

На правах рукописи



**ЛЕОНОВ ИГОРЬ СЕРГЕЕВИЧ**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОЭРЦИТИМЕТРИЧЕСКОГО  
МЕТОДА ДЛЯ АНАЛИЗА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ  
НЕФТЕГАЗОПРОВОДОВ**

Специальность 25.00.19 –Строительство и эксплуатация  
нефтегазопроводов, баз и хранилищ

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Ухта – 2013

Диссертация выполнена на кафедре «Проектирование и эксплуатация магистральных газонефтепроводов» ФГБОУ ВПО «Ухтинский государственный технический университет»

Научный руководитель: Доктор технических наук, профессор  
Иван Николаевич Андронов

Официальные оппоненты: Владимир Орович Некучаев,  
доктор физико-математических наук, профессор  
Ухтинский государственный технический университет, заведующий кафедры «Физика»

Игорь Николаевич Бирилло,  
кандидат технических наук,  
начальник лаборатории надежности объектов  
газотранспортной системы филиала  
ООО «Газпром ВНИИГАЗ» в г. Ухта

Ведущая организация: ОАО «Гипрогазцентр», г. Нижний Новгород

Защита состоится 30 октября 2013 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 212.291.02 в Ухтинском государственном техническом университете по адресу : 169300, г.Ухта, Республика Коми, ул.Первомайская, 13

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ухтинского государственного технического университета.

Автореферат разослан «24» сентября 2013 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат технических наук



М. М. Бердник

## **Общая характеристика работы**

**Актуальность темы.** Россия является владельцем самых развитых сетей промышленных и магистральных трубопроводов для транспортирования нефти и газа. В процессе эксплуатации металл трубопровода испытывает воздействие значительных механических нагрузок, коррозионно-активной среды и климатических условий. Эти факторы могут приводить к аварийным разрушениям трубопроводов.

Действие напряженного состояния влияет на металл, который в свою очередь изменяет свои функциональные свойства, в частности, прочностные, вязкопластические, что является причиной более половины всех разрушений трубопроводов.

Таким образом, своевременное определение мест с максимальными напряжениями в металле и последующим проведением ремонтных работ, является залогом целостности магистральных трубопроводов.

Практическая оценка напряженного состояния (НС) трубопроводов находится расчетными методами с невысоким процентом достоверности вследствие отсутствия достоверной информации о первоначальном положении трубопровода. Существующие на данный момент физические методы не позволяют в полном объеме произвести оценку напряженно-деформированного состояния нефтегазопроводов.

Таким образом, повышение достоверности оценки вида напряженно-деформированного состояния в трубопроводах на основе физических методов неразрушающего контроля является весьма актуальной научно-практической проблемой, решение которой позволит выявлять напряженные участки трубопровода и своевременно и оперативно проводить мероприятия по их ремонту и устранению.

Данная работа базируется на результатах научных работ многих ученых и исследователей, среди которых: Р.В. Агинеи, И.Н. Андронов, В.К. Бабич, М.М. Бердник, М.П. Берштейн, Г.В. Бида, Ф. Вицена, А.И. Гардин, Э.С. Горкунов, Ю.И. Драгошанский, А.А. Дубов, О.М. Иванцов, А.А. Ильюшин, В.В. Клюев, А.С. Кузьбожев, А.Н. Кузнецов, Н.С. Кузнецов, В.Г. Кулеев, М.Н. Михеев, В.Ф. Мужижкий, В.Ф. Новиков, А.П. Ничипурук, Б.Е. Попов, В.П. Табачник, А.Т. Туманов, В.В. Харионовский, М.Н. Щербинин и др.

**Цель работы.** Совершенствование коэрцитиметрического метода оценки напряженно-деформированного состояния нефтегазопроводов.

### **Задачи исследования:**

1. Исследование влияния вида плосконапряженного состояния на величину коэрцитивной силы металла трубопровода.
2. Исследование влияния вида плосконапряженного состояния на угловое распределение величины коэрцитивной силы металла трубопровода.

### **Научная новизна:**

1) Впервые установлено, что значения коэрцитивной силы существенным образом зависят от вида напряженного состояния, задаваемого, параметром Лоде. (При этом коэрцитивная сила -  $H_{c||}$ , измеренная в направлении оси трубы, в целом возрастает на 30-40% при переходе от растяжения ( $\mu = -1$ ) к сжатию ( $\mu = 1$ ) через промежуточные состояния: совместное растяжение с кручением - ( $-1 < \mu < 0$ ); кручение ( $\mu = 0$ ); совместное сжатие с кручением - ( $0 < \mu < 1$ ). Наоборот, коэрцитивная сила -  $H_{c\perp}$ , измеренная в перпендикулярном направлении, уменьшается при переходе от растяжения к сжатию через описанные выше промежуточные состояния, примерно на 20%).

2) Разработан метод анализа плосконапряженного состояния трубопроводов с помощью лепестковых диаграмм.

3) Показано, что показания коэрцитиметра, как правило, меняются в широком диапазоне (от 6 до 18% от минимальной величины) при варьировании положения точки измерения по длине от 0 до 2,5 метров и по углу поворота от 0 до 180°.

**Достоверность** полученных результатов обеспечивается использованием для проведения исследований трубного элемента, бывшего в эксплуатации в составе магистрального газопровода, использованием поверенного оборудования и приборов, аналого-цифрового преобразователя ZET-210, протарированных тензодатчиков, коэрцитиметра КМ-445.1, а также не противоречит результатам других авторов в части аналогичных задач исследований.

### **Основные защищаемые положения:**

- Использование параметра Лоде, с целью выявления влияния вида напряженного состояния на величину коэрцитивной силы трубопроводов.
- Метод анализа вида плосконапряженного состояния сталей с помощью лепестковых диаграмм коэрцитивной силы.
- Использование параметра механической чувствительности  $\frac{d\Delta H_c}{d\sigma_i}$  для учета влияния вида напряженного состояния на анизотропию коэрцитивной силы

**Практическая значимость** заключается в совершенствовании коэрцитиметрического анализа напряженного состояния нефтегазопроводов методом лепестковых диаграмм и введением количественного параметра механической чувствительности анизотропии коэрцитивной силы. Важность последнего подтверждается наличием актов внедрения:

- при формировании учебных материалов для организации учебного процесса на кафедре «Проектирование и эксплуатация магистральных газонефтепроводов» ФГБОУ ВПО «УГТУ» для студентов специальности 130501(Проектирование и эксплуатация магистральных газонефтепроводов);

**Апробация работы.** Основные результаты исследований докладывались и обсуждались на Межрегиональных семинарах «Рассохинские чтения-2010, 2011, 2012» (УГТУ, Ухта, 2010-2012), Международных молодежных научных конференциях «Севергеозкотех-2010, 2011, 2012» (УГТУ, Ухта, 2010-2012 гг.), Конференциях сотрудников и преподавателей УГТУ (г. Ухта, УГТУ, 2010-2012 гг.), 8 ой Международном молодежном нефтегазовом форуме КазНТУ г. Алматы, Казахстан 2011 г., VII Международной учебно – научной - практической конференции «Трубопроводный транспорт-2011» г. Уфа., Первый открытый научно – технический семинар ООО «Газпром трансгаз Ухта» «Газпром ИТЦ-2011», IX Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы развития нефтегазового комплекса России-2012» РГУ нефти и газа им Губкина г. Москва.

**Публикации:** По теме диссертации опубликованы 22 работы, из них 2 в ведущих рецензируемых изданиях, включенных в перечень ВАК России.

**Структура и объем работы:** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения. Содержит 116 страниц текста, 61 рисунок, 11 таблиц, список литературы из 111 наименований.

#### **Содержание работы**

Во введении изложены актуальность и значимость выбранной темы, степень ее разработанности, охарактеризованы научно-методические пути ее решения.

В первой главе «Анализ средств и методов контроля напряженно-деформированного состояния и надежности трубопроводов»:

-произведено описание всех существующих методов контроля напряженно-деформированного состояния металлических объектов нефтегазовой отрасли.

-определено, что наиболее эффективными являются неразрушающие

методы контроля, основанные на наведении и измерении характеристик физических полей.

Широкое применение на реальных трубопроводах нашли магнитные методы, основанные на измерении коэрцитивной силы, шумов Баркгаузена, остаточной намагниченности.

В ходе анализа трудов Агинея Р.В., Андропова И.Н., Мужичко В.Ф., Новикова В.Ф., Бердник М.М. было установлено, что все имеющиеся методики для оценки НДС по магнитным параметрам металла базируются на установлении зависимости коэрцитивной силы от величины действующих напряжений, установленных по результатам растяжения плоских образцов, а также цилиндрического образца, испытываемого под давлением и действием касательных напряжений.

В работе Новикова В.Ф. установлено, на экспериментальных образцах, что при растягивающих напряжениях уменьшаются значения продольной  $H_{c||}$  и увеличивается значения  $H_{c\perp}$ , что приводит к увеличению  $\Delta H_c$ .

В работе Агинея Р.В. было определено, что вследствие увеличения растягивающих напряжений значения коэрцитивной силы, измеренной в поперечном направлении, увеличиваются на величину около 30 %, а в продольном направлении уменьшаются на 10% до значений напряжения в 100-150 МПа, в дальнейшем не изменяются. В этом случае невозможным является объяснение роста коэрцитивной силы в поперечном направлении плоского образца, подвергнутого одноосному растяжению.

В работе Бердник М.М. исследования проводились на образцах, моделирующих фрагмент трубопровода, находящегося в плоском напряженном состоянии (при действии растягивающих-сжимающих напряжений в разных направлениях).

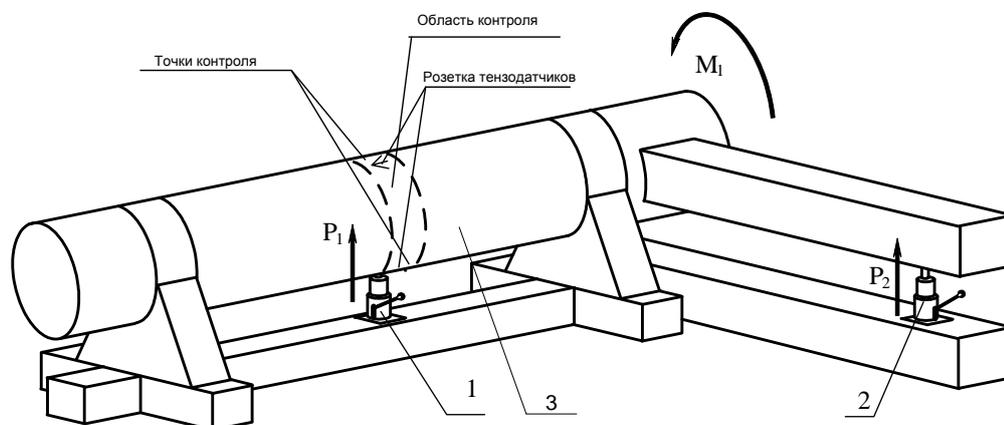
В ряде работ было установлено, что КС (коэрцитивная сила), а в особенности АКС (анизотропия коэрцитивной силы) увеличиваются с ростом уровня механических напряжений. Установленная закономерность позволяет по измерениям величин КС и АКС судить об уровне механических напряжений. Недостатком данных работ является то, что анализу подвергались стальные конструкции, которые находились в условиях одноосного напряженного состояния или двухосного напряженного состояния с конкретным соотношением главных напряжений  $\sigma_1 = \sigma; \sigma_2 = \sigma/2; \sigma_3$  Полученных в этих работах

данных недостаточно для полного представления картины влияния вида напряженного состояния на величины измеренных КС и АКС.

Особый интерес представляет изменение величин КС и АКС от интенсивности напряжений при одновременном действии осевых и касательных напряжений.

Это является ключевым моментом для дальнейшего совершенствования метода оценки напряженного состояния магистральных трубопроводов, методом измерения коэрцитивной силы металла, что является целью данной работы.

Во второй главе **«Метод проведения исследования КС и АКС при плосконапряженном состоянии металла»** представлен способ проведения исследований, выполненный на экспериментальном стенде, который позволял моделировать пять вариантов напряженно-деформированного состояния (рисунок 1), вызванных чистым изгибом, чистым кручением и совместным действием изгиба с кручением. Трубный элемент стенда имеет следующие параметры: срок эксплуатации в составе действующего газопровода – 30 лет, наружный диаметр  $D = 325$  мм, толщина стенки  $\delta = 8$  мм, длина  $L = 3000$  мм, материал – марка стали 14ХГС. Стенд нагружался с помощью ручных домкратов, позволяющих создавать в стенке трубы статические нагрузки.



**Рис. 1-Экспериментальный стенд**

Для проведения коэрцитиметрического анализа использовался прибор КМ-445.1.

Оценка фактического напряжения осуществлялась методом электротензометрии. Преобразование сигнала, поступающего с тензодатчиков, осуществлялось аналого-цифровым преобразователем (АЦП) ZETlab – 210.

Для проведения тарировки датчиков выполнялся расчет образца на максимально допустимые нагрузки с целью предотвращения его от

механического разрушения (параметры образца 240\*25\*3 мм, марка стали 17Г1С, предел прочности 350 МПа).

Результатом тарировки стала линейная зависимость измеряемых напряжений от расчетной нагрузки эталонного образца, согласно которой устанавливалась чувствительность тензодатчиков.

Область контроля на экспериментальном стенде (далее стенд) определена в центре стенда. Точки контроля в данной области были определены на верхней и нижней образующей трубного элемента.

В верхней и нижней точках устанавливались тензодатчики в виде тензорозеток, по три датчика в каждой: тензодатчик, измеряющий осевое напряжение и тензодатчики, измеряющие касательные напряжения.

Расчет для определения плоского напряженного состояния выполнялся по следующей схеме:

Обобщенный закон Гука при плоском напряженном состоянии в изотропной постановке.

$$\sigma_x - \mu\sigma_y = E\varepsilon_x; \quad (1)$$

$$-\mu\sigma_x + \sigma_y = E\varepsilon_y \quad (2)$$

$$\tau = \sigma_{xy} = G\gamma \quad (3)$$

Решалась система (1,2), находили:

$$\sigma_x = \frac{E(\varepsilon_x + \mu\varepsilon_y)}{1 - \mu^2} \quad (4)$$

$$\sigma_y = \frac{E(\varepsilon_y + \mu\varepsilon_x)}{1 - \mu^2} \quad (5)$$

Формулы преобразования напряжений при повороте координатных осей осуществляются в соответствии с правилом Эйнштейна (суммирования по повторяющимся индексам):

$$\sigma'_{ij} = \alpha_{ik} \alpha_{jl} \sigma_{kl} \quad (6)$$

Где направляющие косинусы находятся согласно:

$$\alpha_{ik} = \begin{pmatrix} \cos\alpha & \sin\alpha \\ -\sin\alpha & \cos\alpha \end{pmatrix} \quad (7)$$

В данной работе конкретно использовали три скрещенных тензодатчика взаимно ориентированных под углами  $0^\circ$  и  $\pm 45^\circ$ . Из формулы (7) получим расчетные формулы для углов:

$$\sigma'_x = \frac{\sigma_x}{2} + \frac{\sigma_y}{2} + \tau \quad (8)$$

$$\sigma''_x = \frac{\sigma_x}{2} + \frac{\sigma_y}{2} - \tau \quad (9)$$

Из формул (8) и (9) получаем:

$$\tau = \frac{\sigma_x' - \sigma_x''}{2} \quad (10)$$

$$\sigma_y = \sigma_x' - \sigma_x'' - \sigma_x \quad (11)$$

Таким образом, при любом из возможных вариантов нагружения в общем случае реализуется плосконапряженное состояние с напряжениями  $\sigma_x, \sigma_y$  и  $\tau$ . При этом  $\tau$  и  $\sigma_y$  определяется из соотношений (16, 17), а  $\sigma_x'$ ;  $\sigma_x''$  и  $\sigma_x$  находились из показаний оттарированных тензометров.

Далее находилась интенсивность для плоско - напряженного состояния:

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + \sigma_x^2 + \sigma_y^2 + 6\tau^2} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau^2} \quad (12)$$

Все опыты осуществлялись с шагом по интенсивности примерно 20 МПа.

Для анализа вида напряженного состояния использовался параметр Лоде

$$\mu = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}, \quad (13)$$

Где  $\sigma_1, \sigma_2$  и  $\sigma_3$  - главные напряжения.

Для плоского напряженного состояния находились главные напряжения по формулам (14-16):

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau^2} \quad (14)$$

$$\sigma_2 = 0 \quad (15)$$

$$\sigma_3 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau^2} \quad (16)$$

Из формул (14-16) находилось выражение параметра Лоде для плоско – напряженного состояния:

$$\mu = \frac{-\sigma_x - \sigma_y}{\sqrt{(\sigma_x + \sigma_y)^2 + 4\tau^2}} \quad (17)$$

За базовое направление измерения Нс|| принималось направление максимального главного напряжения  $\sigma_1$ , а за направление Нс $\perp$  принималось направление, ориентированное под углом 90 $^\circ$ .

Главные оси находились по соотношению (18):

$$\operatorname{tg}2\alpha = \frac{2\tau}{\sigma_x - \sigma_y} \quad (18)$$

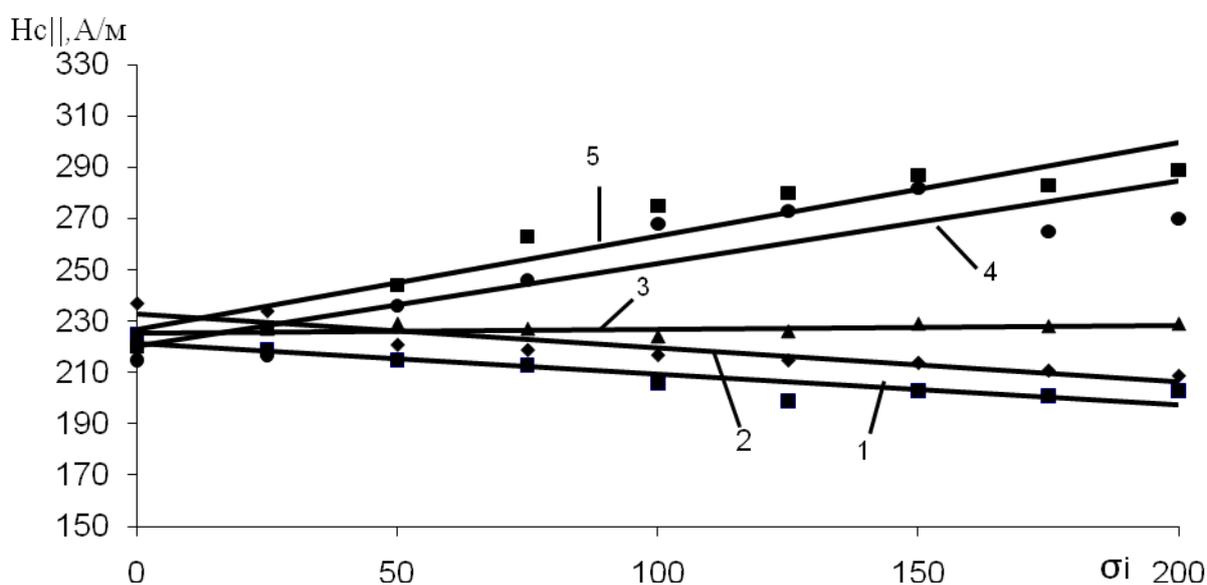
В третьей главе *«Проведение исследований на экспериментальном стенде»* описан ряд лабораторных исследований на экспериментальном стенде для определения величин КС и АКС от интенсивности напряжений при одновременном действии осевых и касательных напряжений. Осевые и

касательные напряжения создавались в диапазоне от 0 до 200 МПа. Для учета всех возможных случаев нагружения трубопровода при определении его НДС проводились измерения коэрцитивной силы металла, намагничивая его в 8 направлениях в точке контроля.

Цель первого этапа исследований - установление зависимостей КС и АКС от интенсивности напряжений.

Определение вида напряженного состояния согласно показаниям лепестковых диаграмм.

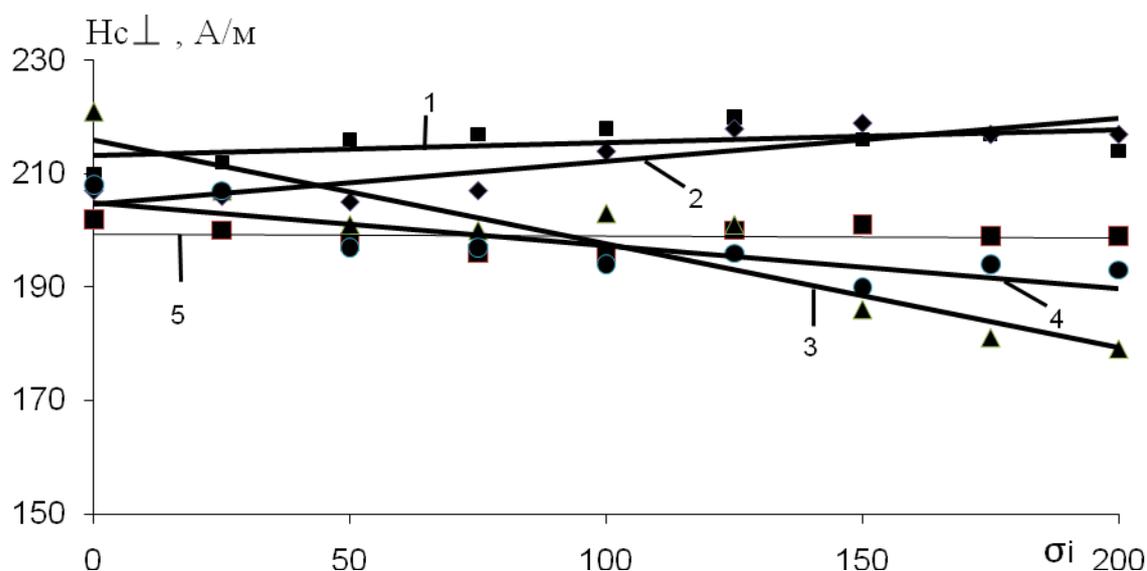
Определение зависимостей КС и АКС от интенсивности напряжений. Результаты представлены на рисунках 4,5.



**Рис.4** Зависимости  $H_{c||}$  от интенсивности напряжений.

**1-Растяжение; 2-Растяжение-сдвиг; 3-Сдвиг; 4-Сжатие-сдвиг; 5-Сжатие.**

Из хода кривых на рис. 4 видно, что коэрцитивная сила неоднозначно зависит от интенсивности напряжений. Величина  $H_{c||}$  не зависит от  $\sigma_i$  при растяжении со сдвигом (2) и при сдвиге (3) заметно убывает при растяжении (1), и довольно сильно возрастет при сжатии со сдвигом (4) и при сжатии(5).



**Рис.5 . Зависимости  $H_{c\perp}$  от интенсивности напряжений.**

**1-Растяжение; 2-Растяжение-сдвиг; 3-Сдвиг; 4-Сжатие-сдвиг; 5-Сжатие.**

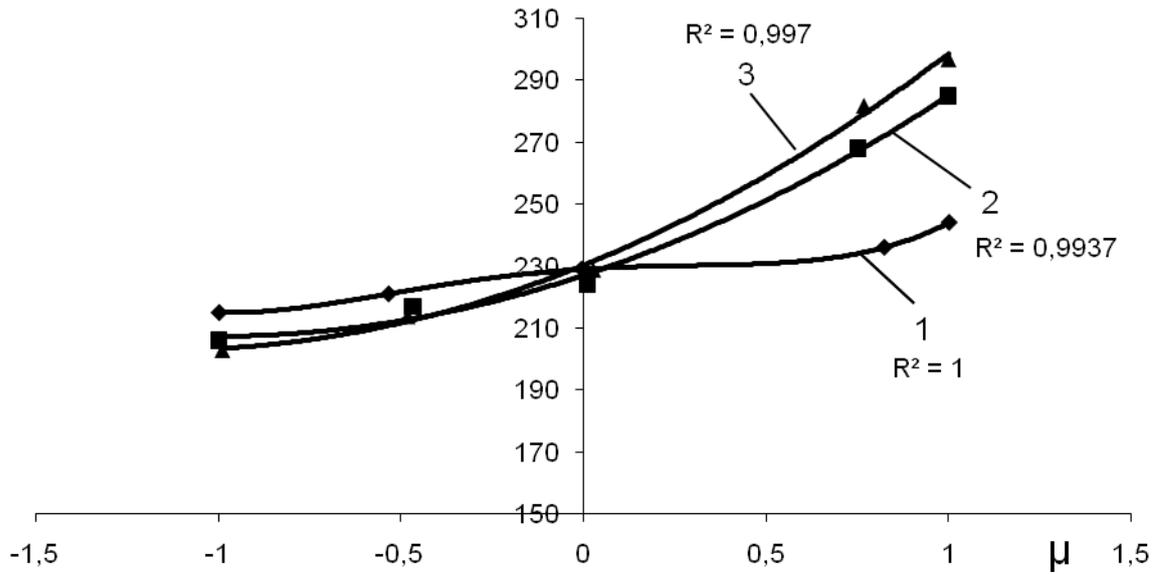
Из хода кривых на рис. 5. видно, что величина  $H_{c\perp}$  практически не зависит от интенсивности напряжений при сжатии со сдвигом- (4) и при сжатии - (5); наблюдается ее незначительный рост при растяжении - (1) и при растяжении со сдвигом - (2) и имеет место ощутимый рост при сдвиге - (3).

Целью второго этапа исследований было установление зависимостей КС и АКС от параметра Лоде.

Значения интенсивности напряжений, при котором производились замеры, были выбраны в 50, 100 и 150 МПа. В ходе проведения эксперимента высчитывался параметр Лоде согласно полученным показаниям КС и АКС.

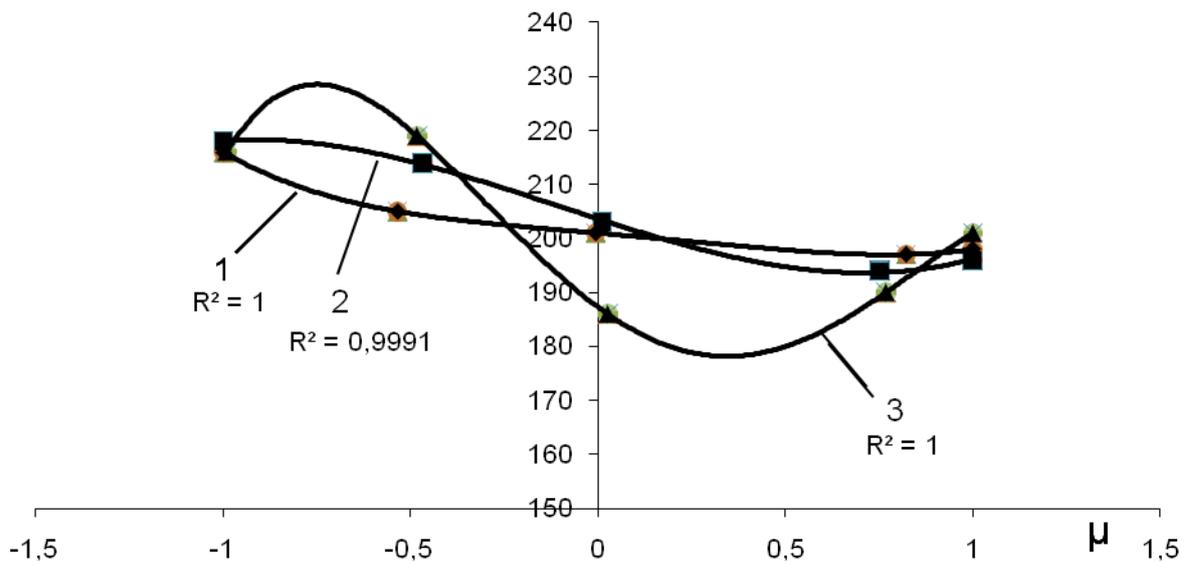
Результаты исследований представлены на рисунках 6-8.

$H_{c \parallel}, A/m$



**Рис.6** Зависимости  $H_{c \parallel}$  от параметра Лодэ при интенсивности напряжений равной 50(1); 100(2) и 150 МПа (3).

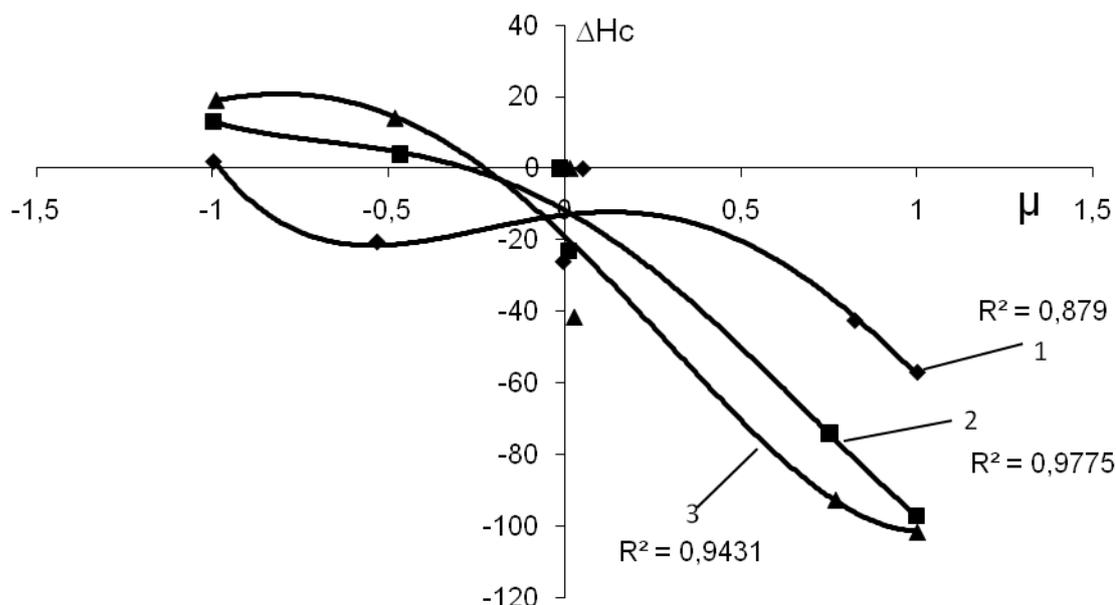
$H_{c \perp}, A/m$



**Рис.7** Зависимости  $H_{c \perp}$  от параметра Лодэ при интенсивности напряжений равной 50(1); 100(2) и 150 МПа (3).

На рис. 6 и 7 изображено влияние вида напряженного состояния на величины анизотропии коэрцитивной силы  $H_{c \parallel}$  и  $H_{c \perp}$  для трех уровней интенсивности нормальных напряжений  $\sigma_i$ . Из хода кривых следует, что названные величины существенно зависят от  $\mu$ . Коэрцитивная сила -  $H_{c \parallel}$  - в целом возрастает на 30-40% при переходе от растяжения ( $\mu = -1$ ) к сжатию

( $\mu = 1$ ) через промежуточные состояния: совместное растяжение с кручением - ( $-1 < \mu < 0$ ); кручение ( $\mu = 0$ ); совместное сжатие с кручением - ( $0 < \mu < 1$ ). При этом  $\left| \frac{\Delta H_c^{II}}{\Delta \mu} \right| = 40 \text{ АМ}^{-1}$ .  $H_{c\perp}$ , наоборот, уменьшается при переходе от растяжения к сжатию через описанные выше промежуточные состояния примерно на 20%. При этом  $\left| \frac{\Delta H_c^{II}}{\Delta \mu} \right| = 20 \text{ АМ}^{-1}$ .



**Рис.8** Зависимости разностной анизотропии коэрцитивной силы от параметра Лоде при интенсивности напряжений равной 50(1); 100(2) и 150 МПа (3)

На рис. 8 дана зависимость разностной анизотропии  $\Delta H_c = H_{c\perp} - H_{c\parallel}$  от параметра Лоде, при этом интенсивность влияния НДС в этом случае  $\left| \frac{d\Delta H_c}{d\mu} \right|$  достигает  $70 \text{ АМ}^{-1}$ . Таким образом анализ кривых на рис. 6-8 показывает, что используемые в работе значения коэрцитивной силы  $H_{c\parallel}$ ,  $H_{c\perp}$  и  $\Delta H_c$  сильно зависят от вида напряженного состояния, задаваемого параметром  $\mu$ . Сказанное позволяет говорить о существенной “стресс” чувствительности коэрцитивной силы стали 14ХГС.

Приведенные выше результаты показывают, что на характер зависимости КС от интенсивности напряжений оказывает существенное влияние вид напряженного состояния. При постоянной интенсивности  $\sigma_i$  значения КС сильно зависят от величины параметра Лоде.

В рамках третьего этапа было проведено исследование плосконапряженного состояния металла методом лепестковых диаграмм.

За исходное направление принимали осевое направление стэнда. Измеряли КС в 8 направлениях. Это повторяли для каждого шага нагружения при интенсивности нормальных напряжений  $\sigma_i = 0; 100; 200$  МПа.

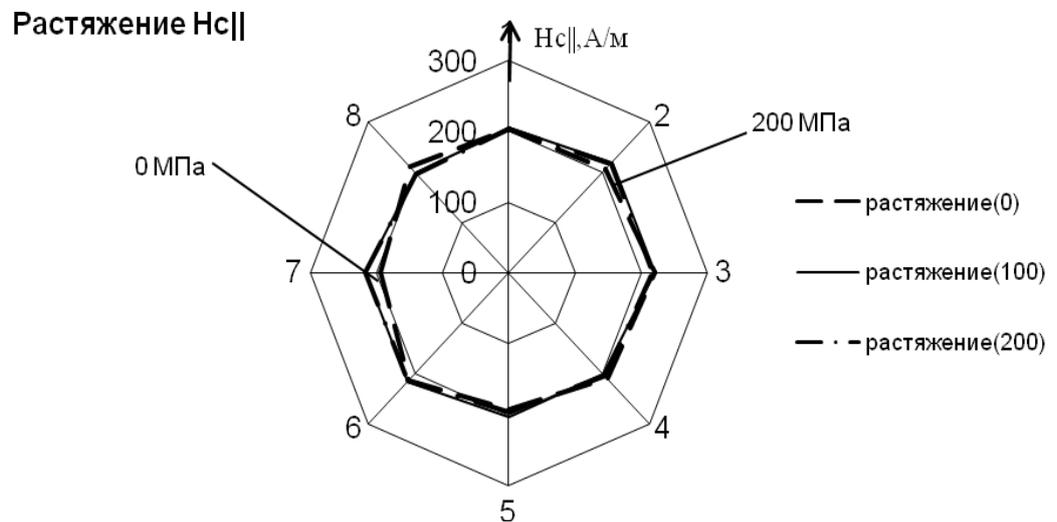
Интенсивность напряжений находили для плоского напряженного состояния по формуле:

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_{\kappa}^2 + \sigma_{np}^2 - \sigma_{\kappa}\sigma_{np} + 3\tau^2}, \quad (19)$$

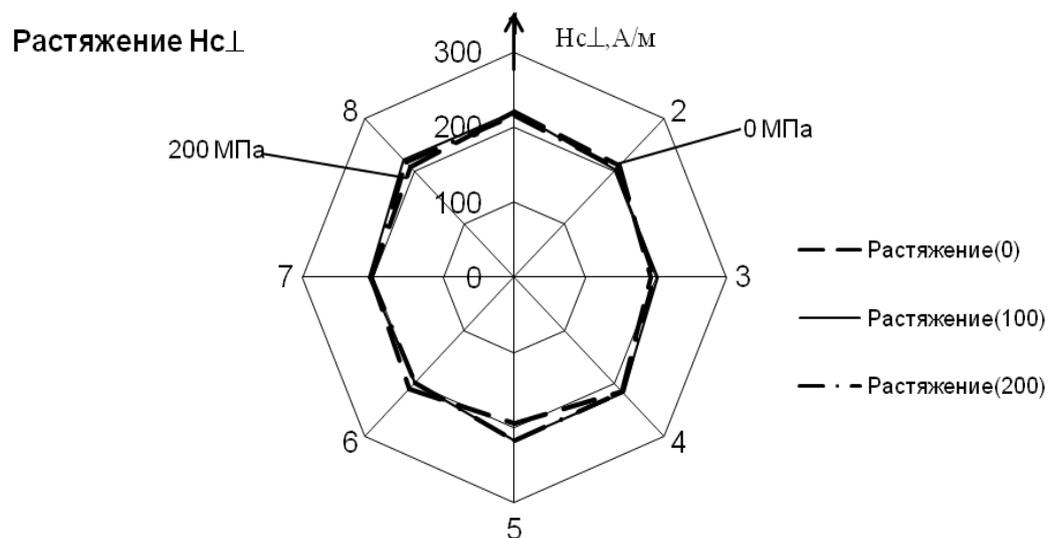
где  $\sigma_{\kappa}$  и  $\sigma_{np}$  – кольцевые и продольные напряжения,  $\tau$  - касательные напряжения.

Результаты испытаний представлены на рис.9

а)

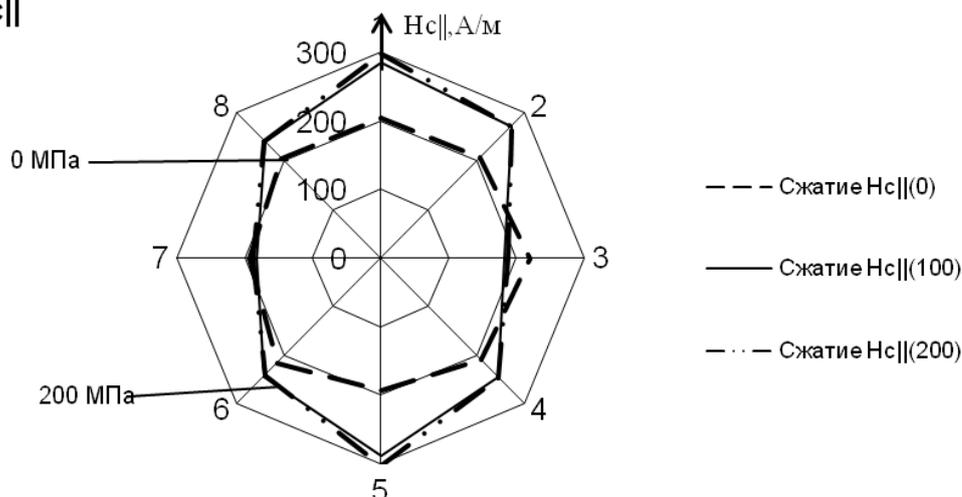


б)



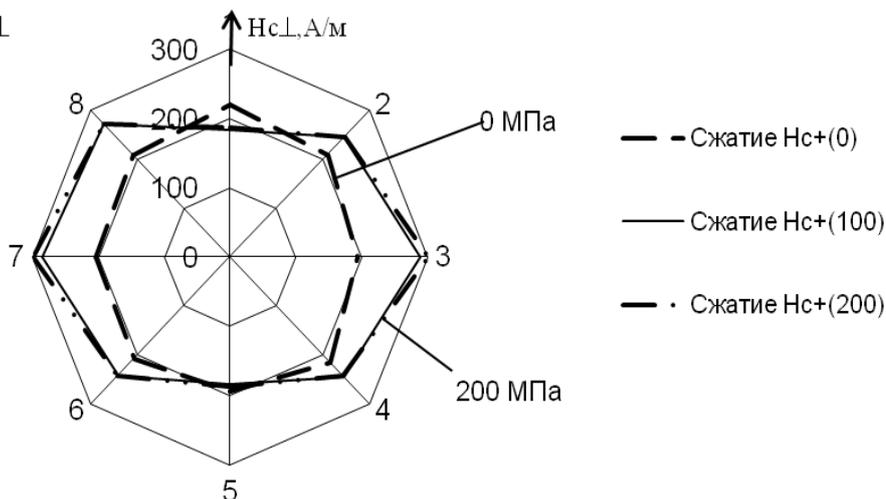
в)

Сжатие  $H_{c||}$



г)

Сжатие  $H_{c\perp}$



**Рис. 9-** Лепестковые диаграммы для  $H_{c||}$  и  $H_{c\perp}$  при: а,б - растяжении ( $\mu = -1$ ), в,г - сжатии ( $\mu = 1.0$ ). При интенсивности напряжений  $\sigma_i = 0; 100$  и  $200$  МПа.

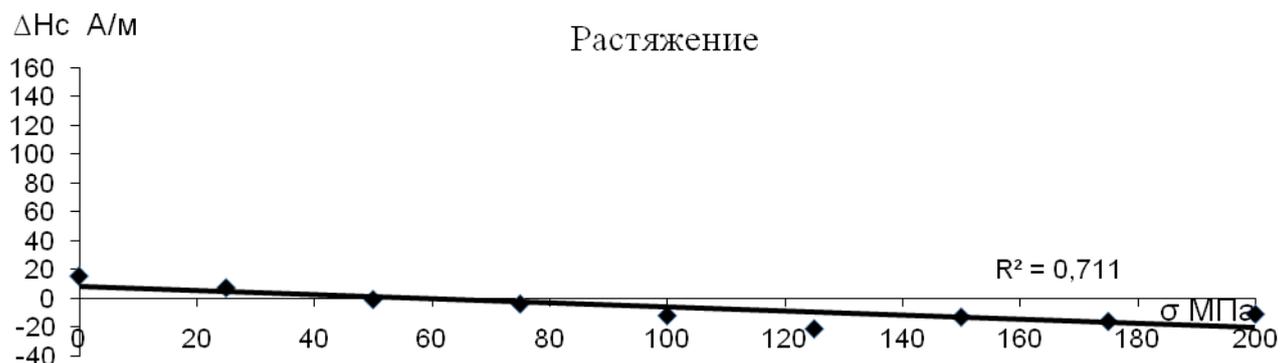
Из диаграмм установлено, что наиболее чувствителен метод лепестковых диаграмм при деформации сжатия ( $\mu = 0,5$ ) и сжатия со сдвигом ( $\mu = 1.0$ )

Для установления конкретного влияния вида напряженного состояния на показания коэрцитиметра использовался параметр анизотропии коэрцитивной силы  $\Delta H_c$ .

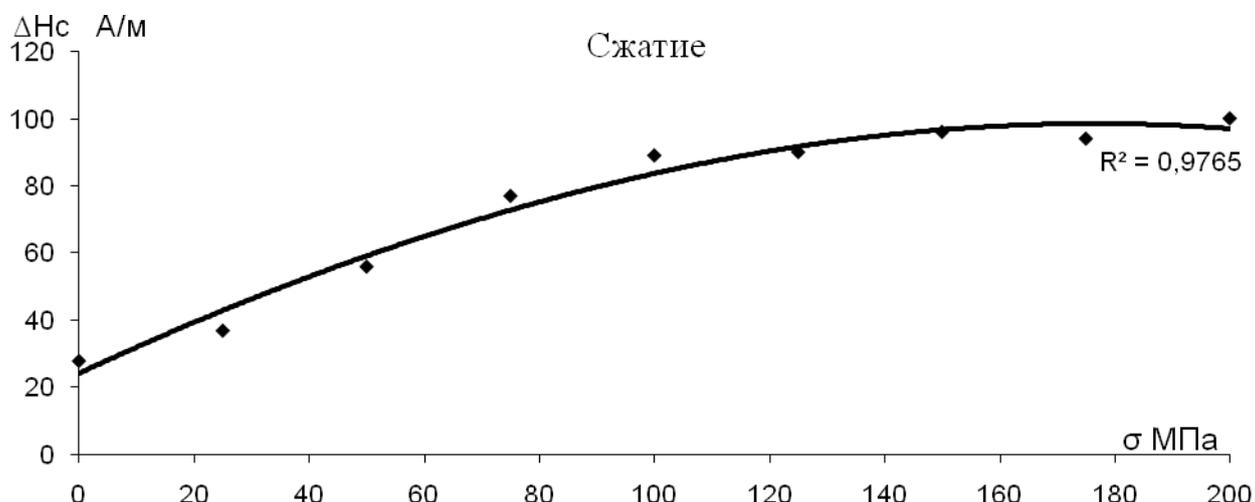
$$\Delta H_c = H_{c||} - H_{c\perp}$$

Строились зависимости  $\Delta H_c$  от интенсивности нормальных напряжений  $\sigma_i$ .

а)



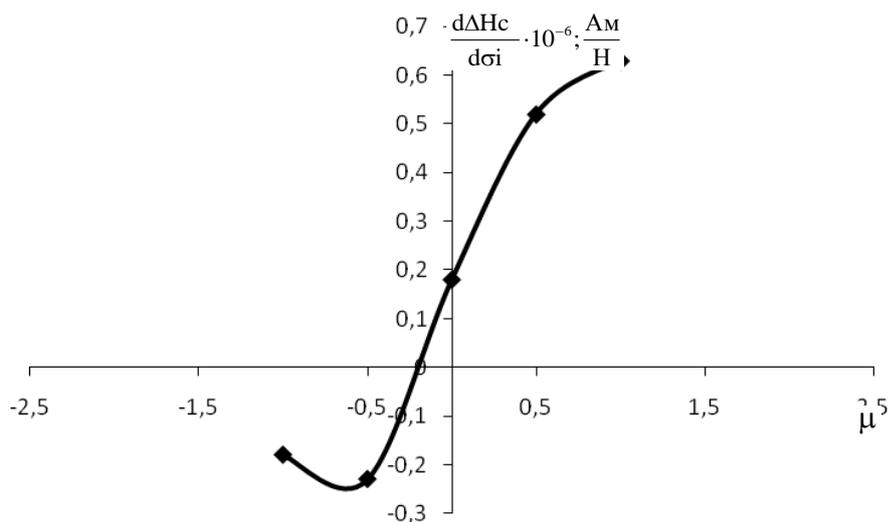
б)



**Рис. 10 - Зависимость анизотропии коэрцитивной силы при: а-растяжении ( $\mu = -1$ ), б- сжатии ( $\mu = 1$ ).**

Определено, что наиболее сильное (по абсолютной величине) влияние напряженного состояния прослеживается при состоянии сжатия ( $\mu = 1$ ) рис. «б». Наиболее слабое влияние наблюдается при состоянии растяжения ( $\mu = -1$ ) рис. «а».

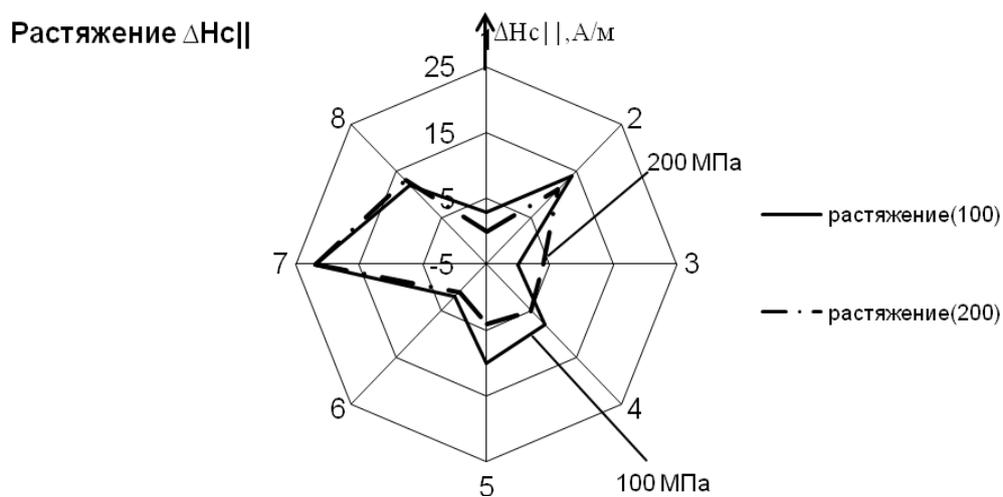
Для количественного анализа приведенных зависимостей был введен скалярный дифференциальный параметр механической чувствительности анизотропии коэрцитивной силы,  $\frac{d\Delta H_c}{d\sigma_i}$  определяемый при  $\sigma_i = 0$  для конкретного вида напряженного состояния, характеризуемого параметром Лоде.



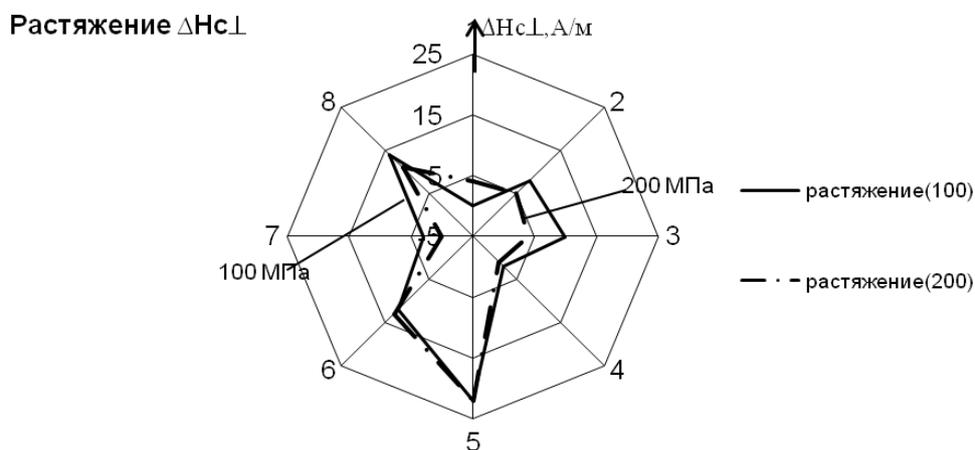
**Рис. 11- Влияние вида напряженного состояния на механическую чувствительность анизотропии коэрцитивной силы.**

Четвертый этап исследований заключался в установлении влияния интенсивности напряжений на АКС при  $\sigma_i = 100$  и  $200$  МПа.

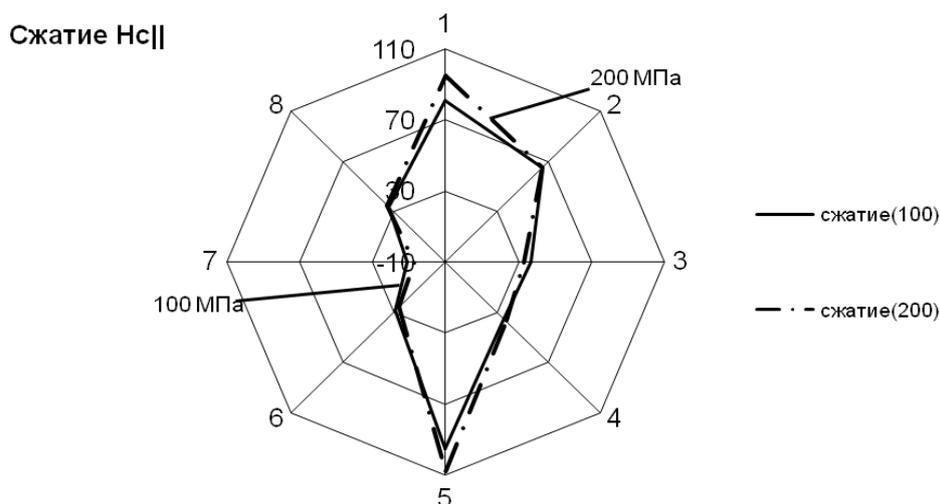
а)



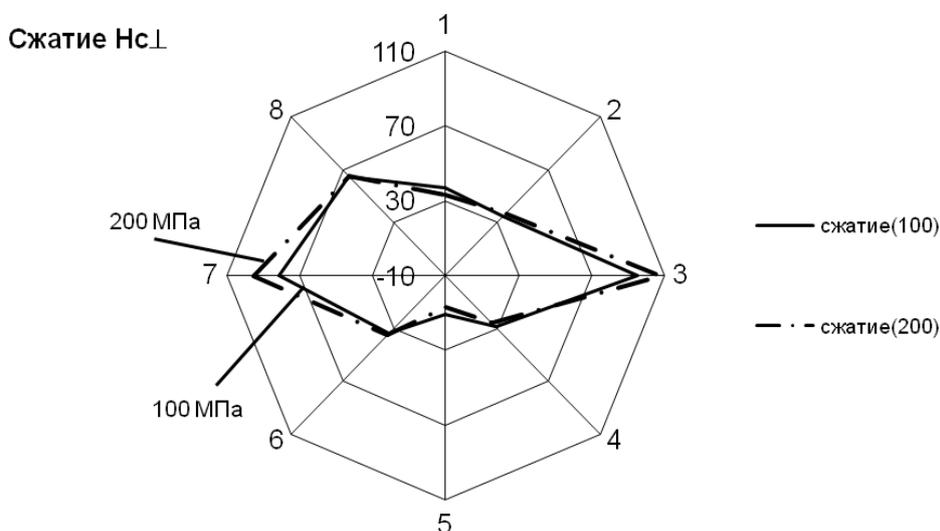
б)



в)



г)



**Рис.12-** Лепестковые диаграммы для анизотропии коэрцитивной силы  $\Delta H_{с||}$  и  $\Delta H_{с\perp}$  при интенсивности напряжений  $\sigma_i = 100$  и  $200$  МПа.

Графически установлено, что наиболее чувствительна АКС в направлениях  $\Delta H_{с||}$  и  $\Delta H_{с\perp}$  при деформациях сжатия ( $\mu = 1.0$ ) и сжатия со сдвигом ( $\mu = -0,5$ ).

Также установлено, что при  $\Delta H_{с||}$  и  $\Delta H_{с\perp}$  диаграммы отличаются друг от друга лишь смещением линий на угол поворота в 90 градусов относительно оси трубы.

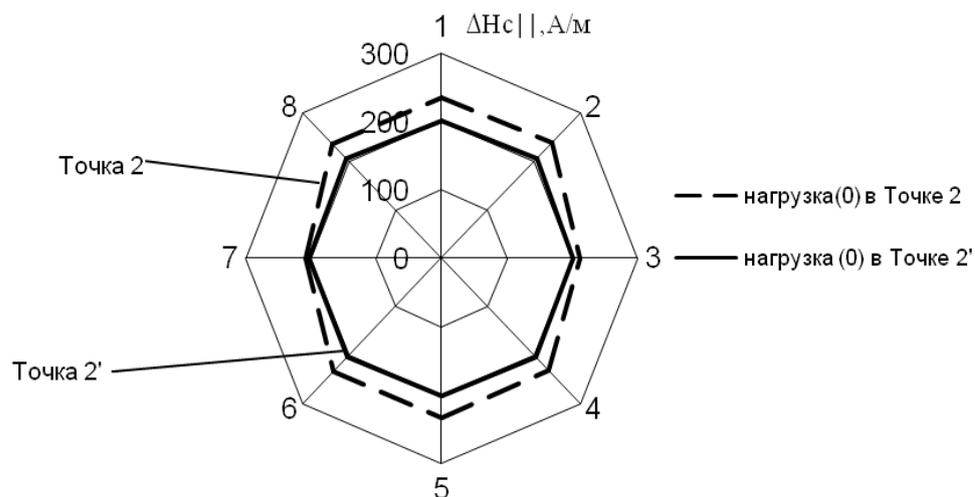
Эксперименты, выполненные при деформациях растяжения со сдвигом и сжатия со сдвигом, и результаты, представленные на рис.12 а, б, в, г, вносят качественно новое представление о плосконапряженном состоянии металла, которые не имеют аналогов в мировой практике исследования напряженного состояния в области коэрцитиметрических исследований.

Пятый этап исследований проводился с целью установления влияния местоположения точки контроля при испытании на вид лепестковой диаграммы.

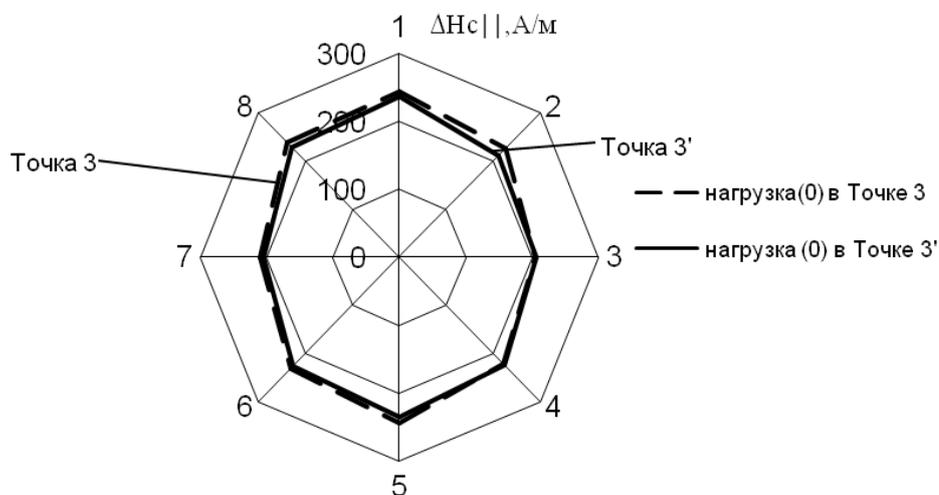
Эксперимент был сделан для исследования распределения разностной анизотропии коэрцитивной силы на противоположных концах трубного элемента при отсутствии нагрузки.

Были выбраны 8 точек по всей длине трубы. Четыре точки были определены в области жесткой заделки и 4 в области кручения, расположенных на 12ч, 3ч, 6ч и 9ч соответственно. Измерения проводились во взаимно противоположных точках, находящихся по диагонали друг к другу (рис.13).

а)



б)



в)

г)

Расхождение в %: а)- 8-18%; б)- 6-12%

**Рис. 13 - Лепестковая диаграмма разностной АКС на противоположных краях трубы при  $\sigma_i = 0$  МПа**

Из процентного соотношения (от 6 до 18%) было установлено, что согласно направлениям измерений расхождения носят достаточно весомый характер. Данный факт подтверждает гипотезу о существенной разнице магнитных свойств

металла на противоположных концах участка трубопровода. Однако данные виды деформаций не описывают всей картины плосконапряженного состояния.

В четвертой главе «Практическое применение усовершенствованного метода коэрцитивной силы для анализа напряженного состояния» приводится описание практического внедрения усовершенствованного метода диагностики напряженного состояния трубопроводов.

Практическая значимость заключается в совершенствовании коэрцитиметрического анализа напряженного состояния нефтегазопроводов методом лепестковых диаграмм и введением количественного параметра механической чувствительности анизотропии коэрцитивной силы.

Полученные в ходе экспериментов данные подтверждаются наличием «Актов внедрения» в учебный процесс- при формировании учебных материалов на кафедре «Проектирование и эксплуатация магистральных газонефтепроводов» ФГБОУ ВПО «УГТУ».

Реализация метода в реальных условиях осуществима только к трубопроводам, которые находятся в условиях надземной прокладки, т.е. открытых участках, т.к. метод является контактным.

К таким трубопроводам относят газонефтепроводы., проложенные надземным способом, трубопроводные обвязки компрессорных станций и газораспределительных станций, технические трубопроводы на НПС и НПЗ.

Лепестковые диаграммы разностной анизотропии коэрцитивной силы на противоположных краях трубы при  $\sigma_i = 0$  МПа показали, что разница в процентном соотношении показаний коэрцитивной силы, составляет около 10%, а в некоторых случаях достигает 18%.

Полученный результат свидетельствует о том, что труба по всей длине имеет неоднородную структуру металла в разных ее точках.

Если исследовать трубу с большим диаметром, толщиной и длиной, а также большим количеством точек контроля, то диаграммы покажут другую картину с большим процентным расхождением. Таким образом, можно сделать вывод, что чем больше точек будет выбрано для контроля, тем разнообразнее будет представлен результат на лепестковых диаграммах. Вышесказанное, говорит о том, что каждая сталь имеет свою специфику.

Результаты работы позволят на практике производить паспортизацию трубопроводов согласно марке стали, в которой будут указаны начальные

показания разностной анизотропии КС металла ( $\Delta H_c||$ ) в процентном расхождении.

Предложенная методика позволит определять напряженное состояние участка трубопровода в нерабочем состоянии, т.е. без эксплуатационных нагрузок  $P_0$ . Далее будут производиться измерения коэрцитивной силы того же участка трубопровода при рабочих нагрузках, т.е. в эксплуатационных условиях почти сразу после запуска трубопровода  $P_p$ . После чего следует измерение КС по истечении определенного периода эксплуатации  $P_t$ .

Данная методика позволит фиксировать изменения показаний КС трубопровода, происходящие за время его эксплуатации и делать заключение о напряженном состоянии данного участка трубопровода.

Комплекс таких мероприятий по определению напряженного состояния позволит повысить качество диагностических данных и давать более точное экспертное заключение о дальнейшей эксплуатации трубопровода. Это приведет к сокращению времени и затрат на проведение дополнительных диагностических мероприятий, а также продлит срок эксплуатации нефтегазопроводов.

#### **Основные выводы:**

1) Экспериментально установлено, что на показания КС оказывает влияние интенсивность напряжений, вид напряженного состояния, а также магнитная неоднородность поверхности трубопровода.

2) Установлено, что кроме вида напряженного состояния на показания КС существенное влияние оказывает геометрическое местоположение точки контроля.

3) На основании полученных результатов предложен способ анализа состояния нефтегазопроводов методом лепестковых диаграмм.

4) Конкретизирован анализ состояния нефтегазопровода с помощью приращения КС.

**Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:**

**1.Агинец Р.В., Леонов И.С. Исследование изменения коэрцитивной силы и параметров твердости стенок трубы при деформировании изгибом [Текст]/ Науч.-техн. журнал Трубопроводный транспорт. Теория и практика №3(31)2012, с 39-44.**

**2. Андронов И.Н., Агиней Р.В., Леонов И.С. Коэрцитиметрический анализ плоско-напряженного состояния в магнитных сплавах. [Текст]/Науч.-техн. журнал Заводская лаборатория. Диагностика материалов. №6 (т.79) 2013, с. 55-57.**

3. Леонов И.С., Бердник М.М. Применение магнитных методов для контроля напряженного состояния трубопроводов. Инновационное нефтегазовое оборудование: проблемы и решения: Материалы Всероссийской науч.-техн. конф.-Уфа:Изд-во УГНТУ, 2010-353 с.233-237.

4. Леонов И.С., Бердник М.М. Обоснование конструкции лабораторного стенда для исследования сложного НДС трубопроводов. Инновационное нефтегазовое оборудование: проблемы и решения: Материалы Всероссийской науч.-техн. конф.-Уфа:Изд-во УГНТУ, 2010-353 с.201-204.

5. Агиней Р.В., Леонов И.С. Электротензометрический метод контроля напряженно-деформированного состояния с применением аналого – цифрового преобразователя (АЦП). 8-ой Международный Нефтегазовый Форум: Труды науч.-практ. конф.-Алматы, КазНТУ, 2011 г.-208с.147-150с.

6. Агиней Р.В., Леонов И.С. Применение аналого-цифрового преобразователя в тензометрических измерениях. Первый открытый научно-технический семинар молодых работников и специалистов «Новые технологии в газовой отрасли. Актуальные проблемы газовой промышленности» ОАО «Газпром трансгаз Ухта», Газпром ИТЦ. г. Ухта, 2011 г.36с.-с 12-13.

7. Леонов И.С. Методика проведения тензометрических измерений на экспериментальном образце. Сборник научных трудов [Текст]: материалы научно-технической конференции (20 - 23 сентября 2011 г.): в 3 ч.; ч. I / под ред. Н. Д. Цхадая. – Ухта: УГТУ, 2011. – 401 с.: ил.С.241-245.

8. Леонов И.С. Применение электротензометрии для контроля напряженного деформированного состояния на экспериментальном стенде. Рассохинские чтения [Текст]: материалы межрегионального семинара (3-4 февраля 2011 года) / под ред. Н. Д. Цхадая. – Ухта: УГТУ, 2011. – 365 с.: ил.с.306-309.

9. Леонов И.С. Применение АЦП для обработки тензометрических данных, полученных на экспериментальном стенде. XII международная молодежная научная конференция «Севергеозкотех-2011»: материалы конференции (16-18 марта 2011 г, Ухта): в 5ч. ; ч.2.-Ухта:УГТУ, 2011.-414 с.230-233с.

10. Леонов И.С. Электротензометрия как метод контроля напряженно-деформированного состояния на экспериментальном стенде. XII международная молодежная научная конференция «Севергеозкотех-2011»: материалы конференции (16-18 марта 2011 г, Ухта): в 5ч.; ч.2.-Ухта:УГТУ,2011.-414 с.233-237с.

11. Леонов И.С. Отработка методики контроля напряженно-деформированного состояния на экспериментальном образце. Трубопроводный транспорт – 2011:материалы VII Международной учебно-научно-практической конференции/ редкол.: А. М. Шаммазов и др.-Уфа: Изд-во УГНТУ, 2011.-315с.

12. Леонов И.С. Исследование сложно - напряженного состояния методом коэрцитивной силы металла. Рассохинские чтения [Текст]: материалы межрегионального семинара (3-4 февраля 2012 года) / под ред. Н. Д. Цхадая. – Ухта: УГТУ, 2012. – 421 с.: ил.с.332-335.

13. Леонов И.С. Экспериментальное определение калибровки тензорезисторов с помощью аналого-цифрового оборудования. Рассохинские чтения [Текст]: материалы межрегионального семинара (3-4 февраля 2012 года) / под ред. Н. Д. Цхадая. – Ухта: УГТУ, 2012. – 421 с.: ил.с.335-338.

14. Агинея Р.В., Леонов И.С. Определение зависимости коэрцитивной силы и твердости металла трубы от напряжений растяжения-сжатия. Сборник научных трудов [Текст]: материалы научно-технической конференции (17-20 апреля 2012 г.): в 3 ч.; ч. I / под ред. Н. Д. Цхадая. – Ухта: УГТУ, 2012. – 404 с.: ил.с.178-182.