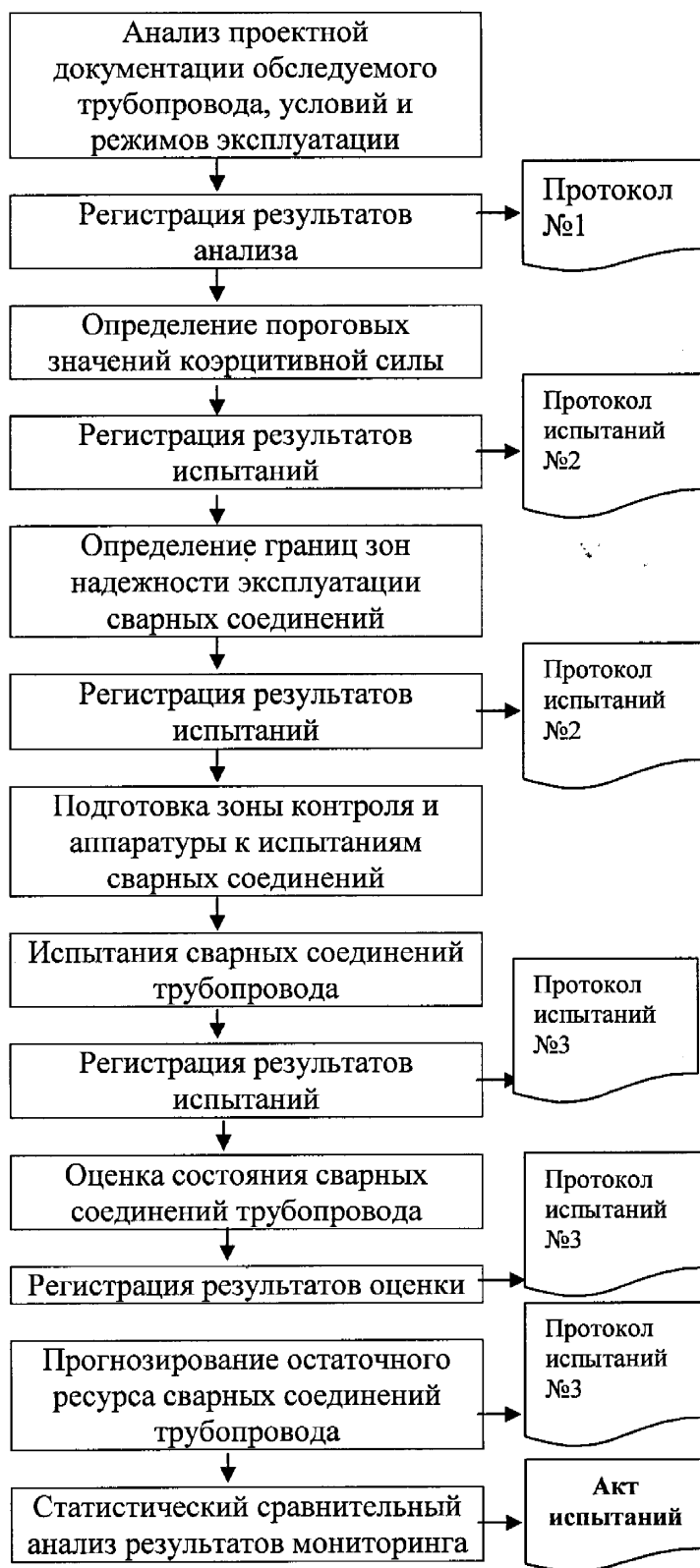


Рис. 4.1. Алгоритм определения остаточного ресурса сварных соединений при мониторинге магнитным коэрцитиметрическим методом

Таблица 4.1

Параметры оценки остаточного ресурса сварных соединений магнитным
коэрцитиметрическим методом

№	Параметр			Размерность
	Название	Условное обозначение	Способ определения	
Группа 1. Магнитные параметры				
1	Коэрцитивная сила сварного соединения	$H_c^{св.с}$	Измерение	А/м
	Характерные значения коэрцитивной силы сварного соединения:			
2	- в исходном состоянии	$[H_c^{св.с}]_0$		А/м
3	- при напряжении равном σ_T	$[H_c^{св.с}]_T$		А/м
4	Пороговое значение коэрцитивной силы сварного соединения (при напряжении равном σ_B)	$[H_c^{св.с}]_B$		А/м
5	Коэрцитивная сила сварного шва	$H_c^{ш}$	Расчет	А/м
	Характерные значения коэрцитивной силы сварного шва:			
6	- в исходном состоянии	$[H_c^{ш}]_0$		А/м
7	- при напряжении равном σ_T	$[H_c^{ш}]_T$		А/м
8	Пороговое значение коэрцитивной силы сварного шва (при напряжении равном σ_B)	$[H_c^{ш}]_B$		А/м
9	Коэрцитивная сила зоны термического влияния	$H_c^{зтв}$	Расчет	А/м
	Характерные значения коэрцитивной силы зоны термического влияния:			
10	- в исходном состоянии	$[H_c^{зтв}]_0$		А/м
11	- при напряжении равном σ_T	$[H_c^{зтв}]_T$		А/м
12	Пороговое значение коэрцитивной силы зоны термического влияния (при напряжении равном σ_B)	$[H_c^{зтв}]_B$		А/м

Продолжение. Таблица 4.1

№	Параметр			Размерность
	Название	Условное обозначение	Способ определения	
13	Коэрцитивная сила основного металла	$H_c^{o.m.}$	Измерение	А/м
	Характерные значения коэрцитивной силы основного металла:			
14	- в исходном состоянии	$[H_c^{o.m.}]_0$		А/м
15	- при напряжении равном σ_T	$[H_c^{o.m.}]_T$		А/м
16	Пороговое значение коэрцитивной силы основного металла (при напряжении равном σ_B)	$[H_c^{o.m.}]_B$		А/м
17	Анизотропия коэрцитивной силы	ΔH_c	Расчет	А/м
18	Характерные значения анизотропия коэрцитивной силы:			А/м
19	- в исходном состоянии	$[\Delta H_c]_0$		А/м
20	- при напряжении равном σ_T	$[\Delta H_c]_T$		А/м
21	Пороговое значение анизотропии коэрцитивной силы (при напряжении равном σ_B)	$[\Delta H_c]_B$		А/м
Группа 2. Геометрические параметры				
22	Ширина сварного шва	$l_{ш}$	Измерение	м
22	Размер зоны термического влияния	$l_{зтв}$	Расчет	м
23	Размер зоны основного металла	$l_{o.m.}$	Измерение	м
24	Размер базы измерения	l_d		м
25	Расстояние центра датчика от оси шва	l		м
Группа 3. Временные параметры				
26	Предельный срок эксплуатации	$T_{разр}$	Расчет	лет
27	Время эксплуатации трубопровода	$T_{экспл}$		лет
28	Остаточный ресурс	$T_{ост}$		лет

Определение пороговых значений коэрцитивной силы выполняется в процессе разрушающих гидравлических испытаний сварных образцов-свидетелей в испытательной лаборатории.

В качестве образцов-свидетелей используют сварные обечайки, что обеспечивает подобие характера разрушения образцов и сварных соединений трубопровода. Образцы-свидетели должны соответствовать обследуемым сварным соединениям трубопровода по следующим параметрам:

1. Марка стали
2. Толщина
3. Способ сварки
4. Режимы сварки
5. Сварочные материалы
6. Вид и размеры разделки кромок
7. Размеры сварного шва

Поэтому образцы-свидетели целесообразно изготавливать из труб аварийного запаса обследуемого трубопровода.

В процессе разрушающих испытаний необходимо определить:

1. Исходные (до нагружения) значения величины коэрцитивной силы в направлении перпендикулярном сварному шву в позициях измерения, указанных на рис. 2.4 и в направлении параллельном сварному шву в ЗТВ и зоне основного металла (рис. 3.40).
2. Значения величины коэрцитивной силы при напряжении равном пределу текучести σ_T в тех же позициях измерения и направлениях.
3. Значения величины коэрцитивной силы при напряжении равном пределу прочности σ_B в тех же позициях измерения и направлениях.

Для определения пороговых значений коэрцитивной силы в сварном шве и ЗТВ необходимо проведение расчета. Основой для расчета служат данные, полученные в позициях измерения 1-1, 2-2, 3-3, 2'-2', 3'-3' (рис. 2.4), а также параметры l_d и $l_{зТВ}$. Определение размера зоны термического влияния $l_{зТВ}$ проводят в соответствии с разработанным способом. Устройство контроля последовательно

перемещают в направлении от сварного шва (поз. 2-2 и 2'-2') с шагом 1 мм до тех пор, пока величина коэрцитивной силы не достигнет величины коэрцитивной силы основного металла - $H_c^{o.m.}$ (поз. 3-3 и 3'-3').

Величины коэрцитивных сил справа $H_{c1}^{зтв+ом}$ и слева от сварного шва $H_{c2}^{зтв+ом}$ (рис. 2.4) могут несколько отличаться. Поэтому для повышения достоверности магнитного контроля целесообразно определение значений коэрцитивных сил с обеих сторон сварного шва (см. рис. 2.12).

Величина коэрцитивной силы справа от сварного шва $H_{c1}^{зтв}$ определяется:

где $H_{c1}^{зтв+o.m.}$ - величины коэрцитивной силы в зоне термического влияния и

$$H_{c1}^{зтв} = \frac{(H_{c1}^{зтв+o.m.} - H_{c1}^{o.m.})l_{\partial} + H_{c1}^{o.m.}l_{зтв}}{l_{зтв}}, \quad (4.1)$$

основного металла (поз. 2-2); $H_{c1}^{o.m.}$ - величины коэрцитивной силы в зоне основного металла (поз. 3-3).

Величина коэрцитивной силы слева от сварного шва $H_{c2}^{зтв}$ определяется:

где $H_{c2}^{зтв+o.m.}$ - величины коэрцитивной силы в зоне термического влияния и

$$H_{c2}^{зтв} = \frac{(H_{c2}^{зтв+o.m.} - H_{c2}^{o.m.})l_{\partial} + H_{c2}^{o.m.}l_{зтв}}{l_{зтв}}, \quad (4.2)$$

основного металла (поз. 2'-2'); $H_{c2}^{o.m.}$ - величины коэрцитивной силы в зоне основного металла (поз. 3'-3').

Величина коэрцитивной силы в сварном шве $H_c^{ш}$:

$$H_c^{ш} = \frac{H_c^{св.с}l_{\partial} - (H_{c1}^{зтв} + H_{c2}^{зтв})l_{зтв} - (H_{c1}^{o.m.} + H_{c2}^{o.m.})l_{o.m.}}{l_{ш}}, \quad (4.3)$$

где $l_{o.m.}$ определяется из выражения (4.4), описывающего взаимосвязь между $l_{ш}$, $l_{зтв}$ и $l_{o.m.}$ для устройства в поз. 1 на рис. 2.4:

$$l_{\partial} = l_{ш} + 2l_{o.m.} + 2l_{зтв}. \quad (4.4)$$

Таким образом, в результате проведенных измерений и последующего расчета определяются характерные значения коэрцитивных сил $H_c^{зтв}$ и $H_c^{ш}$ в исходном состоянии, при напряжении равном пределу текучести σ_T и при напряжении равном пределу прочности σ_B . Значения $H_c^{зтв}$ и $H_c^{ш}$ при напряжении

равном σ_v будут пороговыми значениями коэрцитивных сил, соответствующими состоянию предразрушения, для сварных соединений испытуемого трубопровода.

Оценка состояния сварных соединений трубопроводов возможна также путем определения анизотропии величины коэрцитивной силы в ЗТВ и зоне основного металла $\Delta H_c^{ЗТВ+О.М.}$ по выражению (3.7).

Пороговому значению анизотропии коэрцитивной силы будет соответствовать значение $\Delta H_c^{ЗТВ+О.М.}$ при напряжении равном σ_v .

На основе данных, полученных в процессе проведения разрушающих статических испытаний и расчета, составляется «Протокол испытаний образцов-свидетелей» (Приложение 2).

Для оценки надежности эксплуатации трубопроводов на основе определенных в результате расчета значений коэрцитивных сил $H_c^{ЗТВ}$, $H_c^{Ш}$ и $\Delta H_c^{ЗТВ+О.М.}$ образца-свидетеля выделяются две зоны надежности эксплуатации сварных соединений трубопровода: а) надежная и б) опасная.

К зоне надежной эксплуатации относят сварные соединения, для которых значения коэрцитивных сил $H_c^{ЗТВ}$, $H_c^{Ш}$ и $\Delta H_c^{ЗТВ+О.М.}$ меньше значений величин коэрцитивных сил при напряжениях равных пределу текучести σ_T . К зоне опасной эксплуатации относят сварные соединения, для которых значения коэрцитивных сил $H_c^{ЗТВ}$, $H_c^{Ш}$ и $\Delta H_c^{ЗТВ+О.М.}$ больше значений величин коэрцитивных сил при напряжениях равных пределу текучести σ_T .

Таким образом, с помощью интервальной шкалы устанавливается критерий оценки результатов контроля сварных соединений магнитным методом и определяется надежность их эксплуатации. Это позволяет во всем временном диапазоне от момента введения до момента вывода трубопровода из эксплуатации, в зависимости от величины коэрцитивной силы, предъявлять различные требования к режимам эксплуатации сварных соединений и периодичности их обследований в рамках системы мониторинга.

Интервалы значений коэрцитивных сил для каждой зоны надежности эксплуатации заносятся в «Протокол испытаний образцов-свидетелей» (Приложение 2).

Перед проведением измерений коэрцитивной силы сварных соединений необходима настройка прибора по контрольным образцам.

Применяемая аппаратура для реализации метода позволяет исключить влияние зазора на точность метода и показания прибора при испытаниях. Это позволяет не зачищать контролируемую поверхность трубопровода от коррозии.

Для определения значений величины коэрцитивной силы в кольцевых сварных соединениях трубопровода необходимо провести сканирование и измерения по периметру трубы. В каждой точке сечения проводят измерения в соответствии со схемой на рис. 2.4.

Результаты измерений заносят в «Протокол испытаний сварного соединения трубопровода» (Приложение 3).

Для оценки состояния сварных соединений трубопровода проводят расчет величин коэрцитивных сил $H_c^{ЗТВ}$, $H_c^Ш$ и $\Delta H_c^{ЗТВ+О.М}$, а также по интервальной шкале определяют зону надежности их эксплуатации.

Величины коэрцитивных сил в шве и ЗТВ сварного соединения эксплуатируемого трубопровода определяют на основе формул (4.1), (4.2) и (4.3).

Сварные соединения трубопроводов относят к той или иной зоне надежности эксплуатации на основе анализа состояния сварных соединений в различных его зонах (ЗТВ, шов, основной металл). Для этого первоначально оценивают каждую зону сварного соединения, относя ее к конкретной зоне надежности эксплуатации на основе данных, полученных при испытаниях сварного соединения трубопровода. Оценка проводится по наихудшему (максимальному) значению величины коэрцитивной силы, зафиксированному в точках сечения соединения.

Результаты расчета и ранжирования заносят в «Протокол испытаний сварного соединения трубопровода» (Приложение 3).

Результаты измерений величин коэрцитивных сил в различных зонах сварного соединения позволяют с помощью системы мониторинга прогнозировать состояние трубопроводов. Прогноз строится на основе анализа кинетики изменения измеряемых при мониторинге текущих значений и порогового значения величины коэрцитивной силы в сварном соединении.

На основании исходного и порогового значений величины коэрцитивной силы в сварном соединении и значений величины коэрцитивной силы в сварном соединении, установленных при мониторинге в процессе эксплуатации, строится кривая прогноза времени эксплуатации сварного соединения (рис. 4.2). Остаточный ресурс сварного соединения определяется как разность между предельным прогнозируемым сроком эксплуатации (соответствующий состоянию разрушения) и временем эксплуатации трубопровода (на текущий момент):

$$T_{ост} = T_{разр} - T_{экспл} \quad (4.5)$$

Результаты прогноза заносят в «Протокол испытаний сварного соединения трубопровода» (Приложение 3).

Величина остаточного ресурса и принадлежность к той или иной зоне надежности эксплуатации определяет продолжительность и рекомендуемый режим эксплуатации сварных соединений.

Нормативной базой для прогнозирования остаточного ресурса сварных соединений магнитным коэрцитиметрическим методом является межгосударственный (СНГ) стандарт ГОСТ 30415-96 «Сталь. Неразрушающий контроль механических свойств и микроструктуры металлопродукции магнитным методом», который в соответствии с Изменениями № 1 к нему регламентирует магнитный контроль механических свойств и ресурса металлопродукции на стадии производства и всех этапах эксплуатации.

На основе составленных протоколов (Приложения 1, 2 и 3) составляется «Акт испытаний сварных соединений трубопровода» (Приложение 4).

Статистический анализ результатов мониторинга проводится путем сравнения характеристик распределений величин коэрцитивных сил H_c^{3TB} и H_c^{III}

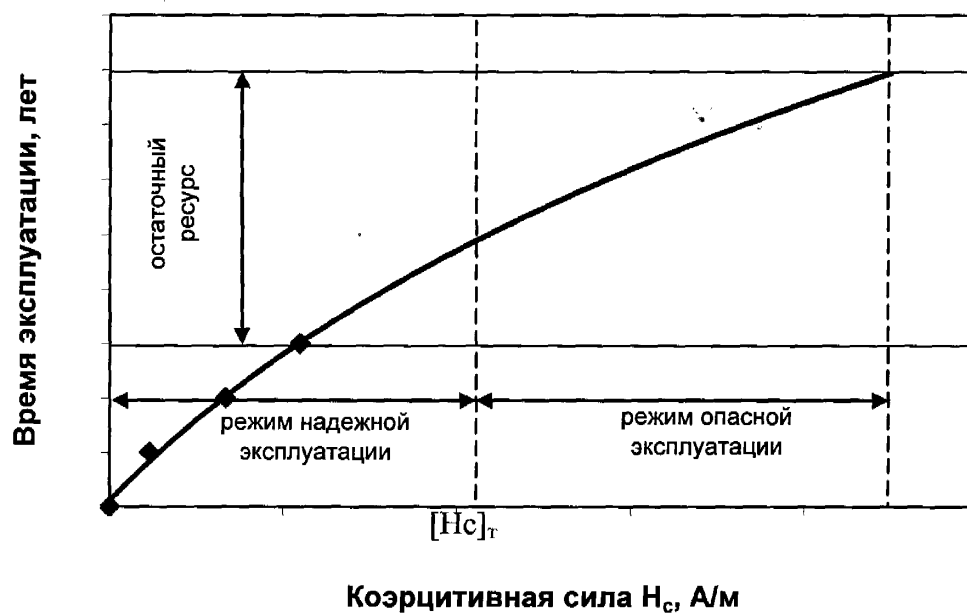


Рис. 4.2. Форма номограммы для оценки остаточного ресурса трубопровода по результатам мониторинга в процессе эксплуатации

на различных этапах эксплуатации трубопровода, полученных в процессе мониторинга сварных соединений.

Для проведения анализа необходимо определение следующих характеристик:

- 1) Дисперсия значений коэрцитивных сил H_c^{3TB} и H_c^{III} :

$$D_{3TB}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (H_{c_i}^{3TB} - \bar{H}_c^{3TB})^2}{n}, \quad (4.6)$$

$$D_{III}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (H_{c_i}^{III} - \bar{H}_c^{III})^2}{n}, \quad (4.7)$$

где \bar{H}_c^{3TB} , \bar{H}_c^{III} — среднее арифметическое значений коэрцитивных сил H_c^{3TB} и H_c^{III} сварных соединений обследуемого трубопровода, $H_{c_i}^{3TB}$, $H_{c_i}^{III}$ — значения коэрцитивных сил H_c^{3TB} и H_c^{III} сварных соединений трубопровода, n — объем выборки значений коэрцитивной силы.

- 2) Среднее арифметическое значений коэрцитивных сил H_c^{3TB} и H_c^{III} :

$$\bar{H}_c^{3TB} = \frac{\sum_{i=1}^n H_{c_i}^{3TB}}{n}, \quad (4.8)$$

$$\bar{H}_c^{III} = \frac{\sum_{i=1}^n H_{c_i}^{III}}{n} \quad (4.9)$$

- 3) Размах вариации значений коэрцитивных сил H_c^{3TB} и H_c^{III} :

$$R^{3TB} = H_{c_{\max}}^{3TB} - H_{c_{\min}}^{3TB}, \quad (4.10)$$

$$R^{III} = H_{c_{\max}}^{III} - H_{c_{\min}}^{III}, \quad (4.11)$$

где $H_{c_{\max}}^{3TB}$, $H_{c_{\max}}^{III}$ — наибольшие значения выборки величин коэрцитивных сил H_c^{3TB} и H_c^{III} ; $H_{c_{\min}}^{3TB}$, $H_{c_{\min}}^{III}$ — наименьшие значения выборки величин коэрцитивных сил H_c^{3TB} и H_c^{III} ;

- 4) среднее отклонение значений коэрцитивных сил H_c^{3TB} и H_c^{III} :

$$\bar{d}^{3TB} = \frac{\sum |H_{c_i}^{3TB} - \bar{H}_c^{3TB}|}{n}, \quad (4.12)$$

$$\bar{d}^{III} = \frac{\sum |H_{c_i}^{III} - \bar{H}_c^{III}|}{n}, \quad (4.13)$$

5) коэффициент линейной вариации значений коэрцитивных сил $H_c^{зтв}$ и $H_c^{ш}$:

$$V_d^{зтв} = \frac{\bar{d}^{зтв}}{\bar{H}_c^{зтв}} \times 100\%, \quad (4.14)$$

$$V_d^{ш} = \frac{\bar{d}^{ш}}{\bar{H}_c^{ш}} \times 100\%. \quad (4.15)$$

Сравнительный анализ средних значений коэрцитивных сил $H_c^{зтв}$ и $H_c^{ш}$ при периодическом мониторинге трубопровода позволяет определить изменения в сварных соединениях в среднем по трубопроводу и таким образом общий уровень накопления повреждений и деформаций.

Определение дисперсии как меры рассеивания значений величин коэрцитивных сил $H_c^{зтв}$ и $H_c^{ш}$, то есть отклонение их от средних значений в сварных соединениях трубопровода совместно с построением распределения значений указанных величин дает возможность оценить общий статистический характер изменения состояния сварных соединений трубопровода.

Указанные статистические характеристики могут также быть определены для величин коэрцитивных сил $H_c^{св.с.}$, $H_c^{зтв+о.м.}$, $H_c^{о.м.}$ и $\Delta H_c^{зтв+о.м.}$.

Результаты расчета заносят в «Акт испытаний сварных соединений трубопровода» (Приложение 4).

4.2. Сравнительный анализ и исследование изменения технического состояния сварных соединений по величине коэрцитивной силы при эксплуатации газопровода

Для оценки влияния эксплуатации газопроводов на поврежденность кольцевых стыковых сварных соединений были проведены комплексные исследования на участке газопровода Борислав–Дрогобыч протяженностью 19 км. Дата введения газопровода в эксплуатацию — 1964 г. Трубопровод изготовлен из труб (сталь 20) диаметром 273 мм, толщиной стенки 8 мм.

Комплексные испытания проводились с использованием коэрцитиметра КРМ-Ц-2М, а также ультразвукового дефектоскопа УД-2М, твердомера Т92, рентгеновской установки Р-52, регистратора данных SONY-RZ, толщиномера УТ-93П.

Предварительно были проведены разрушающие статические испытания сварных образцов-свидетелей в испытательной лаборатории.

В качестве образцов-свидетелей применялись обечайки из стали 20 диаметром 160 мм с кольцевым сварным швом и толщиной стенки 8 мм. Кольцевой стыковой многопроходный шов был выполнен ручной дуговой сваркой.

Испытания проводилось на стенде, состоящем из гидравлического насоса высокого давления, регистратора данных SONY-RZ, а также коэрцитиметра КРМ-Ц-2М с приставным магнитным устройством.

Для позиционирования датчика в соответствии с разработанным способом определения величины коэрцитивной силы в локальных зонах сварного соединения предварительно на обечайки наносилась координатная сетка по образующим и кольцевым сечениям. Точки пересечения линий сетки были местом измерений параметров магнитного коэрцитиметрического метода.

В процессе статических испытаний сварные обечайки нагружали ступенчато до разрушения. Через каждые 25 атм. в узлах сетки в позициях измерения, указанных на рис. 2.4 и рис. 3.40, производилась регистрация

результатов измерения величины коэрцитивной силы. Результаты измерений заносились в банк данных устройства регистрации.

В процессе испытаний было определено:

1. Исходные (до нагружения) значения величины коэрцитивной силы.
2. Значения величины коэрцитивной силы при напряжении равном пределу текучести σ_T .
3. Значения величины коэрцитивной силы при напряжении равном пределу прочности σ_B .

Результаты испытаний образцов-свидетелей представлены в табл. 4.2.

Для определения пороговых значений коэрцитивной силы в сварном шве и ЗТВ был проведен расчет на основе данных, полученных при разрушающих статических испытаниях.

Величина коэрцитивной силы сварного шва и ЗТВ, а также анизотропии величины коэрцитивной силы в ЗТВ и зоне основного металла определялась на основе выражений (4.1), (4.2), (4.3) и (3.7), приведенных в методике.

Таким образом, в результате проведенных измерений в процессе разрушающих испытаний образцов-свидетелей и последующего расчета были определены характерные значения коэрцитивных сил $H_c^{ЗТВ}$, $H_c^{Ш}$ и $\Delta H_c^{ЗТВ+О.М.}$ в исходном состоянии и при напряжении равном пределу текучести σ_T , а также пороговые значения коэрцитивных сил при напряжении равном пределу прочности σ_B (табл. 4.3).

На основе определенных в результате расчета значений коэрцитивных сил $H_c^{ЗТВ}$, $H_c^{Ш}$ и $\Delta H_c^{ЗТВ+О.М.}$ образцов-свидетелей были определены зоны надежности эксплуатации сварных соединений обследуемого трубопровода: а) надежная и б) небезопасная.

При проведении испытаний сварных соединений на участке газопровода Борислав–Дрогобыч выполнялось шурфование трассы в местах залегания трубопровода. Измерения проводились как на участках подземной укладки трубопроводов, так и на воздушных переходах через реки (рис. 4.3).

Таблица 4.2

Результаты испытаний образцов-свидетелей

Состояние образца	Средние значения коэрцитивной силы в позициях измерения, А/м		
	1-1	2-2 и 2'-2'	3-3 и 3'-3'
в исходном состоянии	299	187	170
при напряжении равном σ_T	465	365	350
при напряжении равном σ_B	790	711	700

Таблица 4.3

Результаты расчета величины коэрцитивной силы сварного шва и ЗТВ образцов-свидетелей

Состояние образца	Величина коэрцитивной силы, А/м		
	Сварного шва	ЗТВ _{1,2}	Анизотропия
в исходном состоянии	472	274	6
при напряжении равном σ_T	616	446	157
при напряжении равном σ_B	914	770	275



Рис. 4.3. Измерение величины коэрцитивной силы в кольцевом сварном соединении №1 газопровода Борислав – Дрогобыч на участке воздушного перехода через реку Вышницу

Схема расположения сварных соединений газопровода Борислав – Дрогобыч, подвергнутых испытаниям, представлена на рис. 4.4. Проведены испытания на участке воздушного перехода через реку Выжницу возле автомобильного моста - кольцевые сварные соединения №1 и №2; №3 и №4 - кольцевые сварные соединения на участке шурфования возле газораспределительного поста; №5 - №8 - кольцевые сварные соединения на участке воздушного перехода через реку Тысменица; №9 и №10 - кольцевые сварные соединения на участке шурфования между реками Выжница и Тысменица.

Для позиционирования датчика в соответствии с разработанным способом определения величины коэрцитивной силы в локальных зонах сварного соединения предварительно на поверхность трубопровода (в зоне сварного соединения) наносилась координатная сетка по образующим и кольцевым сечениям.

При проведении оценки состояния сварных соединений трубопровода электромагнитный преобразователь устанавливали на поверхность трубопровода и сканировали, проводя измерения в узлах сетки в позициях, указанных на рис. 2.4 и рис. 3.40, согласно разработанной методики испытаний. Измерения коэрцитивной силы проводили в 4 точках сечения трубы, начиная с верхней (в секторе 45°). Результаты измерений заносились в банк данных специального устройства регистрации.

Для оценки состояния сварных соединений трубопровода был проведен расчет величин коэрцитивных сил $H_c^{ЗТВ}$, $H_c^{Ш}$, $\Delta H_c^{ЗТВ+0.М.}$, а также ранжирование сварных соединений по зонам надежности эксплуатации.

Величины коэрцитивных сил в шве и ЗТВ сварного соединения эксплуатируемого трубопровода определялись на основе формул (4.1), (4.2) и (4.3). Величина анизотропии коэрцитивной силы в ЗТВ и зоне основного металла определялась на основе выражения (3.7). Ранжирование сварных соединений проводилось на основе данных табл. 4.4.

На основе анализа состояния сварных соединений в различных его зонах

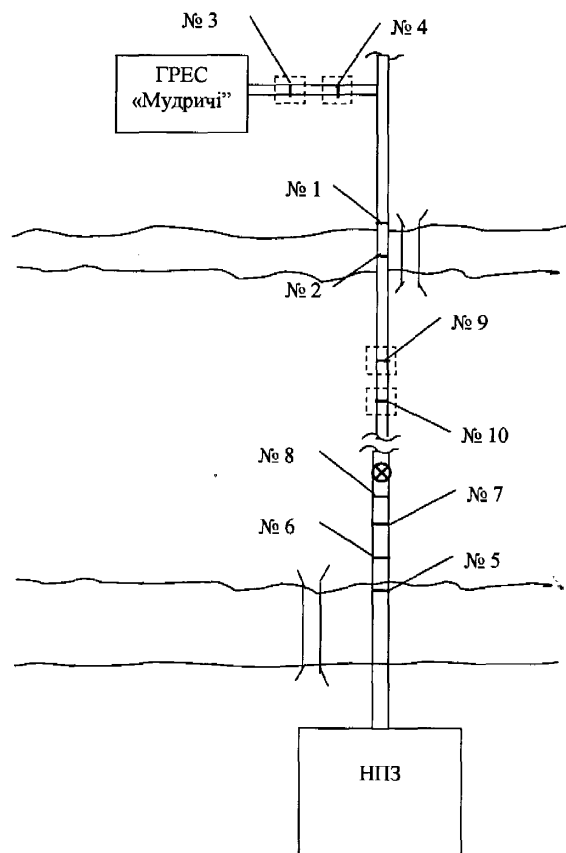


Рис. 4.4. Схема расположения сварных соединений газопровода Борислав – Дрогобыч, подвергнутого испытаниям (пунктиром показаны места шурфования)

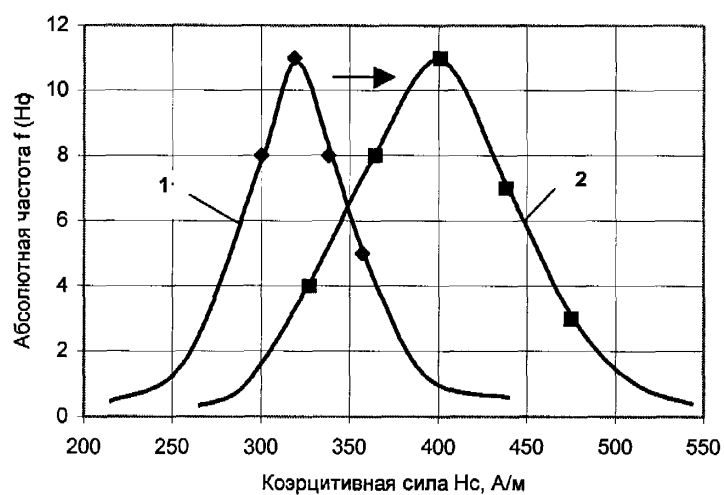


Рис. 4.5. Распределение значений коэрцитивной силы $H_c^{св.с.}$ для стыковых сварных соединений трубопровода: 1 — трубопровод до эксплуатации, 2 — эксплуатируемый трубопровод

Таблица 4.4

Результаты расчета коэрцитивных сил сварных соединений трубопровода

Сварное соединение №	Величина коэрцитивной силы, А/м		
	Сварного шва	$3TB_{1,2}$	Анизотропии
1	667	591	108
2	530	281	32
3	601	577	232
4	600	538	168
5	644	626	73
6	700	407	10
7	664	281	110
8	538	301	51
9	588	556	123
10	651	434	147

Таблица 4.5

Результаты ранжирования сварных соединений трубопровода

Параметр	Сварное соединение									
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7	№ 8	№ 9	№ 10
Зоны надежности эксплуатации (надежная/ опасная)	опасная	надежная	опасная	опасная	опасная	опасная	опасная	надежная	опасная	опасная

(ЗТВ, шов) кольцевые сварные соединения трубопровода были отнесены к различным зонам надежности эксплуатации. Результаты представлены в табл. 4.5.

В итоге было установлено, что сварные соединения № 2 на участке воздушного перехода через реку Выжница возле автомобильного моста и №8 на участке воздушного перехода через реку Тысменица находятся в удовлетворительном состоянии. Остальные сварные соединения отнесены к зоне опасной эксплуатации.

С целью определения средних изменений в сварных соединениях трубопровода в процессе эксплуатации и таким образом общего уровня накопления повреждений и деформаций, а также оценки общего статистического характера изменения состояния сварных соединений газопровода был проведен статистический сравнительный анализ результатов мониторинга.

Статистический анализ результатов мониторинга проводится путем сравнения характеристик распределений величин коэрцитивных сил $H_c^{ЗТВ}$ и $H_c^{Ш}$ на различных этапах эксплуатации трубопровода, полученных в процессе мониторинга сварных соединений.

Для обеспечения возможности проведения данного статистического сравнительного анализа в качестве модели обследуемого трубопровода в начале его эксплуатации были изготовлены кольцевые сварные соединения обечаек, изготовленных из той же стали, что и обследуемый трубопровод.

А также был проведен весь комплекс испытаний, аналогичный проведенному на трубопроводе Борислав–Дрогобыч. Таким образом, это дало возможность провести статистический анализ характеристик распределений величин коэрцитивных сил $H_c^{ЗТВ}$ и $H_c^{Ш}$ на различных этапах эксплуатации трубопровода.

Определение дисперсии и среднего арифметического значений коэрцитивных сил $H_c^{ЗТВ}$ и $H_c^{Ш}$ выполнялось на основе выражений (4.6) - (4.9).

Сравнительный анализ средних значений коэрцитивных сил $H_c^{ЗТВ}$ и $H_c^{Ш}$ позволил определить изменения в сварных соединениях в среднем по трубопроводу и таким образом оценить общий уровень накопления повреждений.

Таблица 4.6.

Результаты неразрушающего контроля твердости сварных соединений
трубопровода

Сварное соедине ние №	Зоны сварного соеди- нения	Величина твердости НВ, МПа	
		Фактическая	Нормативная
1	OM ₁	1260	1200±10%
	Ш	1670	...
	OM ₂	1450	1200±10%
3	OM ₁	1000	1200±10%
	Ш	1625	...
	OM ₂	1393	1200±10%
4	OM ₁	980	1200±10%
	Ш	1302	...
	OM ₂	1040	1200±10%
5	OM ₁	1530	1200±10%
	Ш	1735	...
	OM ₂	1491	1200±10%
6	OM ₁	1467	1200±10%
	Ш	1736	...
	OM ₂	1499	1200±10%
9	OM ₁	1210	1200±10%
	Ш	1540	...
	OM ₂	1299	1200±10%
10	OM ₁	1280	1200±10%
	Ш	1455	...
	OM ₂	1280	1200±10%

Таблица 4.7

Результаты неразрушающего УЗ-контроля сварных соединений
трубопровода

Сварное соединение №	Выявленные дефекты
1	Е, А
3	Е
4	Е
5	Е, А
6	Е
9	Е
10	Е

Примечание. А – дефект, эквивалентная площадь (амплитуда эхо-сигнала) и условная протяженность которого равна или менее допустимых значений, Е – дефекты, условная протяженность которых $\Delta L > \Delta L_0$, где ΔL_0 – расчетное или измеренное значение условной протяженности ненаправленного отражателя на той же глубине, что и выявленный дефект.

Таблица 4.8

Результаты неразрушающего радиографического контроля сварных соединений трубопровода

Сварное соединение №	Выявленные дефекты
1	Da, Bc, Ac, Fd
3	Da, Ba, Bd
4	Da, Fd, Bd, Ac, Bb, Fa, Ba
5	Da
6	Bb, Ba, Fa
9	Da, Bb, Bd, Aa
10	Da, Ak, Fd

Примечание. Aa – пора, Ba – шлак, Ac – скопление пор, Bb – цепочка шлаковых включений, Bc – скопление шлака, Fd – смещение кромок, Fa – утяжка, Da – непровар в корне шва, Ak – каналные поры.

Также на основе выражений (4.10) - (4.15) были определены размах вариации данных R , среднее отклонение d , коэффициент линейной вариации V_d .

Определение дисперсии как меры рассеивания значений величин коэрцитивных сил $H_c^{ЗТВ}$ и H_c^{III} , то есть отклонение их от средних значений в сварных соединениях трубопровода совместно с построением распределения значения коэрцитивной силы $H_c^{св.с}$ (рис. 4.5) позволило оценить общий статистический характер изменения состояния сварных соединений трубопровода Борислав–Дрогобыч. В результате установлено, что дисперсия распределения значений коэрцитивной силы $H_c^{ЗТВ}$ в кольцевых стыковых сварных соединениях газопровода Борислав – Дрогобыч в процессе эксплуатации увеличилась в 11,5 раза, H_c^{III} – в 2,7 раза. Среднее арифметическое значений коэрцитивной силы $H_c^{ЗТВ}$ в процессе эксплуатации увеличилась на 21,5 %, H_c^{III} – на 18,3 % соответственно. Размах вариации значений коэрцитивной силы $H_c^{ЗТВ}$ в процессе эксплуатации увеличился в 3,1 раза, H_c^{III} – в 1,6 раза. Среднее отклонение значений коэрцитивной силы $H_c^{ЗТВ}$ в процессе эксплуатации увеличилось в 3,3 раза, H_c^{III} – в 1,7 раза. Коэффициент линейной вариации значений коэрцитивной силы $H_c^{ЗТВ}$ в процессе эксплуатации увеличился в 2,7 раза, H_c^{III} – в 1,5 раза.

Таким образом, установлено, что для статистического распределения значений коэрцитивных сил сварного соединения после 40 лет эксплуатации характерно смещение средних значений в сторону увеличения на десятки процентов, что свидетельствует об ухудшении эксплуатационных свойств всего участка трубопровода. Изменение рассмотренных абсолютных показателей вариации также свидетельствует об изменении самого характера вариации значений коэрцитивных сил сварного соединения после эксплуатации, причем большие изменения характерны для ЗТВ, чем для металла сварного шва.

Для повышения достоверности контроля трубопровода были проведены радиографический, УЗ-контроль и твердометрия сварных соединений. Результаты исследований представлены в табл. 4.6 – 4.8.

Таким образом, анализ полученных результатов исследований показал, что магнитный коэрцитиметрический метод существенно дополняет данные, полученные методами дефектоскопии и твердометрии о состоянии трубопроводов длительного срока службы.

ВЫВОДЫ

(Раздел 4)

1. В результате проведенных исследований разработана методика оценки остаточного ресурса сварных соединений конструкций магнитным коэрцитиметрическим методом.
2. В процессе проведенных комплексных исследований установлено влияние процесса эксплуатации газопровода на изменение величины коэрцитивной силы сварных соединений. Установлена принадлежность сварных соединений к зонам надежности эксплуатации.
3. Сравнительный анализ полученных в результате расчета по разработанной методике средних значений коэрцитивных сил H_c^{3TB} и H_c^{III} позволил определить, что среднее арифметическое значений коэрцитивной силы H_c^{3TB} в процессе эксплуатации увеличилась на 21,5 %, H_c^{III} – на 18,3 %. Это позволяет оценить изменения технического состояния сварных соединений в среднем по трубопроводу.
4. В результате расчета установлено, что величина дисперсии коэрцитивных сил H_c^{3TB} и H_c^{III} в процессе эксплуатации увеличилась в 5,3 ...5,7 раза, размах вариации - в 1,6...3,1 раза, среднее отклонение значений - в 1,7...3,3 раза, коэффициент линейной вариации - в 1,5...2,7 раза. Это позволяет определить общий статистический характер изменения технического состояния сварных соединений трубопровода и, таким образом, оценить общий уровень накопления повреждений и деформаций в конструкции в целом.
5. Анализ полученных результатов исследований показал, что магнитный коэрцитиметрический метод существенно дополняет данные, полученные методами дефектоскопии и твердометрии о состоянии трубопроводов длительного срока службы.

ВЫВОДЫ

1. В результате проведенных исследований разработан метод оценки и прогнозирования остаточного ресурса сварных соединений с применением коэрцитиметрического контроля. Метод подтвержден статическими и циклическими испытаниями плоских и трубчатых сварных образцов.
2. Установлены зависимости коэрцитивной силы сварных соединений и основного металла (сталь 10Г2С1) от величины статических и циклических нагрузок. Показано, что увеличение количества циклов нагружения и остаточных пластических деформаций сварных соединений приводит к возрастанию коэрцитивной силы более чем на 60 %.
3. Установлены пороговые значения величины коэрцитивной силы в локальных зонах сварного соединения – сварном шве, зоне термического влияния, а также пороговое значение анизотропии коэрцитивной силы. Определено, что пороговые значения величины коэрцитивной силы (сталь 10Г2С1), соответствующие состоянию предразрушения при статической и циклической нагрузке, близки между собою.
4. Установлено влияние двухосного нагружения и пластических деформаций на величину коэрцитивных сил сварного соединения, сварного шва и зоны термического влияния трубчатых образцов (сталь 20), определены пороговые значения коэрцитивных сил в локальных зонах сварного соединения, а также пороговое значение анизотропии коэрцитивной силы.
5. На основе результатов электронно-микроскопических исследований сварных соединений установлено влияние структурных повреждений металла на коэрцитивную силу. Показано, что с увеличением плотности дислокаций и внутренних напряжений, происходит возрастание величины коэрцитивной силы сварного соединения. Это объясняет механизм изменения магнитных свойств металла при эксплуатации сварных конструкций и обосновывает возможность применения магнитного параметра – коэрцитивной силы – для оценки технического состояния

сварных соединений и прогнозирования остаточного ресурса.

6. Разработана математическая модель, устанавливающая связь между геометрическими размерами и коэрцитивной силой сварного шва, ЗТВ, основного металла и сварного соединения, которая дает возможность локальной оценки поврежденности сварных конструкций. Теоретические положения подтверждены исследованиями на разработанной физической модели сварного соединения и реальных образцах кольцевых швов газонефтепроводных труб (сталь 17Г1С).
7. Разработана методика оценки технического состояния сварных соединений трубопроводов с применением магнитного коэрцитиметрического метода, которая состоит в локальной оценке пороговых значений величины коэрцитивной силы сварных соединений на образцах-свидетелях и дальнейшем прогнозировании остаточного ресурса на основе анализа кинетики изменения полученных при мониторинге текущих значений коэрцитивной силы в сварном соединении.
8. Разработанный метод оценки и прогнозирования остаточного ресурса сварных соединений с применением коэрцитиметрического контроля апробирован и получил подтверждение в процессе проведенных испытаний сварных соединений действующего газопровода. Экспериментальные результаты исследований и анализ статистического распределения значений коэрцитивных сил позволили определить его текущее техническое состояние.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Сварные строительные конструкции / ИЭС. – К., 1997. – Т.2: Типы конструкций. Под ред. академика НАН Украины Л. М. Лобанова. – 320 с.
2. Сварные строительные конструкции / ИЭС. – К., 2003. – Т.3. Под ред. академика НАН Украины Л. М. Лобанова. – 250 с.
3. ДСТУ EN 584–1–2001. Неруйнівний контроль. Промислові радіографічні плівки. Частина 1: Класифікація систем плівок для промислової радіографії. – К.: Вид-во стандартів, 2001. – 20 с.
4. ДСТУ EN 584–2–2001. Неруйнівний контроль. Промислові радіографічні плівки. Частина 2: Керування процесом обробки плівки шляхом довідкових величин. – К.: Вид-во стандартів, 2001. – 19 с.
5. Троицкий В.А. Краткое пособие по контролю качества сварных соединений. – К.: Феникс, 2006. – 320 с.
6. ДСТУ EN 12517–2001. Неруйнівний контроль зварних швів. Приймальні критерії для радіографічного контролю зварних з'єднань. – К.: Вид-во стандартів, 2001. – 16 с.
7. ДСТУ EN 444–2006. Неруйнівний контроль. Принципи радіографічного методу контролю металів рентгенівським і гамма-випромінюванням. – К.: Вид-во стандартів, 2006. – 18 с.
8. ДСТУ EN1435–2006 Неруйнівний контроль зварних з'єднань. Радіографія зварних з'єднань (зварювання плавленням). – К.: Вид-во стандартів, 2006.–15 с.
9. Недавний О.И., Удод В. А. Современное состояние систем цифровой рентгенографии // Дефектоскопия. – 2001. – №8. – С. 62–82.
10. Ключев В. В., Соснин Ф. Р. Современное состояние цифровой рентгенотехники // Дефектоскопия. – 1999. – № 4. – С. 56–66.
11. Горшков В. А., Кренинг М., Воробьев В. А. и др. Математический аспект повышения апертурного разрешения и томографии на обратнорассеянном излучении // Дефектоскопия. – 1997. – №5. – С. 69–78.

12. Бару С. Е. Безопасная рентгенография // Наука в России. – 1997. – №4. – С. 12–16.
13. Белова И. Б., Китаев В. М. Цифровые технологии получения рентгеновского изображения: принцип формирования и типы // Мед. визуализация. – 2000. – №1. – С. 33–40.
14. Yaffe M. J., Rowlands J. A. X-ray detectors for digital radiography // Phys. Med. and Biol. – 1997. – V. 42. – №1. – P. 1–39.
15. Троицкий В.А., Валеви́ч М.И. Неразрушающий контроль сварных соединений. – М.: Машиностроение, 1988. – 111 с.
16. В. Белокур И.П., Коваленко В.А. Дефектоскопия материалов и изделий. – К.: Техника, 1989. – 191 с.
17. Гревцев М.А., Негляд В.Н. Современная техника рентгеновского контроля Philips industrial X-Ray GmbH. Опыт эксплуатации рентгеновской техники Philips на Харцызском трубном заводе // Матеріали ІІ Української науково-технічної конф. “Неруйнівний контроль та технічна діагностика”. – Дніпропетровськ (Україна), 1997. – С. 35–42.
18. Бобров В. Т. Развитие акустических методов неразрушающего контроля в исследованиях ученых ВНИИНК // 1-я Национальная научно-техническая конф. и выставка. – Кишинев (Молдова), 2003. – С. 7–23.
19. ДСТУ EN 583–1–2001. Ультразвуковий контроль. Частина 1. Загальні принципи. – К.: Вид-во стандартів, 2001. – 15 с.
20. ДСТУ EN 583–3–2006 Неруйнівний контроль – Ультразвуковий контроль. Частина 3: Метод проходження. – К.: Вид-во стандартів, 2006. – 19 с.
21. Методы акустического контроля материалов / Алешин Н.П., Белый В.Е., Вопилкин А.К., Воцанов И.Н., Ермолов И.Н., Гурвич А.К. – М.: Машиностроение, 1989. – 446 с.
22. Неразрушающий контроль качества сварных соединений и конструкций / В.А.Троицкий, В.И. Радько, В.Г. Демидко, В.Т. Бобров. – К.: Техніка, 1986. – 159 с.

23. Патон Б.Е., Недосека А.Я. Новый подход к оценке состояния сварных конструкций // Автоматическая сварка. – 2000. – №9–10. – С. 97–100
24. Ермолов И. Н. Наиболее интересные направления развития ультразвукового контроля металлов // Дефектоскопия. – 2003. – № 2. – С. 71–100.
25. Ермолов И. Н. Комментарии к британскому стандарту по дифракционно-временному методу контроля // Дефектоскопия. – 2001. – № 6. – С. 3–28.
26. Бархатов В. А. Развитие методов ультразвуковой дефектоскопии сварных соединений // Дефектоскопия. – 2003. – № 1. – С. 28–55.
27. Щербинский В. Г., Алешин Н.П. Ультразвуковой контроль сварных соединений. – М.: МГТУ имени Баумана, 2000. – 496 с.
28. Ермолов И. Н., Вовилкин А. Х., Баделян В. Г. Расчеты в ультразвуковой дефектоскопии. – М.: ООО НПЦ НК “ЭХО+”, 2000. – 109 с.
29. Акустико-эмиссионная диагностика конструкций / А. Н. Серьезнов, Л. Н. Степанова, В. В. Муравьев и др. Под ред. Л.Н. Степановой. – М.: Радио и связь, 2000. – 280 с.
30. Муравьев В.В., Степанова Л. Н., Кареев А. Е. Оценка степени опасности усталостных трещин при акустико-эмиссионном контроле литых деталей тележки грузового вагона // Дефектоскопия. – 2003. – № 1. – С. 63–70.
31. Степанова Л. Н., Муравьев В. В., Кабанов С. И., Лебедев Е. Ю., Кареев А. Е., Кожемякин В. Л. Распределенная многоканальная микропроцессорная акустико-эмиссионная система для прочностных испытаний протяженных объектов контроля // Дефектоскопия. – 2002. – №3. – С. 14–23.
32. Буйло С. И. Использование инвариантных соотношений параметров потока сигналов акустической эмиссии для диагностики предразрушающего состояния твердых тел // Дефектоскопия. – 2002. – №2. – С. 48–53.
33. Буйло С. И. Использование моделей статистической радиофизики для повышения достоверности результатов акустико-эмиссионного метода контроля и диагностики предразрушающего состояния // Дефектоскопия. – 1995. – №7. – С. 13–26.

34. Серьезнов А. Н., Степанова Л. Н., Кабанов С. И., Лебедев Е. Ю. Микропроцессорная АЭ-система для прочностных испытаний авиационных конструкций // Дефектоскопия. – 2002. – №2. – С. 54–61.
35. Степанова Л. Н., Лебедев Е. Ю., Кабанов С. И. Локализация сигналов АЭ при прочностных испытаниях конструкций с использованием пьезоантенны произвольной формы // Дефектоскопия. – 1999. – №9. – С. 47–54.
36. Муравьев В. В., Муравьев М. В., Бехер С. А. Применение новой методики обработки сигналов АЭ для повышения точности локализации дефектов // Дефектоскопия. – 2002. – № 8. – С. 53–65.
37. Кузнецов Н. С. Теория и практика неразрушающего контроля изделий с помощью акустической эмиссии. – М.: Машиностроение, 1998. – 96 с.
38. Лукин Е. С., Иванов А. М., Вайнер Б. Г. Тепловизионные исследования в экспериментальной механике // Дефектоскопия. – 2003. – № 6. – С. 70–76.
39. Шибашкевич Б. Г., Добровольський Ю. Г., Піроженко С. І. Прилади вимірювання характеристик оптичного випромінювання у інфрочервоної, ультрафіолетовій та видимій областях спектра // 12-я Междунар. конф. “Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики”. – Ялта (Украина), 2004. – С. 17–21.
40. Zhong Quyang, Li Wang, Feng Zhang. Rapid, contactless measurement of thermal diffusivity // Non-destructive Characterization of Material VIII. Edited by Robert E. Green Jr. – New York: Plenum Press, 1998. – P. 747–750.
41. Иванов А. М., Семенов Я. С., Лукин Е. С. К методике определения зоны пластической деформации. Диагностика материалов // Заводская лаборатория. – 2001. – Т. 67. – № 10. – С. 55–57.
42. Иванов А. М., Лукин Е. С., Ларионов В. П. К исследованию деформирования и разрушения твердых тел // Докл. РАН. – 2002. – Т. 384. – №4. – С. 469–472.
43. Максимкин О. П., Гусев М. Н., Некоторые особенности диссипации энергии в процессе пластической деформации железа и ниобия // Письма в ЖЭТФ. – 2001. – Т. 27. – №24. – С. 85–89.
44. Pieczyska E. A., Gadaj S. P., Nowacki W. K. Thermorlastic and thermoplastic

- effects during loading and unloading of an austenitic steel // Qirt'98, Proceedings of Eurotherm Seminar No. 60, Lodz (Poland), 1998. – P. 112–116.
45. Oliferuk W. Investigation of metal deformation using thermography // Qirt'98, Proceedings of Eurotherm Seminar No. 60, Lodz (Poland), 1998. – P. 134–139.
46. ДСТУ EN 571–1–2001. Неруйнівний контроль. Капілярний контроль. Частина 1. Загальні принципи. – К.: Вид-во стандартів, 2001. – 18 с.
47. ДСТУ EN 1289–2001. Неруйнівний контроль зварних швів. Капілярний контроль зварних швів. Приймальні критерії. – К.: Вид-во стандартів, 2001. – 14 с.
48. Секерин А. М. Метод сегментации изображений контролируемой поверхности при автоматической регистрации результатов капиллярного контроля // Дефектоскопия. – 2001. – № 1. – С. 84–92.
49. Секерин А. М., Корнев А. П. Применение телевизионной системы в качестве средств визуализации результатов капиллярного контроля // Весці АН Беларусі, сер. фіз., тэхнічных навук. – 1994. – №4. – С. 51–55.
50. Секерин А. М. Применение автоматизированной системы для оценки качества наборов дефектоскопических материалов // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 1998. – №2. – С. 25–31.
51. Chemin P., Ardrex A. Modern engineering achievements in the field of automatic fluorescent penetrant inspection process lines // Proc. 12-th World Conf. on Non-Destructive Testing. – Amsterdam, 1989. – P. 424–426.
52. Маслов Б. Г. Дефектоскопия проникающими веществами. – М.: Высшая школа, 1991. – 256 с.
53. Sekerin A. M., Kornev A. P. Quantitative estimation of Penetrant Systems // Nondestructive Testing Evaluation. – 1997. – P. 325–345.
54. Секерин А. М., Корнев А. П. Метод количественной оценки операции заполнения пенетрантом дефектов // Дефектоскопия. – 1997. – №3. – С. 63–72.
55. Секерин А. М. Применение автоматизированной системы для оценки качества наборов дефектоскопических материалов // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 1998. – №2. – С. 25–31.

- 56.Секерин А. М., Корнев А. П., Стойчева И. В. Оценка эффективности операций предварительной очистки // Дефектоскопия. – 1996. – №10. – С. 102–109.
- 57.Секерин А. М., Корнев А. П. Метод количественной оценки операции заполнения пенетрантом дефектов // Дефектоскопия. – 1997. – №3. – С. 63–72.
- 58.Секерин А. М., Корнев А. П. Влияние операции проявления на эффективность капиллярного контроля // Дефектоскопия. – 1997. – №4. – С. 47–52.
- 59.Sekerin A. M., Kornev A. P. Quantitative estimation of Penetrant Systems // Nondestructive Testing Evaluatin. – 1997. – P. 325–345.
- 60.Мигун Н. П., Прохоренко п. п., Гнусин А. Б. Повышение чувствительности капиллярного контроля путем тепловых воздействий // Дефектоскопия. – 2000. – №5. – С. 75–81.
- 61.Мигун Н. П., Гнусин А. Б. О зависимости чувствительности капиллярного контроля от температурного режима стадии проявления // Дефектоскопия. – 2001. – №6. – С. 93–97.
- 62.ДСТУ EN 1290–2001. Неруйнівний контроль зварних швів. Магнітопорошковий контроль зварних швів. Метод. – К.: Вид-во стандартів, 2001. – 14 с.
- 63.ДСТУ EN 1291–2001. Неруйнівний контроль зварних швів. Магнітопорошковий контроль зварних швів. Приймальні критерії. – К.: Вид-во стандартів, 2001. – 20 с.
- 64.Шелихов Г. С. Влияние коагуляции магнитных частиц на выявляемость дефектов при магнитопорошковом контроле // Дефектоскопия. – 2004. – №6. – С. 57–63.
- 65.Шелихов Г. С. Зависимость выявляемости дефектов от распределения намагничивающего поля в зоне дефекта // Дефектоскопия. – 2004. – №6. – С. 52–56.
- 66.Ruud C. O. A review of selected nondestructive methods for residual stress measurement. – 1985. – V. 15. – P. 15–23.
- 67.Hilley M. E. et al. Residual stress measurements by X-ray diffraction // SAE Information Rep. J. 784a. – Pennsylvania: SAE, 1971. – P. 120–135.

68. Residual stress measurement by X ray diffraction // SAE J784a. Society Auto Engineering Handbook Supplement. – 1971. – P. 117–121.
69. Alien A. J., Hutchings M. T., Windsor C. G. Neutron diffraction method for the study of residual stress fields // Adv. Phys. – 1985. – V. 34. – P. 445–473.
70. King R. B., Fortunko C. M. Determination of in plane residual stress states in plates using horizontally polarized shear waves // J. Appl. Phys. – 1983. – V. 54. – P. 3027–3035.
71. Deputat J., Adamski M., Goljasz J., Kalisiewicz J. Ultrasonic technique for investigation of residual stresses in cylindrical forgings // Eng. Transactions. – 1993. – V. 41. – No. 1. – P. 61–76.
72. James M. R., Buck O. Quantitative nondestructive measurement of residual stress. CRC Critical Rev // Solid State & Materials Sci. – 1980. – V.9. – No.1. – P. 61–105.
73. Degtyar A. D., Lavrentyev A. I., Rokhlin S. I. New method for determination of applied and residual stresses in anisotropic materials from ultrasonic velocity measurement // Mat. Eval. – 1997. – V. 55. – No.10. – P. 1162–1168.
74. Thompson R. B., Wormley S.J. Experience in stress measurement with the SH wave technique // In: Pressure Vessels and Piping. – V.12. – Determining Material Characterization: Residual Stress and Integrity with NDE. – ASME. – 1994. – P. 163–167.
75. Bray Don I., Ultrasonic stress measurement and material characterization in pressure vessels, piping and welds // Trans. of the ASME. – 2002. – V. 124. – P. 326–335.
76. Ключев В. В. Технические средства диагностики. – М., 2001. – 156 с.
77. Касаткин Б. С., Кудрин А. Б., Лобанов Л. М. и др. Экспериментальные методы исследования напряжений и деформаций. – Киев, 1984. – 251 с.
78. Гуца О. И. Основы ультразвукового неразрушающего метода определения напряжений в твердых телах. – К., 1974. – 140 с.
79. Э.С. Горкунов. Магнитные приборы контроля структуры и механических свойств стальных и чугуновых изделий // Дефектоскопия. – №8. – 1991. – С. 56–71.

80. Аркадьев В. К. Избранные труды. – М.: Изд-во Академии наук СССР. – 1961. – 331 с.
81. Вонсовский С. В. Динамические и кинетические свойства магнетиков / АН СССР Ин-т физики металлов УНЦ АН СССР. – М.: Наука. – 1986. – 248 с.
82. Вонсовский С. В. Магнетизм. – М.: Наука, 1984. – 208 с.
83. Френкель Я. И. Собрание избранных трудов. – М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1956. – 354 с.
84. Дорфман Я. Г. Магнитные свойства и строение вещества. – М.: Гостехиздат, 1955. – 376 с.
85. Акулов Н. С. Исследования по физике металлов и неразрушающим методам контроля. – Минск: Наука и техника, 1968. – 123 с.
86. Кондорский Е. И. Зонная теория магнетизма. – М.: Изд-во Московского Университета, 1977. – 93 с.
87. Белов К. П. Магнитострикционные явления и их техническое применение. М.: Наука, 1987. – 159 с.
88. Янус Р. И. Исследования в области теоретического и прикладного магнетизма. – Свердловск, 1967. – 217 с.
89. Бозорт Р. Ферромагнетизм / Пер. с англ. Под ред. Кондорского Е. И. и Лившица Б. Г. – М.: ИЛ, 1956. – 784 с.
90. Тикадзуми С. Физика ферромагнетизма. – М.: Мир, 1987. – 420 с.
91. Садовский В. Д. Структурная наследственность стали. – М.: Metallurgy, 1973. – 208 с.
92. Апаев Б. А. Фазовый магнитный анализ сплавов. – М.: Metallurgy, 1976. – 281 с.
93. Михеев М. Н. Магнитные методы неразрушающего контроля. – Свердловск, 1979. – 117 с.
94. М. Н. Михеев. Связь магнитных свойств со структурным состоянием вещества - физическая основа магнитного структурного анализа // Дефектоскопия. – №8. – 1981. – С. 17–25.

95. Неразрушающий контроль: В 5 кн. – М., 1992. – Кн. 3: Электромагнитный контроль. Под ред. В. В. Сухорукова. – 160 с.
96. Goldfine N.J., Melcher J. R. Magnetometer having periodic winding structure and material property estimator / U.S. Patent No. 5.453.689. – Sep.26. 1995.
97. Zilberstein V., Fisher M., Grundy D. et al. Residual and applied stress estimation from directional magnetic permeability measurements with MWM sensors // ASME J. Pressure Vessel Techn. – 2002. – P. 127–136.
98. Burkhardt G. L., Beissner R. E., Matzkanin G. A., King J. D. Acoustic methods for obtaining Barkhausen noise stress measurements // Mat. Eval. – 1982. – V. 40. – No. 6. – P. 669–675.
99. Vengrinovich V. L., Vishnevsky A., Knya.zcv M. The principles of depth analysis of surface hardened layers by magnetic noise method // J. Res. in NDE. – 1992. – V. 4. – No. 1. – P. 19–27.
100. Tsukerman V., Vengrinovich V. Stress and texture measurements using Barkhausen noise and angular scanning of driving magnetic field // In: 16 WCNDT/Book of Abstracts. - Montreal (Canada), 2004. – P. 95–99.
101. Altpeter I., Bender J., Hoffmann J., Kopp M. Die Barkhausenrausch und Wirbelstrom-mikroskopie eine neue Rastersondentechnik zur Werkstoffcharakterisierung im Mikrometerbereich // Mat. Eval. – 1995. – V. 41. – No. 6. – P. 569–575.
102. Parakka A., Ihles D. C., Gupta H., Jahes S. Estimation of grinding burn damage using Barkhausen technique // In: Review of progress in quantitative nondestructive evaluation. – V. 15 / Ed. by D Thompson. D. Chimenti. - N.Y.: Plenum Press., 1996. – P. 1547–1550.
103. Mourglia M., Wojtas A., Bruno E.. Improvement of the quality inspection of aerospace bearings using the magnetic Barkhausen noise analysis // In: Proc. IV Int. Conf. Barkhausen Noise and Micromagnetic Testing. – Brescia (Italy), 1996. – P. 131–150.
104. Chanpagne V., Sincebaugh P., Pepi M., Snoha D. Detection of thermal damage in X2M gear steel using Barkhausen noise analysis // Ibid. – 1996. – P. 39–47.

105. Marconi P., Lauro M., Bozzolo W. Shot peening on pelton wheels: methods of control and results // In: Proc. IV Int. Conf. Barkhausen Noise and Micromagnetic Testing. - Brescia (Italy), 1996. – P. 151–158.
106. Jo J., Caudill G., Santos R. Nondestructive evaluation of navy structural components using BN analysis // Naval Eng. J. – 1994. – P. 71-75.
107. Венгринович В. Л., Князев М. А., Вишневский А. Л. Вычислительная диагностика поверхностно упрочненных слоев ферромагнетиков // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 1992. – №1. – С. 32–37.
108. Vengrinovich V., Nardoni G. Application of nondestructive techniques for internal stress measurements and monitoring based on Barkhausen effect and other physical techniques // J. of Pressure Vessels and Piping. –2003. – V.429. – P. 85–93.
109. Дубов А. А. Способ определения предельного состояния металла и ресурса оборудования с использованием параметров магнитной памяти металла // Труды Междунар. конф. “Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики”. – Ялта (Украина), 2001. – С. 56–71.
110. Дубов А. А., Демин Е. А., Морозов Э. П., Муравская Н. П., Сахаров К. Ю. Прибор для определения зон концентрации остаточных напряжений в изделиях машиностроения и на оборудовании с использованием магнитной памяти металла // Тр. Междунар. конф. “Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики”. – Ялта (Украина), 2001. – С. 40–52.
111. Дубов А. А., Демин Е. А., Морозов Э. П., Муравская Н. П., Сахаров К. Ю. Прибор для определения зон концентрации остаточных напряжений в изделиях машиностроения и на оборудовании с использованием магнитной памяти металла // Тр. Междунар. конф. “Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики”. – Ялта (Украина), 2001. – С. 17–21.
112. Хромченко Ф. А. Ресурс сварных соединений паропроводов. - М.: Машиностроение, 2002. – 352 с.

113. Щербинин В. Е., Мужичкий В. Ф., Кулеев В. Г. О «новых физических эффектах» открытых А. А. Дубовым и В. Т. Власовым // Контроль. Диагностика. – № 9. – 2003. – С. 44–56.
114. Blaszkiewicz M., Albertin L., Junker W. The eddy current technique for determining residual stresses in steels // In: Mat. Sci. Forum. – V. 210–213. – Switzerland: Transtec Publications, 1996. – P. 179–185.
115. Schoemg Jr., Frederick C., Jack A. et al. Eddy current measurement of residual stresses induced by shot peening in titanium Ti-6Al-4V // Mat. Eval. – 1966. – No. 1. – P. 22–26.
116. Ремонт магистральных и промысловых газопроводов. Справочное пособие / Под ред. А. И. Степаненко. – К., 1996. – 192 с.
117. Дубов А. А. Новое направление в диагностике трубопроводов на основе использования магнитной памяти металла. – М.: НПО Энергодиагностика, 1998. – 160 с.
118. Неесбитт Е., Верник Д. Ж. Постоянные магниты на основе редкоземельных элементов. – М.: Мир, 1977. – С. 5–18.
119. Гудинаф Дж. Магнитная структура ферромагнетиков / Под ред. С. В. Вонсовского. – М.: ИЛ, 1959. – С. 19–57.
120. Матвеев Н.Н. Электричество и магнетизм. – М.: Высшая школа, 1983. – 463 с.
121. Белов Е. М., Велиюлин И.И., Лобанов В.П. Бесконтактный способ обнаружения дефектов в металле труб действующего трубопровода // Сборник трудов 6-ой Международной встречи “Диагностика-96”. – К.: Либідь, 1996. – 124 с.
122. Безлюдько Г. Я., Ковбасенко С. Н., Корниец В. В. Диагностика сварных соединений ядерных энергоблоков с помощью магнитных методов оценки ресурса металла // Сварщик. – №2(42). – 2005. – С. 56–62.
123. Недосека А. Я. Основы расчета и диагностики сварных конструкций / Под ред. Б. Е. Патона. – К.: А/О “Книга”. – 2001. – 840 с.

124. Takahashi S., Echigoya J., Motoki Z. Magnetization curves of plastically deformed Fe metals and alloys // Journal of applied physics. – V. 87. – No. 2. – 2000. – P. 805–813.
125. Мельгуй М. А. Магнитный контроль механических свойств сталей / Под ред. Н. Н. Зацепина. – Минск: Наука и техника, 1980. – 184 с.
126. P. Weiss. Journ.de phys. et rad. – 1907. – No. 6. – 661 p.
127. Р. Бернер, Г. Кронмюллер Пластическая деформация монокристаллов. – М.: Мир. – 1969. – 242 с.
128. Горкунов Э. С., Захаров В. А. Коэрцитиметры с приставными магнитными устройствами // Дефектоскопия. – 1995. – №8. – С. 69–88.
129. Неруйнівний контроль і технічна діагностика / Під ред. З. Т. Назарчука – Львів: ФМІ, – 2001. - 1134 с.
130. Венгринович В. Л. Магнитошумовая структуроскопия. – Минск.: Наука і тэхніка, 1991. – 285 с.
131. Михеев М. Н., Горкунов Э. С. Магнитные методы структурного анализа и неразрушающего контроля / Рос. АН, Урал. отд-е, Ин-т физики металлов. — М.: Наука, 1993. — 249 с.
132. Назарчук З. Т. Сучасний стан і тенденції розвитку фізичних методів неруйнівного контролю // Матер. наук.-практ. семінару “Протикорозійний захист трубопроводів і споруд та методи контролю, КТС–98”. – Львів, 1998. – С. 9–20.
133. Безлюдько Г. Я. Из опыта работы организации харьковского региона в области контроля состояния, прогноза работоспособности и остаточного ресурса промышленных объектов // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 1998. – № 3. – С. 56–61.
134. Чебанов Е. В., Горделый В. И. Изучение нормальных волн, распространяющихся в трубопроводах, излучаемых ЭМА-преобразователями // 1-я Национальная научно-техническая конф. и выставка. – Кишинев (Молдова), 2003. – С. 26–34.

135. Прочность сварных соединений при переменных нагрузках / Под. Ред. В. И. Труфякова. – К.: Наукова думка, 1990. – 256 с.
136. Лютак З. П. Оцінка напружено-деформованого стану магістральних газопроводів ультразвуковим методом // Матеріали конференції “Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики промислового обладнання”. – Івано-Франківськ, 1999. – С. 26–34.
137. Оценка допустимой дефектности нефтепроводов с учетом их реальной нагруженности // Стр-во трубопроводов. – 1991. – №12. – С. 37–41.
138. Абоулин И. Г., Гареев А. Г., Худяков М. А. Анализ стадий зарождения и развития малоциклового коррозионной усталости металла магистральных нефтепроводов // Трубопроводный транспорт нефти. – 1999. – № 6. – С. 31–34.
139. Сосновский Л. А., Воробьев В. В. Влияние длительной эксплуатации на сопротивление усталости трубной стали // Проблемы прочности. – 2000. – № 6. – С. 18–26.
140. Неразрушающий контроль труб магистральных трубопроводов / Гончаров Ю. Г., Ефименко С. П., Малинка А. В., Кариус и др. / Под ред. Сергеева Г. Н., Вайсвелера Ф. И. – М.: Металлургия, 1985. – 248 с.
141. Белсон Ф.С. Заглубленные сооружения: статическая и динамическая прочность. – М.: Стройиздат, 1991. – 158 с.
142. Современная геодинамика и нефтегазоносность / под ред. Крылова Н.А., Сидорова В.А. – М.: Наука, 1989. – 230 с.
143. Кравцов В.В., Никонов А.И., Ромашов А.А. Геодинамическая цикличность как фактор проявления аварийности природно-техногенных систем в нефтегазоносных районах // Материалы II-й Междунар. конф. “Циклы природных процессов, опасные явления и экологическое прогнозирование”. – Выпуск 8. – М., 1994. – С. 32–39.
144. Кострюкова Н.К., Кострюков О.М. О повторяющейся аварийности и других негативных явлениях в связи с фактором природного риска - современно активными разломами земной коры // Материалы Междунар. конф. “Горные науки на рубеже XXI века”. – Екатеринбург, 1998. – С. 439–444.

145. Новиков В.Ф., Кострюкова Н.К., Кострюков О.М., Болотов А.А. Определение динамики напряжений в трубопроводах при суточных движениях элементов земной коры // Изв. вузов. Нефть и газ. – 1999. – №5. – С. 65-72.
146. Кострюкова Н.К., Новиков В.Ф., Кострюков О.М., Ершов С.П. Определение напряженного состояния металла труб под воздействием зон локальных разломов // Изв. вузов. Нефть и газ. – 2001. – №1. – С. 82–93
147. Бурымский В. К., Гирнык В. А., Дыскин Э. М., Лилак Н. Н., Ткаченко Н. А., Юхимец П. С. Обследование трубопроводов ахтырского НГДУ. // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2000. – №4. – С. 26–31.
148. Лобанов Л. М., Бондаренко Ю. К., Безлюдько Г. Я, Бондаренко А. Ю. Оценка усталостного состояния и остаточного ресурса сварных соединений неразрушающими магнитными методами для обеспечения качества сварных конструкций и изделий // Материалы 54-й ежегодной конф. Международного Института Сварки. – Словения, 2001. – С. 35–41.
149. Мужичкий В. Ф., Бондаренко Ю. К., Бондаренко А. Ю., Безлюдько Г. Я. Об оценке усталостного состояния и остаточного ресурса сварных соединений неразрушающим магнитным методом. Материаловедческие аспекты // Материалы 3-й Междунар. конф. “Диагностика трубопроводов”. – Москва, 2000. – С. 11–14.
150. Безлюдько Г. Я., Елкина Е. И., Попов Б. Е., Бондаренко А. Ю. Контроль усталостного состояния и ресурса металлоконструкций, оборудования и линейных участков магистральных трубопроводов магнитными структуроскопами КРМ-Ц // Тезисы докладов научно-технического семинара “Повышение эксплуатационной надежности магистральных трубопроводов газотранспортной системы ДК “Укртрансгаз”. – Киев (Украина), 2002. – С .25–29.
151. Калашников С.А. Влияние условий эксплуатации на усталостную прочность оболочковых конструкций из стали 09Г2С: Дис. канд. техн. наук. – Уфа, 1998. – 127 с.

152. Наумкин Е.А. Оценка долговечности аппаратов, подверженных малоцикловой усталости, по скорости ультразвука (на примере стали 09Г2С): Дис. канд. техн. наук. – Уфа, 2000. – 116 с.
153. Даровский Ю. Ф., Маркашова Л. И., Абрамов Н. П. и др. Метод препарирования для электронно–микроскопических исследований. // Автоматическая сварка. – 1985. – №12. – С. 60–64.
154. Хирш П., Хови А., Николсон Р., Пэшли Д., Уэлан М. Электронная микроскопия тонких кристаллов. – М.: Мир, 1968. – 574 с.
155. Конева Н.А., Лычагин Д.В., Теплякова Л.А., Козлов Э. В. Теоретическое и экспериментальное исследование дислокаций. – Л.: Изд-во ЛФТИ. – 1986. – 116 с.
156. Келли А. Высокопрочные материалы. – М.: Мир, 1976. – 261 с.
157. Иванова С. В. Природа усталости металлов. – М.: Metallurgiya. – 1979. – 454 с.
158. Бондаренко А. Ю., Бойчук С. И. Проблемы применения магнитных методов испытаний при мониторинге сварных конструкций // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2000. – №4. – С. 17–25.
159. Бондаренко А. Ю. Прогнозирование ресурса ответственных сварных конструкций на стадии эксплуатации // Тезисы Междунар. научной конференции “Сварные конструкции”. – Киев, 2000. – С. 71–74.
160. Бондаренко Ю. К., Ковальчук О. В., Бондаренко А. Ю. Обеспечение качества выполнения технических услуг по неразрушающему контролю и технической диагностике – главная проблема управления качеством при изготовлении, эксплуатации и ремонте сварных конструкций // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2000. – №2. – С. 60–66.
161. Бондаренко А. Ю. Об оценке остаточного ресурса сварных соединений магнитным методом для обеспечения качества сварных конструкций и изделий // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2002. – №2. – С. 17–25.
162. Lobanov L. M., Bondarenko A. Yu., Bondarenko Yu. K. About evaluation of

- residual life of welded joints using magnetic method for monitoring of welded structures // Proc. International annual 55 Conf. of International Institute of Welding. – Denmark, 2002. – P. 1-8.
163. Лобанов Л. М., Бондаренко Ю. К., Бондаренко А. Ю. Оценка остаточного ресурса сварных соединений магнитным методом для обеспечения качества магистральных нефтегазопроводов // Материалы 10-й юбилейной Междунар. конф. “Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики”. – Ялта (Украина), 2002. – С. 51–62.
164. Лобанов Л. М., Бондаренко А. Ю., Бондаренко Ю. К. Мониторинг состояния сварных соединений для прогнозирования остаточного ресурса магистральных нефтегазопроводов // Материалы 3-й научно-технической конф. “Современные приборы, материалы, технологии для неразрушающего контроля и технической диагностики промышленного оборудования”. – Ивано-Франківськ, (Украина), 2002. – С. 35–43.
165. Бондаренко А. Ю. Мониторинг состояния сварных соединений для прогнозирования остаточного ресурса магистральных нефтегазопроводов // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2003. – №1. – С. 20–24.
166. Бондаренко А. Ю. К вопросу оценки состояния сварного шва на основе анализа характеристик магнитного метода как элемента прогнозирования индивидуального остаточного ресурса // Материалы 4-й Национальной научно-технической конф. “Неразрушающий контроль и техническая диагностика”. – Киев (Украина), 2003. – С. 242–245.
167. L. M. Lobanov, A. Yu. Bondarenko, Yu. K. Bondarenko Residual life evaluation of welding joints using a magnetic method for monitoring of welded structures // Welding in the world. – 2003. – Volume № 1/2. – P. 7–10.
168. Бондаренко А. Ю. Оценка состояния сварного шва на основе анализа характеристик магнитного метода для прогнозирования индивидуального остаточного ресурса // Материалы 11-й Междунар. конф. “Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики”. – Ялта (Украина), 2003. – С. 101–104.

169. Лобанов Л. М., Бондаренко А. Ю., Бондаренко Ю. К. Оценка сварных соединений конструкций магнитным (коэрцитиметрическим) методом для прогнозирования индивидуального остаточного ресурса // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2004. – №1. – С. 1–6.
170. Lobanov L. M., Bondarenko A. Yu., Bondarenko Yu. K. Assessment of welded joints of structures using magnetic (coercimetric) method to predict the individual residual life // Proc. International annual 57 Conf. of International Institute of Weldeng. – Japan, 2004. – P. 1-7.
171. Бондаренко А. Ю. Обсуждение проблемы остаточного ресурса сварных конструкций на встрече ученых НАН Украины с журналистами // Автоматическая сварка. – 2004. – №1. – С. 66–68.
172. Лобанов Л. М., Бондаренко А. Ю., Бондаренко Ю. К. К вопросу оценки сварных соединений конструкций магнитным (коэрцитиметрическим) методом для прогнозирования индивидуального остаточного ресурса // Материалы 12-й Междунар. конф. “Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики”. – Ялта (Украина), 2004. – С. 126–132.
173. Бондаренко Ю. К., Фурман Я. М., Бондаренко А. Ю., Ковальчук О. В. Проблемы определения ресурса сварных конструкций // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2006. – №1. – С. 37–41.
174. Лобанов Л. М., Бондаренко А. Ю., Бондаренко Ю. К. Влияние срока эксплуатации газопроводов на магнитные свойства сварных соединений // Материалы 5-й Национальной научно-технической конф. “Неразрушающий контроль и техническая диагностика”. – Киев (Украина), 2006. – С. 239–245.

Протокол
анализа проектной документации обследуемого трубопровода, условий и
режимов эксплуатации

1. Наименование предприятия
2. Наименование трубопровода
3. Дата введения трубопровода в эксплуатацию
4. Рабочее давление трубопровода
5. Марка стали труб
6. Диаметр трубопровода
7. Толщина стенки труб
8. Способ сварки стыковых кольцевых соединений трубопровода
9. Режимы сварки
10. Сварочные материалы
11. Вид и размеры разделки кромок
12. Размеры сварного шва
13. Режимы эксплуатации трубопровода
14. Условия эксплуатации трубопровода
15. Список использованной документации для заполнения пп. 1-12.

Дата

Должность

Фамилия

Подпись

**Протокол
испытаний образцов-свидетелей**

1. Наименование испытательной лаборатории
2. Сертификат аккредитации
3. Наименование испытательного стенда
4. Марка стали образца
5. Ширина образца в рабочей зоне
6. Толщина образца
7. Длина рабочей зоны образца
8. Способ сварки образца
9. Режимы сварки
10. Вид и размеры разделки кромок
11. Размеры сварного шва
12. Результаты механических испытаний (σ_T , σ_B , $\epsilon_{ост}$)
13. Модель коэрцитиметра
14. Результаты измерений

Таблица 1

Состояние образца	Средние значения коэрцитивной силы в позициях измерения, А/м		
	1-1	2-2 и 2'-2'	3-3 и 3'-3'
в исходном состоянии			
при напряжении равном σ_T			
при напряжении равном σ_B			

15. Результаты расчета

Таблица 2

Состояние образца	Величина коэрцитивной силы, А/м	
	Сварного шва	ЗТВ _{1,2}
в исходном состоянии		
при напряжении равном σ_T		
при напряжении равном σ_B		

16. Интервалы значений коэрцитивных сил зон надежности эксплуатации

Таблица 3

Зона надежности эксплуатации	Величина коэрцитивной силы, А/м	
	Сварного шва	ЗТВ _{1,2}
Надежная $[H_c]_0 < H_c < [H_c]_T$		
Опасная $[H_c]_T \leq H_c < [H_c]_B$		

Дата

Должность

Фамилия

Подпись

Протокол
испытаний сварного соединения №__ трубопровода

1. Результаты измерений и ранжирования

Таблица 1

Образующая №	Средние значения коэрцитивной силы в позициях измерения, А/м				
	1-1	2-2	2'-2'	3-3	3'-3'
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
Зоны надежности эксплуатации (надежная/ опасная)					

2. Результаты расчета и ранжирования

Таблица 2

Образующая №	Величина коэрцитивной силы, А/м		
	Сварного шва	ЗТВ ₁	ЗТВ ₂
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
Зоны надежности эксплуатации (надежная/ опасная)			

3. Результаты прогнозирования остаточного ресурса сварного соединения

Таблица 3

Параметр	Предыдущие обследования			Текущее обследование
	№ 1	№ 2	№ 3	
Время эксплуатации трубопровода, лет				
Прогнозируемый срок эксплуатации, лет				
Остаточный ресурс, лет				

Вывод:

1. Сварное соединение отнесено к группе надежной / опасной эксплуатации.
2. Остаточный ресурс сварного соединения составляет ____ лет.

Дата

Должность

Фамилия

Подпись

Акт
испытаний сварных соединений трубопровода

1. Наименование предприятия
2. Наименование трубопровода
3. Дата введения в эксплуатацию
4. Рабочее давление
5. Марка стали труб
6. Диаметр
7. Общее количество испытанных сварных соединений
8. Количество сварных соединений отнесенных к группе надежной эксплуатации
9. Количество сварных соединений отнесенных к группе небезопасной эксплуатации
10. Остаточный ресурс сварных соединений трубопровода составляет от ____ до ____ лет.
11. Результаты статистического сравнительного анализа результатов мониторинга сварных соединений трубопровода

Таблица 1

Параметр		Предыдущее обследование	Текущее обследование	Изменение, %
Дисперсия	Hc^{3TB}			
	Hc^{III}			
Среднее арифметическое	Hc^{3TB}			
	Hc^{III}			
Размах вариации	Hc^{3TB}			
	Hc^{III}			
Среднее отклонение	Hc^{3TB}			
	Hc^{III}			
Коэффициент линейной вариации	Hc^{3TB}			
	Hc^{III}			

Дата

Должность

Фамилия

Подпись

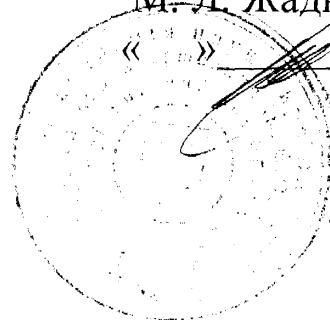
НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ИНСТИТУТ ЭЛЕКРОСВАРКИ ИМ. Е. О. ПАТОНА

Утверждаю

Зам. директора

Член-корреспондент НАНУ

М. Л. Жадкевич



« » 2007 г.

**МЕТОДИКА ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНОГО
РЕСУРСА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТРУБОПРОВОДОВ С
ПРИМЕНЕНИЕМ МАГНИТНОГО КОЭРЦИТИМЕТРИЧЕСКОГО
МЕТОДА**

Киев 2007