На правах рукописи

БАХАРЕВ Михаил Самойлович

Разработка методов и средств измерения механических напряжений на основе необратимых и квазиобратимых магнитоупругих явлений

05.11.13.- приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий

ΑΒΤΟΡΕΦΕΡΑΤ

диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук

2004

Работа выполнена в Тюменском государственном нефтегазовом университете

Научный консультант:	
Доктор физматнаук,	Новиков В.Ф.
заслуженный работник	Тюменский государственный
высшей школы, профессор.	нефтегазовый университет.
	г. Тюмень
Официальные оппоненты :	
Доктор технических наук,	Семенов В.С.
профессор	Сибирский физико-технический
	Институт при ТГУ, г.Томск
Доктор технических наук,	Корзунин Г.С.
профессор, заслуженный деятель	Институт физики металлов УрО РАН,
науки и техники РФ	г. Екатеринбург
Доктор технических наук	Ульянов А.И.
	Физико-технический институт,
	УрО РАН г.Ижевск.
Ведущее предприятие:	Уральский государственный техниче-
	ский университет – УПИ
	г.Екатеринбург

Защита состоится 6 декабря 2004 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета по защите докторских диссертаций Д 212.269.09 в Томском политехническом университете по адресу: Россия, 634028, г.Томск, ул. Савиных, 7, корпус № 18 ТПН, библиотека НИИ Интроскопии.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Томского политехнического университета по адресу: г.Томск, ул.Белинского 53.

Автореферат разослан «<u>06</u>» ноября 2004 г.

Ученый секретарь диссертационного Совета

Б.Б. Винокуров

Актуальность работы

Проблема обеспечения безаварийной работы оборудования, машин и механизмов в нефтяной и газовой промышленности становится все более острой по ряду причин: большой срок эксплуатации оборудования, велики экономические затраты на ликвидации аварий и санкций за нанесенный экологический ущерб. Широко применяемые при конструировании расчетные методы далеко не безупречны уже при штатных ситуациях и их надежность уменьшается при изменяющихся и не в полной мере предсказуемых условиях. Примеры тому разрушение Московского аквапарка и конструкций аэропорта в Париже, а общее количество аварий на нефтепроводах в Российской Федерации составило 27408 в 2002 году и 28523 в 2001 году. По данным Министерства природы только за 2003 год по Ханты-Мансийскому автономному округу было официально зафиксировано 1450 разрывов нефтепромысловых трубопроводов. Поэтому все больше внимания стали уделять неразрушающему контролю (НК) состояния металла конструкций. Одним из важнейших контролируемых параметров является уровень напряжений в металле конструкций, определение которых представляет собой сложную научно-техническую задачу.

Элементы машин, механизмов, конструкций, трубопроводы испытывают во времени целый ряд изменений, приводящих к варьированию их напряженного состояния. В результате совместного действия внутренних и рабочих напряжений создаются зоны концентрации напряжений и предпосылки для разрушения металла и возникновения аварий. Все это подчеркивает актуальность неразрушающего контроля (НК) напряженного состояния металлоконструкций.

Требует изучения влияние на надежность металлоконструкции медленно изменяющихся напряжений на фоне статически действующей нагрузки. Даже, если величина таких напряжений заметно меньше предела текучести, их роль велика в механизме усталостного малоциклового и стресс-коррозионного разрушения металла.

На основании сказанного становится понятным то большое внимание, которое уделяется разработке неразрушающих методов и средств измерения напряжений, которое проводится отечественными и зарубежными учеными и специалистами. Назначение этих методов заключается в том, чтобы, не зная исходного состояния металла, определять абсолютную величину действующих в нем напряжений и по этой информации предсказывать «судьбу» металла: опасность перегрузок, заход в зону пластичности, риск разрушения, ресурс долговечности и др.

Усилия ученых направлены на поиск новых методов и параметров контроля напряжений и на совершенствование уже известных: рентгеновских, акустических, магнитных и оптических методов.

Магнитоупругие явления, связанные с изменением метастабильного состояния ферромагнетика при нагружении (пьезодинамическое размагничивание или магнитоупругая память), привлекают своей перспективностью для целей диагностики напряженно-деформированного состояния металла. Это обусловлено, прежде всего, возможностью применения статических и медленно меняющихся магнитных полей, глубина проникновения которых в металл обусловлена размерами как конструкции, так и намагничивающего устройства. И здесь особенно важно изучение закономерностей необратимых магнитоупругих явлений, которые открывают новые возможности для измерения действующих сил и напряжений и создания новых первичных преобразователей.

Коэрцитиметрический метод измерения механических напряжений, в котором применяется медленно изменяющееся магнитное поле, приобретает актульность в связи с появлением новых более совершенных коэрцитиметров, но требует своего развития в уменьшении мешающих измерению напряжений факторов, прежде всего вариаций химического состава и структуры металла.

В мире идет интенсивный поиск «интеллектуальных» материалов и основанных на них методов преобразования силового (в том числе ударного) воздействия в электрический сигнал и создания датчиков, способных работать в экстремальных условиях. Практически не исследованным направлением является создание на основе магнитоупругой памяти и пьезомагнитного эффекта остаточно намагниченного ферромагнетика автономных датчиков силы, давления, ускорения, способных работать в экстремальных условиях и без источников питания.

Диссертационная работа ориентирована на поиск новых параметров НК механических напряжений в металлоконструкциях на основе исследования закономерностей изменения магнитоупругих свойств, на разработку новых «интеллектуальных» материалов, методов и средств измерения напряжений в металле с тем, чтобы повысить точность и надежность измерений, существенно расширить их возможности.

Направлением исследования явилось изучение метастабильных магнитоупругих явлений в остаточно намагниченном магнетике, разработка на этих принципах методов НК напряжений и создание силовых преобразователей.

Цель и задачи работы

Целью диссертации является разработка магнитных методов и средств НК механических напряжений в металлоконструкциях на основе необратимых и квазиобратимых магнитоупругих явлений, создание новых первичных преобразователей силы.

Основные задачи исследований:

- Исследование влияния химического состава сталей на величину анизотропии коэрцитивной силы при их растяжении и сжатии. Анализ механизма влияния на величину коэрцитивной силы изменения размеров доменов при нагружении.
- 2. Исследование возможности использования магнитострикции в качестве второго метрологического параметра неразрушающего контроля (НК) напряжений. Разработка способа определения эффективных констант магнитострикции поликристаллических материалов (сталей) по экспериментальной зависимости магнитострикции от напряженности магнитного поля.

- Получение формулы для описания зависимости анизотропии коэрцитивной силы от величины напряжений при растяжении образцов из малоуглеродистых сталей путем введения в качестве дополнительного метрологического параметра константы магнитострикции.
- Исследование и уточнение закономерности изменения магнитоупругой памяти (МУП) на высокохромистой стали и композиционных R-Fe материалах, установление связи необратимого изменения остаточной намагниченности с основными магнитными параметрами.
- 5. Изучение влияния температуры отпуска закаленных конструкционных сталей и химического состава композиционных R-Fe материалов на величину квазиобратимого магнитоупругого изменения остаточной намагниченности под действием больших циклически повторяющихся упругих напряжений для использования явления в качестве параметра неразрушающего контроля (НК) напряжений и качества термической обработки.
- Определение величины механических напряжений в металле конструкций по магнитному полю рассеяния конструкции и матрицы локальной намагниченности.
- 7. Математическое моделирование выходного сигнала магнитоупругого преобразователя.
- Разработка новых материалов для создания запоминающего чувствительного элемента датчиков. Разработка автономных первичных преобразователей силы, давления и ускорения на основе исследованных магнитоупругих эффектов.

Научная новизна работы

 Впервые установлена зависимость магнитоупругого изменения анизотропии коэрцитивной силы от величины константы магнитострикции. Найден способ определения эффективных констант магнитострикции по экспериментальной зависимости магнитострикции поликристаллических материалов от напряженности магнитного поля.

- Создан новый двухпараметровый метод неразрушающего контроля (НК) одноосных напряжений на основе измерения коэрцитивной силы и константы магнитострикции в конструкциях из малоуглеродистых сталей, отличающихся по химическому составу.
- 3. Впервые проведены исследования магнитоупругой памяти (МУП) высокохромистой стали и композиционных RFe-материалов, уточнены аналитические выражения для ее описания.
- 4. Впервые исследован пьезомагнитный эффект остаточно намагниченного магнетика ПМО при приложении больших циклически повторяющихся упругих напряжений, дано объяснение механизма ПМО и установлена возможность его применения для целей определения механических напряжений и НК качества термической обработки.
- 5. Разработан ряд «интеллектуальных» материалов для создания чувствительных автономных элементов запоминающих датчиков пикового значения силы, давления и ускорения, способных работать в экстремальных условиях.
- Решена задача гармонического разложения ЭДС выходного сигнала нагружаемого ферромагнитного преобразователя.
- Разработан магнитный метод НК сезонных деформаций стального трубопровода.

На защиту выносятся следующие положения:

 Аналитические выражения, описывающие связь анизотропии коэрцитивной силы с величиной одноосных напряжений и магнитострикцией малоуглеродистых сталей. Новый двухпараметровый метод НК одноосных напряжений в изделиях из малоуглеродистых сталей.

- Методика определения эффективных констант магнитострикции по экспериментальной графической зависимости магнитострикации от величины напряженности магнитного поля.
- Проверка и уточнение закономерностей изменения МУП и связь ее с основным магнитными параметрами у высокохромистой стали и композиционных R-Fe-материалов.
- Объяснение механизма ПМО конструкционных сталей и композиционных R-Fe-материалов при приложении больших циклически повторяющихся упругих напряжений.
- 5. Разработка метода НК напряжений в металлоконструкциях с помощью создания матрицы локальных областей намагниченности.
- Гармонический анализ ЭДС выходного сигнала магнитоупругого преобразователя.
- Конструкционные разработки автономных запоминающих датчиков пикового значения силы, давления и ускорения.
- 8. Разработка способа измерения сезонных деформаций грунта и стального газопровода путем отслеживания его магнитных полей рассеяния.

Практическая ценность работы

— Разработан новый двухпараметровый (по коэрцитивной силе и константе магнитострикции) метод НК одноосных напряжений, применимый для широкого класса малоуглеродистых сталей, не требующий в отличие от традиционных способов построения экспериментальной градуировочной кривой для каждой отдельной марки стали.

— Разработан новый метод определения полей механических напряжений в детали с помощью нанесения матрицы локальной намагниченности и снятия информации о величине действовавших напряжений путем сканирования ее поверхности датчиком магнитного поля (Патент РФ. №2154262). — Разработаны и сконструированы автономные, беспроводные запоминающие датчики: трубчатый запоминающий датчик силы, работающий как в режиме магнитоупругой памяти, так и в аналоговом режиме на основе магнитного пьезоэффекта; запоминающий акселерометр для измерения гигантских ускорений, акселерометр-свидетель транспортных перевозок; запоминающий датчик для измерения давления и температуры в скважине; автономный запоминающий блок для измерения силы и ускорения в закрытых камерах.

- Запоминающий акселерометр был внедрен на предприятии РФЯЦ-ВНИИТФ (г.Снежинск) по методике «Выполнение измерений пиковых ускорений магнитострикционными датчиками типа РДУС 2023» (Патент РФ G 01P15/04. №2123189).

 – Геодинамический тензометр был впервые применен для выявления активности геодинамических зон на Федоровском нефтяном месторождении.

 – Разработан и испытан магнитный метод определения сезонных деформаций газопровода с целью определения мест его повышенной разрушаемости. Метод опробован на магистральном газопроводе Уренгой-Сургут-Челябинск.

Разработана и внедрена в учебный процесс лабораторная установка по измерению механических напряжений в стальных образцах с помощью коэрцитиметра.

— Результаты исследований, изложенные в диссертации, используются в учебном курсе «Неразрушающие методы контроля», читаемые в Тюменском государственном нефтегазовом университете для студентов специальностей «Машины и оборудование нефтяных и газовых промыслов» и «Технологические машины и оборудование». По данной тематике проводится защита квалификационных и дипломных работ студентов специальностей «Технологические машины и оборудование» и «Материаловедение и термическая обработка».

Апробация работы

По материалам диссертации опубликовано 36 работ, в том числе три монографии и два патента. Основные положения и результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на научно-технических конференциях: международной конференции "Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления" (ДАТЧИКИ-97). – Гурзуф, 1997; международной научно-технической конференции. «Новые материалы и технологии в машиностроении», Тюмень.2000; XII Научно-технической конференции «Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления». М.:МГИМ.2000.; региональной конференции «НЕФТЬ и ГАЗ: проблемы недропользования, добычи и транспортировки» (г.Тюмень, 2002); международной конференции «Разрушение И мониторинг свойств металлов». (г.Екатеринбург, 2003); научно-практической конференции «Электроэнергетика и применение передовых современных технологий в нефтегазовой промышленности» (Тюмень, 2003).

Структура диссертации

Работа состоит из введения, восьми глав, приложения и списка литературы, включающего 255 наименований, 120 рисунков, 15 таблиц и изложена на 318 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

<u>В первой главе</u> дается анализ основных методов косвенного определения напряжений: рентгеновские, ультразвуковые, магнитные (по магнитной проницаемости, магнитострикции, коэрцитивной силе) и определяются цели и задачи исследования. Во второй главе приводятся результаты исследования влияния магнитной предыстории образца, краевого эффекта и зазора между датчиком и образцом на показания коэрцитиметра КИФМ-1 с П-образным датчиком. Приведены типичные кривые зависимостей продольной $H_c^{||}$ и поперечной H_c^{\perp} коэрцитивной силы различных марок малоуглеродистых сталей от величины нагрузки σ (рис.1).

Качественный ход кривых зависимостей $H_c^{(-)}(\sigma)$ и $H_c^{(-)}(\sigma)$ для всех исследованных марок сталей идентичен. При нагрузке превышающей 150-200МПа зависимость $H_c(\sigma)$ становится практически линейной.



Рис. 1. Расчетные и экспериментальные зависимости коэрцитивной силы H_c от напряжений σ

Использовались образцы разной формы, плоские, в форме труб и швеллеров, изготовленные из разных марок сталей: 09Г2С (Япония), 17Г1С, 25ХСНД, 15ХСНД, Х70 (ФРГ) и др.

Выбранные марки сталей характеризуются малым содержанием углерода от 0,8% (сталь X70) до 0,25% (сталь 25ХСНД) и марганца от 1,63% (сталь Х70) до 0,37% (сталь 25ХСНД), а также они отличаются и процентному содержанию по кремния, хрома И никеля. Это приводит к тому, что графики зависимостей абсолютной анизотропии коэрцитивной силы $\Delta H_c = H_c^{\perp} - H_c^{\parallel}$ ОТ растягивающей нагрузки веерообразно расходятся И

существенно различаются в области нагрузок превышающие 100МПа (рис.2).

Показано, что зависимости $\Delta H_c(\sigma)$ в рассмотренных сталях качественно идентичны, но имеют существенные количественные отличия.

Относительная анизотропия коэрцитивной силы $\Delta H_c/H_c^{\parallel}(\sigma)$ также монотонно увеличивается и стремится к насыщению. Однако из-за различных исходных данных значений H_c^{\parallel} порядок в расположении кривых по степени крутизны уже иной, чем для абсолютной анизотропии ΔH_c (рис.3).



Рис. 2. Зависимость абсолютной анизотропии коэрцитивной силы $\Delta H_c = H_c^{\perp} - H_c^{\parallel}$ от величины растягивающих напряжений σ для образцов из различных сталей: 1-Х70; 2-15ХСНД; 3,4,5-09Г2С; 6-17ГС; 7-25ХСНД; 8-Сталь3.



Рис.3. Зависимость относительной анизотропии Δ H_c/H_c^{||} от величины напряжений σ при растяжении образцов различных сталей: 1- X70; 2- 15XCHД; 3,4,5- 09Г2С, 6-17ГС;7-25XCHД;8-Ст 3. 50; 4) 09Г2С, № 76; 5) 09Г2С, № 15;6) 17ГС; 7) 25ХСНД; 8) Сталь3

Предложена формула, описывающая изменение отношения $(H_c^{||} - H_c^{\perp})/(H_c^{||} + H_c^{\perp}) = \Delta H_c / \Sigma H_c$ с ростом о в виде:

$$\frac{\mathrm{H}_{\mathrm{c}}^{\perp} - \mathrm{H}_{\mathrm{c}}^{\parallel}}{\mathrm{H}_{\mathrm{c}}^{\perp} + \mathrm{H}_{\mathrm{c}}^{\parallel}} = 27 , 1 \cdot \mathrm{th}\left(0,045 \cdot \frac{\sigma}{\sigma_{\mathrm{T}}}\right)$$
(1)

Здесь $\sigma_{\rm T}$ - предел текучести стали. Полученная зависимость (1) хорошо согласуется с экспериментальными значениями, полученными для всех исследованных марок сталей в диапазоне нагрузок от 0 до верхней границы допустимых в эксплуатации напряжений 0,5 $\sigma_{\rm T}$. При этом не требуется знания величины коэрцитивной силы ненагруженного материала. Использование относительной анизотропии коэрцитивной силы в виде $\Delta H_c/\Sigma H_c$ и безразмерного приведенного параметра $\sigma/\sigma_{\rm T}$ позволяет определять не только одноосные растягивающие, но и сжимающие напряжения (рис. 4). Приведенная зависимость яв-



Рис.4. Изменение безразмерного параметра при растяжении – сжатии образца из стали 09Г2С.

ляется симметричной, несмотря на то, что зависимости $H_c^{\perp}(\sigma)$ и $H_c^{\parallel \parallel}(\sigma)$ несимметричны. Предложенное математическое описание (1) оказалось применимым не только для плоских образцов, но также и для образцов в виде труб и швелеров.

Погрешность измерения напряжений, определяемых по градуировочной зависимости, установленной для серии сталей формула (1) составляет $\pm 20\%$ от действующих напряжений в диапазоне $0 < \sigma < 0,5\sigma_{T}$. Если же марка стали известна, погрешность

измерения напряжений уменьшается до ±12%.

В третьей главе для учета неодинаковой чувствительности коэрцитивной силы различных марок сталей к упругим напряжениям были проанализированы механизмы магнитоупругой коэрцитивности и была поставлена задача найти алгоритм построения обобщенной градуировочной кривой. В работе указано, что кроме традиционных механизмов, вызывающих изменение коэрцитивной силы при нагружении (рост градиента локальных напряжений и перестройка доменной структуры), необходимо учитывать третий механизм, не рассматриваемый ранее, а именно, уменьшение линейных размеров доменов при нагружении. Используя известные соотношения Дейкстра-Мартиуса-Драгошанского, связывающие ширину доменов с константой магнитострикции, получены формулы для коэрцитивной силы, измеряемой в направлении приложения нагрузки $H_c^{||}$ и коэрцитивной силы, измеряемой в поперечном направлении H_c^{\perp} .

$$\mathbf{H}_{c}^{\parallel} = \left[H_{c}^{0} - A_{\mathbf{I}} \left(1 - e^{-\beta \sigma} \right) \right] \cdot \left(1 + m_{\mathbf{I}} \sigma \right)$$

$$\tag{2}$$

$$\mathbf{H}_{c}^{\perp} = \left[H_{c}^{0} + A_{2} \left(1 - e^{-\beta_{2} \sigma} \right) \right] \cdot \left(1 + m_{2} \sigma \right)$$
(3)

где H_c^0 - коэрцитивная сила в ненагруженном состоянии, A₁и A₂ -постоянные материала, β_1 , m_1 и β_2 , m_2 – усредненные для поликристалла величины, пропорциональные константе магнитострикции λ_{100} .



Для определения величины константы магнитострикции λ_{100} экспериментальная кривая зависимости магнитострикции от напряженности магнитного поля $\lambda(H)$ была представлена в виде суммы двух зависимостей: $\lambda_{100}(H)$ кривая (1) и λ₁₁₁(H) кривая (2) (рис. 5). При этом исходили из того, что наблюдаемая кривая зависимости λ(H) определя-ментальной кривой λ(H) в виде суммы ется двумяавиотессайий от Ноцеровани) и λ₁₁₁(Н) (кривая2). смещения доменных границ $\lambda_{100}(H)$

и процессами вращения $\lambda_{111}(H)$, идущими монотонно. В этом случае должно быть справедливо соотношение: $\lambda(H) = \lambda_{100}(H) + \lambda_{111}(H)$. Так как процессы смещения доменных границ происходят заметно раньше, предполагали, что на нисходящем участке кривой $\lambda(H)$ они заканчиваются и превалируют процессы вращения. Для этого нисходящий участок кривой $\lambda(H)$ экстраполировали на ось H=0, после чего всю полученную кривую переносили так, чтобы она начиналась из точки λ =0 кривая (2). Кривая (1) была получена как разность между экспериментальной кривой λ (H) и построенной кривой (2). Полученные величины λ_{100}^* и λ_{111}^* назвали эффективными константами магнитострикции. Полагали, что эффективные константы магнитострикции поликристалла λ_{100}^* и λ_{111}^* в насыщении пропорциональны константам магнитострикции λ_{100} и λ_{111} монокристалла. Оценка на железе подтверждает это предположение.

С учетом эффективной константы магнитострикции λ_{100}^* для малоуглеродистых сталей была получена формула, описывающая зависимость относительной анизотропии коэрцитивной силы $\Delta H_c/H_c^0$ от напряжений σ в виде:

$$\frac{\Delta H_c}{H_c^0} = 0.59 - \begin{bmatrix} 0.15 \exp(-0,0034\,\lambda_{100}^*\,\sigma) + \\ + 0.44 \exp(-0,0023\,\lambda_{100}^*\,\sigma) \end{bmatrix} + \sigma \left(0.93 \cdot \lambda_{100}^* - 7 \cdot 10^{-6} \right) \cdot 10^{-3}$$
(4)



Рис. 6. Зависимость относительной анизотропии $\Delta H_c / H_c^0$ исследованных сталей от величины напряжений о.

1-сталь 15ХСНД, 2-сталь 5ХСНД

3-сталь 09Г2С (Япония). Сплошной линией показана кривая, рассчитанная по формуле (4) для стали 15ХСНД.

На (рис. 6) приведены кривые зависимости относительной анизотропии коэрцитивной силы $\Delta H_c/H_c^0$ от величины напряжения о полученные экпериментально. Из рисунка видно, что кривые существенно зависят от марки сталей различающихся по химическому составу. Поэтому, для определения напряжений в металлоконструкциях воспользоваться градуировочной кривой зависимости $\Delta H_{c}\left(\mathbf{\sigma}
ight)$ и ΔH_{c} / $H_{c}^{0}\left(\mathbf{\sigma}
ight)$ можно только зная марку стали. Однако процесс снятия градуировочной кривой достаточно трудоемок дорог. Проще измерить И

магнитострикцию сталей, определить λ_{100}^* и вносить её в формулу (4).

При подстановке в формулу (4) значения λ_{100}^* для стали 15ХСНД, расчетная кривая совпадает с экспериментальной кривой для этой марки стали (рис. 6, кривая 1), если подставить максимальное значение λ_{100}^* , для стали 25ХСНД, то расчетная кривая (2) отклоняется вверх и совпадает с экспериментальной кривой для этой марки стали.

Наконец, подстановка в форму-лу (4) значения λ_{100}^* , измеренного на стали 09Г2С, приводит к тому, что расчетная кривая опускается и совпадает с нижней кривой (3) для образцов этой стали. Полученные результаты показывают, что в работе найден достаточно эффективный алгоритм построения обобщенной градировочной кривой для малоуглеродистых сталей, который не требует прямых измерений H_c под нагрузкой для каждой отдельной марки стали такого класса. Зная величину коэрцитивной силы в ненагруженном состоянии H_c^0 и определив эффективную константу магнитострикции λ_{100}^* исследуемого материала по изложенной выше методике, можно, проведя измерения коэрцитивной силы в двух взаимно перпендикулярных направлениях и используя формулу (4), рассчитывать величину действующих механических напряжений, используя программу MathCad 2000 Professional.

Расчеты, проведенные для исследуемых сталей при доверительной вероятности P=0,95, показывают, что разброс значений при определении σ составляет: 21% для σ =250 МПа, 13% для σ =200 МПа, 12% для σ =150 МПа, 18% для σ =100 МПа и 17% для 50 МПа. Максимальное значение ошибки - 24%, было получено для нагрузки 300 МПа. Это может быть связано, на наш взгляд, с большим разбросом экспериментальных точек в этом диапазоне нагрузок. Учитывая, что погрешность измерения H_c исследованных сталей с помощью КИФМ-1 достигает значения ~10%, можно считать, что предлагаемый способ определения напряжений является вполне удовлетворительным для исследованного класса сталей. <u>В четвертой главе</u> приведены результаты исследований изменения коэрцитивной силы при напряжениях, приводящих к пластической деформации. На стали 3 и 09Г2С обнаружена инверсия анизотропии коэрцитивной силы, заключающаяся в том, что продольная коэрцитивная сила пластически деформированного материала становится больше, а поперечная - меньше исходной.

Далее показано, что небольшие пластические деформации удлинения исследованных марок сталей приводят к резкому увеличению магнитострикции. Это увеличение достигает на некоторых образцах до 350%. До настоящего времени оба эти явления не находили объяснения.

В работе дается объяснение наблюдаемого изменения коэрцитивной силы и магнитострикции с позиций возникновения в процессе пластической деформации растяжения ориентированных сжимающих микронапряжений, которые формируют магнитную доменную текстуру типа "плоскость осей легкого намагничивания".

В рамках представлений о развитии и релаксации ориентированных микронапряжений в процессе пластической деформации получена формула, достаточно полно описывающая изменение магнитострикции с ростом пластической деформации. Отмечается, что обнаруженный эффект является в настоящее время самым чувствительным индикатором пластических деформаций.

В пятой главе рассматривается силовой электромагнитный преобразователь, в котором для измерения напряжений предлагается использовать гармонический анализ ЭДС выходного сигнала. Главной задачей разработки явилось изучение зависимости амплитуды высших гармоник от магнитных свойств магнитоупругого преобразователя и величины механических напряжений. Для расчета гармонических составляющих скорости изменения намагниченности использовали аналитические выражения Такаги, описывающие намагниченность как функцию напряженности поля и напряжений. Расчет коэффициентов ряда Фурье методом Симпсона позволил вычислить зависимость амплитуды первой, третьей и пятой гармоник выходного сигнала электромагнитного преобразователя от величины τ , пропорциональной механическим напряжениям, и сравнить их с результатами измерений, полученных на монокристаллах. Сравнение показало удовлетворительное согласие теории с экспериментом. Предложенный подход открывает новые возможности создания первичных преобразователей для измерения напряжений с помощью гармонического анализа и математической обработки выходного сигнала. Введение данных о свойствах контролируемого материала (его начальной восприимчивости и константы магнитострикции) в базу данных персонального компьютера и математическая обработка сигнала позволяет адаптировать датчик по его чувствительности к новому материалу без трудоемкой калибровки по механическому напряжению.

В шестой главе рассмотрено пьезодинамическое размагничивание ферромагнетика как его способность необратимо и однозначно изменять остаточную намагниченность под действием механических напряжений – эффект магнитоупругой памяти (МУП). По величине убыли остаточной намагниченности можно судить о прикладываемой к ферромагнетику нагрузке. Материал – носитель магнитоупругой памяти должен обладать необходимой чувствительностью к напряжениям, быть достаточно прочным, коррозионно-стойким и недорогим.

Одной из целей работы явилось разработка таких материалов, систематическое исследование гиперболической зависимости между намагниченностью материала, его коэрцитивной силой, магнитострикцией насыщения и величиной напряжений; а также изучение влияния температуры отпуска стали на изменение остаточной намагниченности при приложении напряжений.

Исследования проводились на образцах цилиндрической формы, изготовленных из высокохромистой стали состава C-0,37;Cr-14,37;Si-0,4;Ni-1,22;Mn-0,45 после их закалки от 1080° C с погружением в масло, а затем отпущенных на воздухе при температурах 200° C÷ 600° C и композиционных R-Fe материалов.

Были проведены измерения остаточной намагниченности J_r, до и после нагружения (магнитоупругая память), коэрцитивной силы H_c, магнитострик-

ции насыщения λ_s и влияние нагрева и охлаждения на изменение намагниченности образца. Остаточная намагниченность высокохромистой стали в рассмотренном диапазоне температур J_r (t_{отп}) меняется в пределах от 53 кА/м до 14кА/м. В начале остаточная намагниченность возрастает, достигая максимума при t_{отп}=300⁰C, а затем убывает, причём особенно резкое уменьшение J_r происходит в интервале (460÷540)⁰C. Коэрцитивная сила H_c тех же образцов имеет значения в пределах (5,5÷1,5) кА/м и изменяется с температурой отпуска подобно остаточной намагниченности. Магнитострикция насыщения λ_s исследованных образцов положительна и изменяется от 4×10⁻⁶ до 8,3×10⁻⁶. С увеличением температуры отпуска до 360⁰C она немного уменьшается, а в интервале 360⁰C<t_{отп}≤540⁰C растёт.

Влияние сжимающих напряжений σ на остаточную намагниченность оценивалось по ее абсолютному $|\Delta J_{\sigma}|$ и относительному изменению $|\Delta J_{\sigma}|/J_{r}$ после цикла сжатие-разгружение при σ =379 МПа. Для образцов, отпущенных при $t_{orn} \leq 520^{0}$ С, зависимость $|\Delta J_{\sigma}|(\sigma)$ может быть аппроксимирована линей-



Рис.7. Зависимость изменения намагниченности $|\Delta J_{\sigma}|$ от величины прикладываемых напряжений σ .

 $1 - t_{orn} = 200^{\circ}C, 2 - t_{orn} = 250^{\circ}C, 3 - t_{orn} = 510^{\circ}C.$

ной функцией σ в интервале $\sigma \leq 500$ МПа (рис. 7). Относительное изменение остаточной намагниченности образцов, намагничиваемых при комнатной температуре после их охлаждения до - 24^{0} С и нагреве до комнатной температуры, не превышает 2,6%.

У образцов, отпущенных при 400⁰C, 540⁰C и 580⁰C при аналогичных исследованиях изменение намагниченности не было зафиксировано. После нагрева от комнатной температуры до 100°С и 140°С величина $\Delta J_t/J_r$ для образцов, отпущенных при 400°С, 540°С и 580°С, изменяется в пределах 1,1-6,1% и 1,9-10,2% соответственно. Сравнивался относительный эффект размагничивания, вызванного изменением температуры образца, с эффектом магнитоупругой памяти. После одного цикла нагрев-охлаждение до 100°С, 140°С для σ =379 МПа имеем соответственно (3,2÷14,8)% и (6,5÷29,2)%. Эти результаты важны для оценки погрешности измерения сил в режиме магнитоупругой памяти при повышенных температурах.

Результаты проведенных измерений были использованы для проверки гиперболической зависимости, устанавливающей связь между H_c, J_r, λ_s и σ с помощью коэффициента магнитоупругой тензочувствительности β₁.

$$\frac{1}{J_{r\sigma}} - \frac{1}{J_{ro}} = \beta' \frac{\lambda_s \sigma}{H_c} = \beta_1 \sigma, \qquad (5)$$

где J_{ro} , $J_{r\sigma}$ -остаточная намагниченность образца до и после приложения нагрузки соответственно, β' - коэффициент, зависящий от размагничивающего фактора N (β' ~N) связанного с дисперсностью структуры материала, λ_s - магни-



Рис.8 .Зависимость коэффициента магнитоупругой чувствительности β' от температуры отпуска $t_{\text{отп}}$.

тострикционная постоянная материала, H_c- коэрцитивная сила. Установлено, что зависимость 1/J_г (σ) может быть с определенной погрешностью аппроксимирована прямой в довольно широком (0-800 МПа) интервале напряжений. Большой интерес представляет коэффициент β' как структурная характеристика магнитоупругой памяти материала. На (рис. 8) представлена зависимость усредненного значения β '- от температуры отпуска. Из него видно, что зависимость β' в интервале $(200-510)^{0}$ С практически сохраняется неизменной, а в интервале 510^{0} С< t_{0TH} <600⁰С резко (примерно в 5 раз) возрастает. Объясняется это существенным изменением дисперсности структуры металла (изменение внутреннего размагничивающего фактора), обусловленного процессами полигонизации и коагуляции карбидов, резким уменьшением концентрации углерода и легирующих элементов в α -фазе, которые приводят к значительному увеличению подвижности доменных стенок, повышая магнитоупругую чувствительность материала.

Проведённые исследования показали, что подбором режима термической обработки можно добиться оптимальных свойств (прочность, чувствительность, точность преобразования) запоминающего материала. Установлено, что наибольшей чувствительностью к упругим напряжениям и наименьшей погрешностью, связанной с колебаниями температуры, обладают образцы, отпущенные при температурах $500^{\circ}C \le t_{otn} < 520^{\circ}C$. Такая сталь может быть рекомендована в качестве материала для создания запоминающих датчиков силы (крешеров).

Пьезодинамическое размагничивание высокомагнитострикционных интерметаллических соединений типа R-Fe (R-4f металл) происходит при значительно меньших нагрузках. Такие материалы, несомненно, являются перспективными для исследования различных магнитоупругих явлений и создания запоминающих чувствительных элементов (ЗЭ) для датчиков силы, давления, ускорения. Однако литые R-Fe соединения обладают низкой прочностью. Поэтому ставилась задача исследовать влияние упругих напряжений на остаточную намагниченность образцов соединений типа Tb_{1-x}, Dy_xFe₂ (λ_s >0)и SmFe₂ (λ_s <0), приготовленных по технологии порошковой металлургии. Были отобраны образцы, которые не разрушаются при сжатии до σ ≈(150÷160) МПа.

Индекс	Состав	J_r ,	$H_c,$	$\lambda_s 10^{-6}$	$\beta_1 10^{-13}$,
образца		K/A/ WI	K/X/ M		M/(A·11a)
3B(X)	$Tb_{0,4}Dy_{0,6}Fe_{1,82}$	80,8	10,4	471	3,46
3B(Φ)	$Tb_{0,4}Dy_{0,6}Fe_{1,82}$	69,2	5,2	471	3,92
5B	$Tb_{0,35}Dy_{0,65}Fe_{1,82}$	71,7	8,2	430	2,65
3К	Tb _{0,35} Dy _{0,65} Fe _{1,45} Co _{0,36}	45,4	11,2	416	1,44
1949	SmFe _{1,75}	61,6	39,0	-570	1,05

Таблица 1. Магнитные и магнитоупругие свойства некоторых образцов

Намагниченный вдоль оси образец размещался в измерительной ячейке, которая вставлялась в разрывную машину Р-50. Определялась величина остаточной намагниченности (напряженность магнитного поля рассеяния) в исходном состоянии J_r, а также под нагрузкой и после снятия нагрузки. На каждом цикле нагружение-разгружение измеряли два значения остаточной намагниченности: одно - в состоянии разгрузки (σ=0), а другое - в нагруженном состоянии ($\sigma \neq 0$) (P-H) и получали последовательный ряд значений остаточной намагниченности в разгруженном состоянии: J₅₁, J₅₂, J₅₃,..., J₅₀ (второй индекс указывает номер цикла). Как правило, такая серия экспериментов с определенным значением σ = const заканчивалась при числе нагружений n, лежащем в интервале 8≤n≤30. После завершения серии измерений образец вновь намагничивали и эксперимент возобновляли, но уже с другим значением σ. Η_c и λ_s определяли стандартными методами. Для характеристики наблюдаемых явлений выделили три параметра: $\Delta J_{\sigma 1} = J_r - J_{\sigma 1}$, $\Delta J_{\sigma n} = J_{\sigma 1} - J_{\sigma n}$ и $\delta J_{\sigma max} = J_{r\sigma max} - J_{r\sigma min}$. Параметр $\Delta J_{\sigma 1}$ характеризует необратимое уменьшение остаточной намагниченности после первого нагружения и является количественной характеристикой магнитоупругой памяти магнетика о величине ранее приложенных и затем снятых упругих напряжений σ. Параметр ΔЈ_{σп} характеризует вязкое необратимое уменьшение остаточной намагниченности после n-го цикла H-P. Параметр δJ_σ это величина пьезомагнитного установившегося изменения остаточной намагниченности после многократного повторения (8-30 циклов) H-P.

Величина остаточной намагниченности $J_{\sigma 1}$ после первого цикла (H-P) от σ монотонно уменьшается (рис. 9), а значение необратимого изменения остаточной намагниченности $\Delta J_{\sigma 1}$ композиционных R-Fe материалов монотонно увеличивается по абсолютной величине с ростом величины сжимающих напряжений. Можно видеть, что необратимое изменение остаточной намагниченности $\Delta J_{\sigma 1}$ зависит от химического состава материалов и технологии приготовления. Так, увеличение времени спекания с одного до двух часов для образ-



Рис.9. Зависимость остаточной намагниченности $J_{\sigma 1}$ после первого цикла (H-P) от величины σ , химического состава и технологии приготовления образцов. 1—3B(X), 2—3B(Φ), 3—5B, 4—1949, 5—3K.

цов 3B(X) и $3B(\Phi)$, имеющих одинаковый состав, не влияет на магнитострикцию, но приводит к уменьшению коэрцитивной силы H_c в два раза (табл.1). При этом $\Delta J_{\sigma 1}$ уменьшилась на 5-10%. С уменьшением содержания тербия от 40% до 35% и увеличением содержания диспрозия от 60% до 65% λ_s , J_r и H_c уменьшились. Это привело к убыли $\Delta J_{\sigma 1}$ на 15-40% образцы 3В (X), 5В. Частичная замена железа кобальтом, по-видимому, приводит к увеличению парамагнитной фазы в образце в результате чего уменьшается J_r и λ_s , а $\Delta J_{\sigma 1}$ уменьшается на 45-80%.

Максимальное значение $\Delta J_{\sigma 1}$ при σ =32МПа было получено для образца 3B(X), а минимальное на образцах 3К и 1949. Относительное изменение остаточной намагниченности $\Delta J_{\sigma 1}/J_r$ от величины сжимающих напряжений уже при нагрузке ~ 120 МПа приводит на некоторых материалах к убыли остаточной намагниченности на 76%. Полученные экспериментальные результаты были использованы для проверки формулы (5), отражающей зависимость остаточной намагниченности образца от напряжений σ после одного цикла (H-P). Проверка показала, что и на высокомагнитострикционных сплавах железа с тербием и диспрозием и железосамариевых сплавах формула (5) удовлетворительно выполняется. На (рис. 9) пунктиром показаны кривые, рассчитанные по формуле (1), которые проходят вблизи экспериментальных точек. Подстановка экспериментальных данных в формулу (5) позволила подсчитать усреднённый коэффициент β_1 и представить на графике его зависимость от отношения λ_s/H_c (прямая 2 рис.10). Можно



Рис.10. Зависимость коэффициента β_1 от величины λ_s/H_c , для Fe-Co-(5,7,9%)V сплавов и R-Fe материалов.1—Fe-Co-(5,7,9%)V сплавы, 2—R-Fe материала.

видеть что, чем больше величина этого отношения, тем больше коэффициент β₁. Учитывая отличающуюся технологию приготовления образцов и их различия в химическом составе, можно в первом приближении говорить о существовании прямо пропорциональной зависимости между В₁ и λ_s/H_c то есть постоянства β'. Для сравнения на этом же рисунке показана зависимость $\beta_1(\lambda_s/H_c)$ для железо-кобальт-ванадиевых сплавов различного химического состава и температуры термообработки (прямая 1). (Прямая 2), проведённая через экспериментальные

точки имеет меньший угол наклона, чем (прямая 1). Это значит, что коэффициент β_1 для железо-кобальт-ванадиевых сплавов больше примерно в 1,3 раза, чем для композиционных R-Fe материалов, что объясняется различием в величине размагничивающего фактора формы образца. Изучение влияния повторных нагружений на эффект МУП имеет непосредственное отношение к погрешности запоминающих датчиков. Так если нагрузка повторяется несколько раз, то намагниченность продолжает уменьшаться. Происходит вязкое сползание намагниченности. В результате датчик покажет завышенное значение силы. Проведено сравнение вязкого изменения намагниченности $\Delta J_{\sigma(1-10)}$ с ее изменением при первом нагружении $\Delta J_{\sigma 1}(\sigma)$. Показано, что диапазон изменения указанного параметра у исследуемых композиционных R-Fe материалов составляет (10-30)%, а у Fe-Co-(5,7,9%)V сплавов - (15-60)%. У композиционных R-Fe материалов эффект от повторного нагружения становится тем меньше, чем больше величина $\Delta J_{\sigma 1}$

Значительный разброс значений β_1 от линейной зависимости (рис.10) указывает в некоторых случаях на расхождение гиперболической формулы с результатами эксперимента. Так как расхождение заключено в диапазоне до 10%, для выявления функциональной зависимости $J_r(\sigma)$ необходимо было очень тщательно провести эксперимент. Это и было сделано на образцах из высокохромистой стали. Для проверки справедливости формулы (5) строился график зависимости величины $1/J_{\sigma}$ от σ в широком диапазоне нагрузок. Линейная зависимость указывала бы на справедливость формулы (5), а отклонение от неё означало бы, что коэффициент β_1 зависит от σ .

На (рис. 11а и 11б) изображен график зависимости $1/J_{\sigma}$ (σ) для закалённых от 1080^{0} С и погруженных в масло и отпущенных при 250⁰С и 600⁰С образцов стали 40Х13:

На (рис. 11а) видно, что величина $1/J_{\sigma}$ вначале растёт медленнее, а затем быстрее, то есть наблюдается отклонение от линейной зависимости. Подобным

образом ведёт себя зависимость $1/J_{\sigma}(\sigma)$ и для образцов, отпущенных при температурах 300°C, 360°C, 400°C, 460°C и 510°C.



Рис. 11. Зависимость 1/J_σ от величины действовавшего напряжения σ для образцов стали 40Х13, прошедших процедуру отпуска при температурах: a)-250⁰C, б)-600⁰C. Сплошной линией изображена степенная аппроксимация.

При этом с ростом температуры отпуска вплоть до 510^{9} C степень нелинейности уменьшается. Однако у образца, отпущенного при 520^{9} C, вновь проявляется нелинейность примерно такого же рода, как и на образце, отпущенном при 250^{9} C. У образца, отпущенного при температуре 540^{9} C, зависимость $1/J_{\sigma}(\sigma)$ практически линейная. Отпуск при 560^{9} C, 580^{9} C и 600^{9} C привёл к нелинейности иного характера. Так на (рис. 11б) показано, что зависимость $1/J_{\sigma}(\sigma)$ вначале растет, а затем ее рост замедляется, т. е. имеет качественно иной вид зависимости по сравнению с низкотемпературным отпуском. Итак, величина β_{1} в исследованном диапазоне напряжений для ряда материалов является функцией σ . В связи с этим была рассмотрена аппроксимация экспериментальных данных в несколько ином виде:

$$\frac{1}{J_{\sigma 1}} - \frac{1}{J_{ro}} = \beta_2 \sigma^{\alpha} \tag{6}$$

где α и β_2 – коэффициенты, зависящие от структуры материала.

Методом наименьших квадратов по результатам измерений, проведённых после каждого отпуска, определялись коэффициенты α и β_2 . Установлено, что среднеквадратичное отклонение экспериментальных значений величины $1/J_{\sigma}$ от значений, рассчитанных по формуле (6), для всех рассмотренных выше материалов не превышает экспериментальной погрешности, тогда как величина дисперсии для уравнения регрессии (5) существенно (на порядок) больше, чем для уравнения регрессии (6). Это доказывает его большую пригодность для описания необратимых магнитоупругих явлений.

Магнитоупругая чувствительность пьезодинамического размагничивания β_2 обусловлена подвижностью 90- градусных междоменных границ, движение которых вызывается приложенными напряжениями. С увеличением температуры отпуска подвижность 90- градусных границ увеличивается, растёт и магнитострикция, увеличивая магнитоупругое воздействие. Поэтому с ростом температуры отпуска β_2 увеличивается. Величина α функционально связана с β_2 : с ростом β_2 она уменьшается.

Установленные экспериментально зависимости $J_{r\sigma}(\sigma)$ были использованы также для проверки экспоненциальной формулы для пьезодинамического размагничивания. Предложен иной вариант экспоненциального описания зависимости остаточной намагниченности $J_{r\sigma}$ от величины механических напряжений σ (магнитоупругая память), применимый для определенных диапазонов прикладываемых напряжений.

$$J_{r\sigma} = J_{min} + \Delta J_1 e^{-u\sigma} + \Delta J_2 e^{-v\sigma}$$
(7)

здесь $J_{min.}$ – минимальное значение остаточной намагниченности, которое достигается при магнитоупругом размагничивании; ΔJ_1 – максимальное уменьшение остаточной намагниченности за счет первого механизма; ΔJ_2 - максимальное уменьшение остаточной намагниченности за счет второго механизма магнитоупругого размагничивания; и, v- величины пропорциональные энергии активации первого и второго механизмов.

В работе впервые рассмотрен механизм установившегося изменения остаточной намагниченности при приложении больших циклических повторяющихся упругих напряжений - пьезомагнитный эффект остаточно намагниченного ферромагнетика (ПМО) для конструкционных сталей 60Г, 30ХГСА и стали 45.



Рис.12. Петли магнитоупругого гистерезаса образцов стали 45(а) и образцов стали 30ХГСА, отпущенных при разных температурах.

а) сталь 45.	б) сталь ЗОХГСА
1. $T_{oTTT}=250 \ ^{0}C$	1. $T_{0TII} = 400 \ ^{0}C$
2. Т _{отп} =300 ⁰ С	2. Т _{отп} =450 ⁰ С
3. $T_{0TII} = 350 \ ^{0}C$	3. $T_{0TII} = 480 \ ^{0}C$
4. $T_{0TT} = 400 \ ^{0}C$	4. $T_{0TII} = 500 \ ^{0}C$
5. $T_{0TT} = 450 {}^{0}C$	5. Т _{отп} =530 ⁰ С
6. $T_{0TT} = 480 \ ^{0}C$	6. $T_{0TII} = 560 \ ^{0}C$
7. Т _{отп} =500 ⁰ С	7. $T_{0TII} = 600 \ ^{0}C$
8. Т _{отп} =530 ⁰ С	8. Т _{отп} =650 ⁰ С
9. $T_{0TT} = 550 {}^{0}C$	9. $T_{0TII} = 700 \ ^{0}C$
10. Т _{отп} =600 ⁰ С	
11. Т _{отп} =650 ⁰ С	
12. Т _{отп} =700 ⁰ С	

На образцах из конструкционной стали после десяти циклов растяжение-сжатие изменение остаточной намагниченности принимает квазиобратимый характер. В этом состоянии были получены петли гистерезиса магнитоупругого изменения остаточной намагниченности (рис.12). В качестве характеристики пьезомагнитного эффекта была выбрана величина магнитоупругой чувствительности $\Lambda = \delta J_{r\sigma} / \Delta \sigma$, определяемая как тангенс наклона прямой, соединяющей угла вершины петли гистерезиса к координатной оси напряжений. Как видно из (рис. 12) после отпуска при температуре $480 \, {}^{0}$ С у образцов из стали 45 наблюдается широкая петля магнитоупругого гистерезиса, а на отдельных участках наклон кривых петли магнитоупругого гистерезиса отрицатель-

ный. У образцов из стали 30ХГСА после отпуска при низкой температуре наклон петли магнитоупругого гистерезиса отрицателен во всем диапазоне изменения механической нагрузки. Подобный ход кривых остаточной намагниченности противоречит, на первый взгляд, известному соотношению термодинамики $\begin{pmatrix} \partial J_r \\ \partial \sigma \end{pmatrix}_H = \begin{pmatrix} \partial \lambda \\ \partial H \end{pmatrix}_{\sigma}$ и был назван отрицательным пьезомагнитным эффектом остаточно намагниченного образца в виде двух объемов: в одном намагниченность ориентирована вдоль вектора J_{ro}, в другом – встречно, минимизируя сумму его основных энергий (магнитостатическую, энергию взаимодействия намагниченности с внутренним полем и магнитоупругую энергию) и пренебрегая процессами вращения, получили формулу, связывающую величину пьезомагнитной чувствительности остаточно намагниченного магнетика Λ с величиной магнитострикции λ_m , коэрцитивной силы H_c и остаточной намагниченности J_r в виде:

$$\Lambda = \frac{\delta J_{r\sigma}}{\Delta \sigma} = \frac{\gamma \lambda_m}{\left(\frac{\beta' \lambda_m \sigma}{Hc} + \frac{1}{J_{ro}}\right)} , \qquad (8)$$

где $\gamma = \frac{k(1 - N_2)}{\frac{1}{8}\mu_0 N_1^2 J_s^2}$

здесь γ и β' постоянные для данного образца, N₁ и N₂- размагничивающий фактор формы включений и образца соответственно. Показано, что формула (8) качественно верно (с точностью до численных коэффициентов) отражает ход кривых зависимости пьезомагнитной чувствительности сталей 45 и 60Г от температуры отпуска (рис. 13).

Характерно, что кривые зависимости пьезомагнитной чувствительности от температуры отпуска t_{отп} всех исследованных марок сталей имеют максимум вблизи температуры отпуска, где зависимость коэрцитивной силы имеет максимум. При этом уменьшение коэрцитивной силы с возрастанием температуры отпуска в два раза соответствует увеличению магнитоупругой чувствительности ПМО в пять раз, что говорит о высокой структурной чувствительности этого параметра. Наличие максимума на кривой пьезомагнитной чувствительности может быть связано с достижением карбидными частицами критического размера. В этом случае формируется разветвленная структура замыкающих доменов, которой обусловлен гистерезис и квазиобратимое приращение намагниченности.



Рис. 13. Зависимость пьезомагнитоупругой чувствительности остаточно намагниченного состояния Λ от температуры отпуска $t_{\text{отп}}$: 1- эксперимент, 2- расчет.

Обнаруженный отрицательный пьезомагнитный эффект (ПМО) объясняется в работе существованием участков с обратной по отношению к вектору $J_{r\sigma}$ намагниченностью, возникающих из-за неоднородности магнитных свойств материала. Магнитные силовые линии поля магнитножестких участков (включений) будут частично замыкаться внутри более магнитно мягкого магнетика и поэтому окажутся ориентированными встречно $J_{r\sigma}$. В этих участках, если они окажутся достаточно магнитомягкими, происходит перемагничивание в противоположном направлении, что уменьшит остаточную намагниченность образца на-

магниченность магнитножестких участков практически не изменяется, в то же время происходит увеличение величины обратной намагниченности в магнитномягких участках. В результате наблюдается уменьшение J_{го} при растяжении и увеличении при сжатии, т.е. отрицательный магнитный пьезоэффект.

<u>В седьмой главе</u> говорится о том, что расчётные методы ресурса долговечности металлоконструкций (например, газопровода), обусловленного развитием трещин, без привязки к конкретным условиям, дают слишком большой разброс значений. Поэтому они должны быть дополнены экспериментальными методами эффективной оценки скорости развития трещин. Шурфование и изучение контактным методом развития трещин газопровода в течение ряда лет достаточно дорогое дело. В работе показано, что наиболее эффективно дистанционное (с поверхности грунта) отслеживание развития дефекта приборными средствами по магнитоупругому размагничиванию локальной намагниченности, обусловленного движением фронта напряжений в вершине трещины.

Для экспериментального измерения скорости развития трещин в газопроводе использовались миниатюрные (1x5)мм феррозонды, являющиеся одновременно как намагничивающими, так и измерительными устройствами. По намагничивающей катушке пропускался импульс тока, в результате чего металл под катушкой локально намагничивался. Если теперь его нагружать, то в намагниченном объёме будет происходить необратимое размагничивание и связанное с этим уменьшение напряженности магнитного поля рассеяния тем большее, чем больше была приложена нагрузка. На (рис.14) показано изменение магнитного поля Н под феррозондом в точке, удаленной на 17 мм от вершины разреза при растяжении пластины из стали 17Г1С кривая (1). Видно, что значение магнитного поля (Н) с ростом σ монотонно уменьшается.

Кривая (3), построенная по результатам измерения поля датчиком, помещённом в вершине разреза, показывает, что зависимость H(σ) идёт заметно круче, чем для удалённого от разреза датчика. Это означает, что при нагрузке, например 150 МПа, приложенной к пластине, напряжения в вершине разреза составляют 235МПа. А при напряжении



Рис.14. Зависимость локального магнитного поля от величины растягивающих напряжений и расстояния датчика от вершин разреза: 1-17мм; 2-10мм; 3-0,5мм.

пластине о=240-250МПа в В вершине разреза напряжения превышают предел текучести от, идет пластическая деформация, чем свидетельствует более 0 резкое падение сигнала магнитометра. Датчики такого рода являются индикаторами движения трещин. Сравнение показаний серии датчиков, поставленных на пути движения трещины, позволяет определять скорость её перемещения.

Далее рассмотрен разработанный метод использования маг-

нитоупругой памяти сталей для определения полей как статических, так и ударных механических напряжений (Патент РФ №2154262), в котором с целью повышения точности измерения напряжений поверхность металлоконструкции (детали) намагничивается в виде матрицы чередующихся по направлению локально намагниченных участков - магнитных меток (MMM) с определенными пространственными параметрами (рис.15). С помощью МММ удается существенно уменьшить влияние внешнего магнитного поля на результаты измерения напряжений.

Положительный эффект уменьшения влияния внешнего магнитного поля достигается тем, что в MMM участок одного направления намагниченности чередуется с участком противоположного направления намагниченности, расположенного между магнитными метками. Поэтому во внешнем магнитном поле уменьшается остаточная намагниченность одного полюса, но увеличива-





Рис.15.Матрица магнитных меток. а - расстояние между полюсами магнитной метки, в – шаг матрицы, с – период матрицы.

Рис.16. Изменение напряженности магнитного поля на поверхности намагниченного в форме матрицы магнетика при воздействии внешнего поля: 1- в отсутствие внешнего поля, 2-во внешнем поле.

ется остаточная намагниченность другого полюса S. В целом величина изменения магнитного поля рассеяния при переходе от одной магнитной метки к другой H_{max}-H_{min} остается неизменной в магнитных полях, сравнимых с коэрцитивной силой. Опытным путем установлено, что оптимальным для измерения является вариант нанесения матрицы магнитных меток, при котором отношение шага матрицы к расстоянию между полюсами равно 2,5. При сканировании матрицы магнитным зондом производится запись магнитограмм и по ним определяется двойная амплитуда магнитного поля каждой метки (рис.16). После этого производится нагружение образца, повторное сканирование матрицы и определяется значение двойной амплитуды в тех же точках поверхности. Величина действовавших напряжений в области магнитной метки определяется по относительному изменению величины двойной амплитуды магнитного поля меток и градуировочному графику зависимости H(σ).

Найденное решение предложено использовать для определения полей напряжений элементов металлоконструкции, возникающих в процессе изменяющихся нагрузок (динамических или ударных), а разработанные материалы позволяют решать такую задачу при повышенных (100-300⁰C) темпера-

турах. Метод может быть использован при конструкторской разработке новой техники.

На эффекте магнитоупругой памяти разработаны и внедрены автономные запоминающие датчики силы, давления и ускорения: датчики силы, запоминающий элемент которых работал на сжатие и был выполнен в виде сплошного или полого цилиндра. Разработан, изготовлен и внедрен запоминающий датчик для измерения пикового давления (в том числе и в момент гидроудара) и температуры (100-140°C) в буровой скважине. На (рис. 17)



Рис.17. Схема устройства датчика пиковых давлений. 1-корпус датчика, 2-поршень, 3,4- резиновые уплотнители, 5 - заглушка, 6 - запоминающий элемент.

представлена схема устройства датчика пиковых давлений. Датчик имеет корпус (1), изготовленный из титана. В него вставляется немагнитный поршень (2) с резиновыми уплотнителями (3). Он служит для передачи усилия, действующего на чувствительный запоминающий элемент (3Э) (6), выполненный из запоминающего материала в форме сплошного цилиндра, который вставляется одним концом в просверленное отверстие в поршне, а другим – в заглушку (5), герметизированную резиновыми прокладками (4). Датчик крепится к буровому инструменту или геофизическому кабелю и опускается в скважину. Съем информации с запоминающего элемента (ЗЭ) в

форме магнитного потока осуществляется после подъема бурового оборудования.

Чувствительность и точность подобных запоминающих элементов удалось существенно увеличить, изготовив их в виде тонкостенного полого цилиндра. Принципиально новым является то, что и намагничивание и измерение магнитного поля осуществляется не вне, как это делалось ранее, а изнутри ЗЭ. На этом принципе был разработан, запатентован и внедрен помехозащищенный запоминающий акселерометр ПЗА-1 (Патент РФ G 01P15/04. №2123189) (рис. 18), в котором ЗЭ имеет форму полого цилиндра для размещения внутри него измерительной катушки. Полый ЗЭ (1) на опоре (3) вставлялся в инерци-



Рис. 18. Помехозащищённый запоминающий акселерометр ПЗА-1: 1-чувствительный элемент; 2-цилиндр; 3-опора; 4-корпус; 5-экран; 6-прокладка; 7-крышка; 8-болт. (Патент РФ №2123189).

онную массу (2). На нее помещался магнитный экран (5), защищающий крешер от воздействия внешнего магнитного или сильного электромагнитного поля. Конструкция датчика позволяет путем изменения сечения ЗЭ варьировать в широких пределах диапазон измеряемой силы. Датчик может работать в режиме «памяти», запоминая максимальное (пиковое) значение силы. При этом используется практически прямая зависимость изменения остаточной намагниченности, измеренной в середине полого цилиндра ЗЭ, от приложенной нагрузки. Трубчатый ЗЭ может работать и в

аналоговом режиме на основе ПМО. В этом случае материал датчика путем многократных нагружений приводится в состояние, когда остаточная намагниченность изменяется квазиобратимо и практически линейно в большом диапазоне напряжений. Тензочувствительность пьезомагнитного способа считывания информации в несколько раз меньше, чем в случае использования МУП, однако имеющаяся магнитоизмерительная аппаратура позволяет зафиксировать небольшие изменения остаточной магнитной индукции (до 10⁻⁶ Тл) и, тем самым, надежно измерять прикладываемые силы. Силовые датчики, использующие МУП или ПМО, были применены при создании опор, в которых предусмотрена регулировка величины нагрузки.

На (рис. 19а и 19б) приведены такого рода устройства. Между сваей (опорой) (1) и опорной плитой (5), подведенной под конструкцию, располагается цилиндр (2) из стали с известными магнитоупругими свойствами, например 30Х13, имеющий поперечное отверстие (3), в которое вставляется съемный датчик. Подстройка под заданную нагрузку осуществляется механизмом регулирования (4). Наибольшей сложностью при разработке материалов для датчика является исключение влияния на результаты измерения температуры среды, где он работает. Был предложен и реализован дифференциальный способ, где кроме рабочего ЗЭ использовался еще эталонный ЗЭ, который помещался в температурную зону. При этом эталонный ЗЭ только нагревался, а рабочий ЗЭ при этой же температуре и нагружался.



Рис.19. Регулируемые опоры (сваи): а- пьезомагнитный съем информации (1свая, 2-винтовая опора, 3-отверстие для съемного датчика, 4-механизм регулирования, 5 - опорная плита); б-коэрцитиметрический съем информации (1-свая, 2- механизм регулировки, 3-место для размещения датчика коэрцитиметра,4опорная плита под конструкцией).

Снятие информации проводилось при комнатной температуре. Установлено, что у стали 30X13 наблюдается наиболее высокая стабильность остаточной намагниченности к температурному воздействию и хорошая чувствительность выходного параметра к упругим напряжениям. Она и была выбрана для изготовления ЗЭ. На (рис.20) показано изменение дифференциального выходного сигнала (магнитного потока чувствительного элемента) с ростом нагрузки при повышенных температурах. Видно, что даже изменение температуры до 200 ^оС не приводило к значительным изменениям выходного сигнала. Максималь-

ное относительное влияние температуры на результаты измерения составляет 4-8%.



Рис.20. Зависимость убыли магнитного потока $\Delta \Phi$ остаточно намагниченного цилиндрического ЗЭ из стали 30Х13 от величины сжимающих напряжений при различных температурах: $\Delta\Delta\Delta$ -20⁰C, $\Box\Box\Box$ -100⁰C, \clubsuit -200⁰C, $\times\times$ - при 20⁰C оставался эталон, рабочий элемент нагружался при 100⁰C.

<u>В восьмой главе</u> показано, что в протяженных металлоконструкциях, пересекающих геодинамическую зону возможно усиление деформации при неоднородном промерзании грунта, и предложен геодинамический тензометр для измерения деформации грунта.

Для оценки изменения механических напряжений в газопроводе (ГП) измерялось магнитное поле рассеяния Н на шести участках действующего ГП общей протяжённостью1500м. В местах, где ГП имеет значительные насыпи, в местах резких его поворотов наблюдалось сезонное изменение величины Н. На (рис.21) приведены результаты измерения H_z компоненты магнитного поля рассеяния ГП на одном из участков.

Установлено, что составляющая поля трубы H_z изменяется периодически через расстояние ~ 70м не только по величине, но и по знаку. Амплитуда изме-

нения H_z соответствует ~ 200А/м, что примерно в 5 раз больше Земного поля. Аналогичные исследования, проведенные на незаглубленном участке теплотрассы длиной 150, диаметром 1200мм, не выявили такой периодичности в изменении напряженности поля. Это доказывает, что её причиной являются механические напряжения, обусловленные взаимодействием трубы ГП и грунта с момента её закладки. Места, где реализуются наибольшие изменения напряжений, проявляются по изменению магнитного поля рассеяния.



Рис. 21. Распределение H_z компоненты вдоль трубопровода на участке №4. По результатам измерений 15.03. и 22.07.,16.09.

Так, например, на участке №4 можно выделить несколько зон, где зафиксировано отличие летних и зимних значений H_z. Такие зоны наблюдаются в районе 190, 290 и 390м. Для оценки величины изменяющихся в металле ГП механических напряжений по результатам магнитометрии была проведена калибровка этих данных на модели трубопровода, представляющего собой полый цилиндр, изготовленный из стали 09Г2С. Была построена градуировочная кривая, связывающая приращение магнитного поля ΔH и величину действующих вдоль оси ГП напряжений. Установлено, что действие осевых растягивающих напряжений увеличивает компоненту H_z, а сжатие - ее уменьшает.

Полученная зависимость была использована для оценки напряжений, согласно которым в некоторых участках ГП могут формироваться сезонные напряжения, достигающие 150МПа. Эти результаты показывают, что существуют участки, где локализуются напряжения и связанные с ними деформации (перемещения трубы). В случае их повторяемости они будут разрушать изоляцию трубы и вызывать малоцикловую усталость металла, стимулируя этим самым его стресс-коррозионное разрушение.

Основные результаты и выводы

- Показано, что величина коэрцитивной силы малоуглеродистых сталей при растяжении и сжатии весьма чувствительна к изменению химического состава сталей, при этом абсолютное и относительное изменения анизотропии коэрцитивной силы монотонно увеличивается с ростом механических напряжений. Впервые для объяснения изменения коэрцитивной силы при нагружении предложен механизм, учитывающий изменение размеров доменов при механическом воздействии.
- Установлена связь магнитоупругой коэрцитивности с константой магнитострикции. Разработан новый способ определения эффективных констант магнитострикции поликристаллических материалов (сталей) по экспериментально-графической зависимости магнитострикции от величины напряженности магнитного поля.
- 3. Разработан новый двухпараметровый метод определения величины действующих в малоуглеродистых сталях одноосных механических напряжений по величине анизотропии коэрцитивной силы и константы магнитострикции и создан эффективный алгоритм построения обобщенной градуировочной кривой зависимости коэрцитивной силы от напряжений, не требующий прямых измерений под нагрузкой для отдельной марки стали.
- Проведена проверка формул, описывающих (МУП) и внесены поправки в гиперболический вид зависимости размагничивания от величины напряжений, позволяющие на порядок улучшить степень аппроксимации с

экспериментальными результатами, полученными на образцах композиционных R-Fe материалов и закаленной и отпущенной при различных температурах высокохромистой стали. Показано, что логарифмический вид зависимости магнитоупругого размагничивания, справедливый на отдельных участках магнитограммы, позволяет определить критическое напряжение, близкое к величине пределу пропорциональности.

- 5. Впервые исследован в широком диапазоне нагрузок пьезомагнитный эффект остаточно намагниченного магнетика на композиционных R-Fe материалах, закаленных и отпущенных конструкционных сталях в зависимости от температуры отпуска и величины приложенных напряжений. Дано его объяснение в рамках представления о существовании внутреннего магнитного поля. Установлена высокая структурная чувствительность нового параметра. Обнаружен отрицательный пьезомагнитный эффект и дано его объяснение.
- 6. Разработан и запатентован метод определения полей механических напряжений в детали с помощью нанесения матрицы локальной намагниченности, достоинством которого является максимальная защищенность от внешнего электромагнитного воздействия.
- Проведен гармонический анализ ЭДС, возбуждаемой во вторичной обмотке магнитоупругого преобразователя, осуществлена его экспериментальная проверка и показана возможность адаптации преобразователя к свойствам исследуемого материала путем математического моделирования.
- 8. Разработаны новые материалы: высокохромистая сталь с содержанием хрома 14,37% и композиционные R-Fe материалы для изготовления запоминающего чувствительного элемента и определены их метрологические характеристики. Разработаны на основе МУП и внедрены автономные запоминающие датчики пикового значения силы, давления и ускорения, способные работать в экстремальных условиях повышенных температур и давлений.

Основные положения диссертации опубликованы в работах

- Новиков В.Ф., Королев А.В., Бахарев М.С., Федоров Б.В. и др. Магнитоупругие свойства спеченных порошковых R-Fe материалов в остаточно намагниченном состоянии.- ФММ, т.91, №3, с.54-59.
- Новиков В.Ф., Соболев М.Д., Бахарев М.С., Орел А.А. Помехозащищенный магнитный запоминающий акселерометр.- Датчики и системы, 2001, №8, с.35-36.
- Новиков В.Ф., Бахарев М.С., Нассонов В.В., Изосимов В.А. Определение полей напряжений в трубопроводах коэрцитиметрическим методом.- Известия ВУЗов Нефть и газ, 1997, с.66-71.
- Novikov V.F., Korolev A.V., Bakharev M.S., Fedorov B.V., Fedyukina G.N., Orel A.A.-Magnetoelastic Properties of Sintered Powder R-Fe Materials in the Remanently Magnetized state.- The physics of metals and metallogzaphy, Vol 91, №3, 2001, p.266-271.
- 5. Новиков В.Ф., Бахарев М.С., Орел А.А. О магнитоупругой памяти высокохромистой стали. - Дефектоскопия, 2001, №10, с.20-26.
- Новиков В.Ф., Ершов С.П., Бахарев М.С. и др. Патент РФ. №2154262, -Способ определения полей напряжений в деталях из ферромагнитных материалов.
- 7. Новиков В.Ф., Бахарев М.С. Магнитная диагностика механических напряжений в ферромагнетиках. Тюмень: Из-во «Вектор Бук», 2001, 220с.
- Новиков В.Ф., Яценко Т.А., Бахарев М.С. Влияние магнитострикции на изменение коэрцитивной силы Н_с при упругом растяжении. – Новые материалы и технологии в машиностроении. – Труды международной научно-технической конференции, Тюмень, 2000,с. 117-119.
- Новиков В.Ф., Бахарев М.С., Кострюкова Н.К. Аномальное изменение магнитострикции сталей на начальных этапах пластической деформации и его использование для целей диагностики.– Известия ВУЗов. Нефть и газ, Тюмень, 1998, №3, с. 95-101.

- 10.Новиков В.Ф., Яценко Т.А., Бахарев М.С. К природе пьезомагнитного эффекта остаточно намагниченного состояния магнетика. - Известия ВУЗов. Нефть и газ. №4, 1998, с. 96-102.
- 11.Новиков В.Ф., Яценко Т.А., Бахарев М.С. О пьезомагнитном эффекте остаточно намагниченного состояния ферромагнетиков.- Вторая объединенная конференция по магнитоэлектронике (Международная) Екатеринбург, 15-18.02.2000,.с. 164-165.
- 12.Бахарев М.С., Миркин Л.И., Шетириков С.А., Юмашева М.А. Структура и прочность материалов при лазерных воздействиях.- Из-во Моск. ун-та, 1988, 225с.
- 13.Новиков В.Ф., Изосимов В.А., Бахарев М.С. Помехозащищенный магнитный крешер.- Тезисы международной конференции «Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления» (ДАТЧИКИ-97).- Гурзуф, 1997, с. 137-139.
- 14.Новиков В.Ф., Изосимов В.А., Бахарев М.С. Нитевидный запоминающий датчик силы.- Тезисы международной конференции «Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления» (ДАТЧИКИ-97).- Гурзуф, 1997, с. 252-253.
- 15.Новиков В.Ф., Бахарев М.С. Автономный запоминающий датчик для измерения пиковых значений ускорения.- Патент РФ G 01P15/04. №2123189.
- 16.Бахарев М.С., Новиков В.Ф., Фатеев И.Г., Третьяков П.Ю. Датчик свидетель транспортных перевозок.- Сб. материалов межд. научно-техн. конференции. Новые материалы и технологии в машиностроении. Тюмень, 2000, с. 111-112.
- Бахарев М.С., Новиков В.Ф., Мосягин М.Н. К разработке раннего диагностирования несущей способности трубы. – Сб. материалов межд. научно-техн. конференции. Новые материалы и технологии в машиностроении. Тюмень, 2000, с. 116-117.

- 18.Новиков В.Ф., Бахарев М.С., Яценко Т.А., Сысоев С.М. Применение трубчатых датчиков для измерения силы. Сб. материалов XII Научнотехн. конфер.- Датчики и преобразователи информации систем измерения контроля и управления. М.:МГИМ. 2000, с. 153-154.
- Башкин А.В., Новиков В.Ф., Бахарев М.С., Дягилев В.Ф., Быков В.Ф., Болотов А.А. Магнитоупругий метод диагностики развития стресскоррозионных трещин.- Известия ВУЗов. Нефть и газ. 2002,№6,с68-73
- 20.Новиков В.Ф., Яценко Т.А. Бахарев М.С. Зависимость коэрцитивной силы малоуглеродистых сталей от одноосных напряжений (часть 1).-Дефектоскопия, 2002, №3, с. 51-57.
- 21.Новиков В.Ф., Яценко Т.А., Бахарев М.С. Зависимость коэрцитивной силы малоуглеродистых сталей от одноосных напряжений (часть 2).- Дефектоскопия, 2002,№ 4, с. 11-17.
- 22.Новиков В.Ф., Бахарев М.С., Дягилев В.Ф., Фатеев И.Г., Федоров Б.В., Гаврилов Е.И. Автономный запоминающий датчик максимального давления и температуры в скважине.- Известия ВУЗов. Нефть и газ., 2002. №6. с.74-77.
- 23.Бахарев М.С., Новиков В.Ф., Рябченко В.Н., Муратов К.Р., Дягилев В.Ф., Быков В.Ф. Усиление деформации в геодинамической зоне.- Известия вузов. Нефть и газ., 2002. №6. с.77-79.
- 24.Бахарев М.С. Регулируемая опора-датчик Известия вузов. Нефть и газ. 2003. №4. с.97-99.
- 25.Бахарев М.С. Использование магнитоупругой памяти стали для определения полей механических напряжений в деталях машин и металлоконструкций.- Датчики и системы. 2003,№10, с.33-35.
- 26.Бахарев М.С., Новиков В.Ф. Использование магнитоупругой памяти для определения полей механических напряжений.- Диагностика оборудования и конструкций с использованием магнитной памяти металла. Сб. докл. Третьей международной научно-технической конференции, М., 2003, с.75-76.

- 27. Новиков В.Ф., Мосягин М.Н., Бахарев М.С., Быков В.Ф. Измерение деформации грунта в геодинамических зонах. Серия: Геология, бурение, разработка и эксплуатация газовых и газоконденсатных месторождений. Научно – технический сборник №1, Москва, 2001, с.3-7.
- Бахарев М.С. Запись ударной нагрузки с помощью магнитоупругой памяти. -Электроэнергетика и применение передовых современных технологий в нефтегазовой промышленности, Тюмень, Изд.-во ТГНГУ, 2003, с .41-45
- 29. Бахарев М.С., Новиков В.Ф. Использование магнитоупругой памяти для определения полей механических напряжений.- Электроэнергетика и применение передовых современных технологий в нефтегазовой промышленности, Тюмень, Изд.-во ТГНГУ, 2003, с.41-45.
- 30.Новиков В.Ф., Яценко Т.А. Бахарев М.С., Нассонов В.В., Мусихин С.А. О механизмах магнитоупругого изменения коэрцитивной силы.- Тез. докл. Междунар. конф. «Разрушение и мониторинг свойств металлов», г.Екатеринбург,2001, с. 121-122.
- 31.Бахарев М.С. Магнитоупругие преобразователи в регулируемых опорах (сваях). - Разрушение и мониторинг свойств металлов, Тезисы докладов международной конференции РАН. Уральское отделение Екатеринбург, 2003,с.74.
- 32.Новиков В.Ф., Семенов В.В., Бахарев М.С., Альмуков А.С. Ускоренный магнитоупругий метод определения выносливости насосных штанг. «Разрушение и мониторинг свойств металлов», Тезисы докладов международной конференции РАН. Уральское отделение, Екатеринбург,2001,с.78.
- 33. Макаренко В.Д., Грачев С.И., Бахарев М.С., Муравьев К.А. Оценка трещиностойкости трубных сталей промысловых нефтепроводов Самотлорского месторождении, -Изв. вуз. Нефть и газ. 2004. №2, с.54-58.
- 34.Иванов И.А., Бахарев М.С., Мосягин М.Н., Новиков В.Ф., Кулак С.М. О возможности использования магнитных полей рассеяния магистрального

газопровода (ГП) для выявления сезонной динамики механических напряжений.- Изв. вуз. Нефть и газ . 2004. № 5 с.47-51.

- 35.Макаренко В.Д., Бахарев М.С., Кузнецов Н.П. Научно-практические основы эксплуатационной надежности нефтепромыслового оборудования. –Изд-во ЦНТИ, 2004, 154с.
- Зб.Макаренко В.Д., Грачев С.И., Бахарев М.С., Муравьев К.А. Снижение содержания водорода в сварных швах промысловых трубопроводов. Изв. вуз. Нефть и газ, 2004, №3, с.85-88.