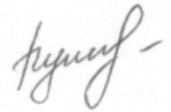


На правах рукописи



ПУТИЛОВА ЕВГЕНИЯ АЛЕКСАНДРОВНА

МАГНИТНЫЙ КОНТРОЛЬ СТРУКТУРЫ, ФАЗОВОГО СОСТАВА И  
ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ  
МАТЕРИАЛОВ

Специальность 05.11.13 – «Приборы и методы контроля природной среды,  
веществ, материалов и изделий»

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки  
Институте машиноведения Уральского отделения Российской академии наук

Научный руководитель: Горкунов Эдуард Степанович,  
академик РАН, доктор технических наук,  
профессор, директор ИМАШ УрО РАН

Официальные оппоненты: Гладковский Сергей Викторович, доктор  
технических наук, доцент, Федеральное  
государственное бюджетное учреждение науки  
Институт машиноведения Уральского отделения  
Российской академии наук, заведующий  
лабораторией

Дерягин Анатолий Иванович, кандидат физико-  
математических наук,  
Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки Ордена Трудового Красного  
Знамени Институт физики металлов Уральского  
отделения Российской академии наук, старший  
научный сотрудник

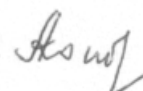
Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
профессионального образования «Национальный  
исследовательский Томский политехнический  
университет», г. Томск

Защита диссертации состоится 10 декабря 2013 в 14.00 на заседании  
диссертационного совета Д 004.023.01 при Федеральном государственной  
бюджетном учреждении науки Институте машиноведения Уральского отделения  
Российской академии наук по адресу: 620049, г. Екатеринбург, ул.  
Комсомольская, 34.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального  
государственного бюджетного учреждения науки Института машиноведения  
Уральского отделения Российской академии наук.

Автореферат разослан «            » ноября 2013 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
доктор технических наук, профессор



Коновалов А.В

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

Развитие современной промышленности тесно взаимосвязано с созданием и внедрением новых технологий и в особенности перспективных материалов, которые удовлетворили бы постоянно повышающиеся требования к их прочностным и технологическим свойствам, а также долговечности, надежности и экономичности. Анализ тенденций развития современного производства свидетельствует о том, что одно из эффективных решений отмеченной проблемы заключается в разработке и создании многокомпонентных или многослойных материалов. Слои или компоненты таких материалов по-отдельности обладают разным набором требуемых свойств, но при их соединении возможно получение материала, который будет сочетать в себе преимущества каждого из слоев.

Примерами многокомпонентных материалов, получивших широкое распространение в промышленности, являются конструкционные стали, плакированные коррозионностойкой сталью. Применение подобных биметаллов обусловлено требованиями химической промышленности, например, для создания различного рода резервуаров для хранения химически-активных веществ.

Сварное соединение, в принципе, также можно считать макронеоднородным и отнести к классу многокомпонентных материалов. Компонентами данной системы являются – основной металл, околошовная зона (ОШЗ) и зона шва. В виду термического воздействия и различия в химическом составе между основным материалом и металлом шва структура всех трех зон будет различной. И, как известно, структура материала определяет его свойства – физические и механические. Поэтому в процессе изготовления и эксплуатации материал различных участков сварных конструкций будет по-разному реагировать на влияние окружающей среды, например на действующие в процессе эксплуатации упругопластические деформации.

Применение макронеоднородных материалов с одной стороны позволяет достичь необходимого уровня свойств при одновременном снижении стоимости продукции, но с другой стороны наличие компонентов с разным уровнем свойств приводит к возникновению проблемы контроля и диагностики таких изделий, как на стадии изготовления, так и в процессе эксплуатации. Оценивать подобные материалы как единое целое оказывается неэффективно, поскольку изменения могут происходить лишь в какой-то одной составляющей, либо в каждом компоненте, но в разной степени.

В связи с этим решение задач, связанных с созданием и разработкой методов неразрушающего контроля, позволяющих диагностировать изменения, происходящие в структуре и свойствах отдельных слоев или компонентов макронеоднородных изделий, является актуальным.

С середины прошлого столетия рядом авторов (М.Н. Михеев, И.А. Кузнецов, Э.С. Горкунов, Б.М. Лapidус, Г.В. Бида, А.П. Ничипурук, В.Н. Костин и др.) было опубликовано большое количество работ, посвященных

магнитному контролю структуры и прочностных характеристик поверхностно-упрочненных изделий, которые также можно отнести к макронеоднородным материалам. В литературе также описаны распределение магнитных свойств двухслойных материалов с компонентами различной степени жесткости и расчеты коэрцитивной силы двухслойного образца (И.Я. Дехтяр, Keun-Long Wang, Э.С. Горкунов, А.М. Поволоцкая и др.). Работ, посвященных исследованию изменений, происходящих в многокомпонентных системах в целом и их отдельных слоях при приложении внешней нагрузки, при помощи магнитных методов практически нет. При анализе литературных данных работ, направленных на исследование магнитных свойств отдельных зон сварных соединений, и действия различного вида деформаций на них не было обнаружено. Поэтому проведение исследований, направленных на разработку основ для создания неразрушающего магнитного метода контроля структурно-фазового состава и уровня физико-механических свойств макронеоднородных материалов, является весьма актуальным.

**Целью диссертационного работы** является определение возможностей применения магнитного контроля для оценки изменений, происходящих в структуре, фазовом составе, физико-механических свойствах отдельных слоев в многокомпонентных материалах под действием приложенных напряжений и деформаций.

Для достижения цели диссертационного исследования, необходимо решить следующие **задачи**.

1. Экспериментально исследовать и установить зависимости магнитных свойств модельных и реально используемых слоистых материалов, компоненты которых обладают значительно отличающимися структурой и физико-механическими свойствами, от степени упругопластической и пластической деформаций.

2. Определить магнитные параметры, чувствительные к протеканию деформационных фазовых превращений в одном из компонентов слоистого материала.

3. Экспериментально исследовать структуру и физико-механические свойства различных зон сварного соединения (материала шва, околошовной зоны и основного металла), с целью выбора информативных параметров, позволяющих оценивать изменения текущего состояния в каждой отдельной зоне сварного соединения. Для основного металла трубы установить информативные параметры, позволяющие контролировать качество термической обработки в процессе изготовления трубы.

4. Оценить влияние приложенных нагрузок по разным схемам нагружения на чувствительность магнитных параметров материалов с разным структурным состоянием.

5. Определить возможность и адекватность применения накладных преобразователей для оценки текущего состояния как многокомпонентного изделия в целом, так и его отдельных компонентов.

**Научная новизна** результатов работы заключается в следующем.

1. Показано, что для диагностики деформационно-фазовых превращений в коррозионностойких аустенитных сталях в составе макронеоднородного материала может использоваться значение максимума дифференциальной проницаемости, определяемого из зависимости дифференциальной магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля.

2. Экспериментально установленные различия в структуре и уровне физико-механических свойств основного металла, материала околошовной зоны и сварного шва позволяют рассматривать его в магнитном отношении как многослойный материал.

3. Полученные новые экспериментальные результаты по влиянию различных схем нагружения (растяжение/сжатие, кручение и комбинированное нагружение) на магнитные характеристики показали снижение чувствительности последних в условиях приложения касательных напряжений. При изменении уровня нормальных напряжений от -200 до 200 МПа, что более, чем в 10 раз превышает рабочее давление в трубе, коэрцитивная сила, остаточная индукция и максимальная магнитная проницаемость ведут себя однозначно.

4. Показана возможность использования магнитных характеристик, определяемых при помощи накладных преобразователей, в качестве параметров, чувствительных к структурным и деформационным изменениям, а также установлен минимальный относительный объем компонента макронеоднородного материала, участвующего в перемагничивании, необходимого для получения достоверной информации.

**Практическая значимость результатов исследований.**

В качестве параметров, чувствительных к образованию магнитно-упорядоченной фазы в метастабильных аустенитных коррозионностойких сталях, как отдельного материала, так и в составе многокомпонентной системы в процессе пластического и упругопластического деформирования, предложено использовать значения максимумов дифференциальной проницаемости, намагниченности в максимальном приложенном поле, среднеквадратичных напряжения МШБ.

На основании установленных отличий в структурном состоянии и физико-механических свойствах различных зон сварных соединений труб больших диаметров из сталей контролируемой прокатки предложено использование коэрцитиметрического метода, являющегося структурно-чувствительным, для контроля структурной однородности сварного соединения. Также коэрцитивная сила может быть использована для оценки качества термической обработки основного металла.

Результаты измерений магнитных характеристик с применением накладных магнитных устройств определенных геометрических размеров дают возможность получения информации о состоянии той компоненты слоистого материала, со стороны которой размещен преобразователь.

Коэрцитивная сила, максимальная магнитная проницаемость и остаточная индукция могут быть использованы при оценке величин приложенных нормальных напряжений как макронеоднородного материала в целом, так и его отдельных компонентов в диапазоне напряжений до 0,4 от предела текучести.

Результаты работы используются в курсе лекций по дисциплине «Физические методы структуроскопии и фазового анализа материалов», входящей в учебный план по направлению 150100 «Материаловедение и технология новых материалов» магистерской программы «Перспективные конструкционные материалы и высокоэффективные технологии» кафедры металловедения Института материаловедения и металлургии ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»; планируются к использованию в научно-исследовательской деятельности ОАО «РосНИТИ». Соответствующие документы приложены к диссертационной работе.

Диссертационная работа выполнялась в рамках работ по Программе Президиума РАН №25 «Разработка моделей и исследование сопротивления деформации, поврежденности и разрушения при интенсивной пластической деформации металлических сплавов и композиционных материалов с использованием экспериментальных методов механики, материаловедения и физических методов контроля», планам научно-исследовательских работ Института машиноведения УрО РАН, проектам молодых ученых и аспирантов УрО РАН в 2011 и 2013 годах, и грантам РФФИ 09-08-01091-а, 11-01-12126-офи-м-2011 и 13-01-00732.

#### **Методология и методы исследования.**

Научные исследования были проведены с привлечением современных методов материаловедения, механики прочности, физики магнитных явлений. Экспериментальные результаты были получены с использованием сертифицированных и поверенных приборов и средств измерений, входящих в состав материальной базы ЦКП «Пластометрия». Применялись стандартизованные методики для проведения механических испытаний, определения твердости.

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

1. Возможность использования параметров, определяемых из полевых зависимостей дифференциальной магнитной проницаемости для диагностики образования и последующей количественной оценки магнитно-упорядоченной фазы в коррозионностойких аустенитных сталях в процессе пластического и упругопластического деформирования.

2. Новый подход к контролю однородности структурного и напряженно-деформированного состояния сварного соединения: предложены магнитные параметры, отражающие различия в структуре и в уровне свойств между основным металлом и материалом шва и околошовной зоны и позволяющие использовать их в качестве основы для создания методик по контролю структуры и прочностных свойств сварных соединений с целью диагностики отклонения от требуемого состояния.

3. Совокупность экспериментальных данных о влиянии нагружения по различным схемам (растяжение/сжатие, кручение и комбинированное нагружение) на поведение магнитных характеристик отдельных зон сварных соединений.

4. Диапазоны применения коэрцитивной силы, остаточной индукции и максимальной магнитной проницаемости, однозначно изменяющихся с увеличением уровня действующих напряжений и деформаций, в качестве параметров для оценки напряженно-деформированного состояния макронеоднородных материалов и их отдельных компонентов в процессе изготовления и эксплуатации.

**Достоверность** основных научных положений и выводов, сформулированных в диссертации, обеспечена применением апробированных методик и современного оборудования, проверкой полученных результатов альтернативными методами исследования, а также их соответствием данным других исследователей.

**Апробация результатов.** Основные положения и результаты диссертационной работы были доложены и обсуждены на следующих российских и международных конференциях: VI и VII Российская научно-техническая конференция «Механика микронеоднородных материалов и разрушение» (Екатеринбург, 2010 и 2012); 10<sup>th</sup> European Conference on Non-Destructive Testing (Москва, 2010); V Российская конференция «Ресурс и диагностика материалов и конструкций» (Екатеринбург, 2011); II Всероссийская молодежная школа-конференция «Современные проблемы металловедения» (Пицунда, 2011); 9-я и 10-я Международные научно-технические конференции «Современные металлические материалы и технологии (СММТ'2011 и СММТ'13)» (Санкт-Петербург, 2011 и 2013); XIX Всероссийской научно-технической конференции по неразрушающему контролю и технической диагностике (Самара, 2011)); XIX и XX Международные научно-технические конференции «Трубы – 2011» и «Трубы-2012» (Челябинск, 2011; Сочи, 2012)); 18th World Conference of Non-Destructive Testing (ЮАР, 2012); XX Петербургские чтения по проблемам прочности (Санкт-Петербург, 2012); 5th International Conference on NDT of HSNT- IC MINDT (Греция, 2013); Международная научно-техническая конференция «Достижения физики неразрушающего контроля» (Минск, 2013); XXV, XXVI, XXVII, XXVIII Международные конференции неразрушающего контроля, «Дни Неразрушающего контроля» (Болгария, 2010, 2011, 2012, 2013 гг.).

**Публикации:** основное содержание работы отражено в 24 публикациях, в том числе в 4 статьях в рецензируемых журналах из перечня ВАК России и 5 статей в международных журналах.

**Объем и структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка цитируемой литературы, включающего 131 наименование. Содержание диссертации изложено на 143 страницах, включая 51 рисунок, 11 таблиц и 4 приложения.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность тематики исследований, сформулирована цель работы и задачи исследования, перечислены полученные автором результаты, раскрыта их научная и практическая ценность, представлены положения, выносимые на защиту, описана структура диссертации.

**Первая глава** посвящена обзору современного состояния исследуемой тематики. Представлен краткий анализ существующих методов магнитного контроля поверхностно-упрочненных материалов, как частного случая многокомпонентной системы. Рассмотрены также различные теории, касающиеся распределения магнитных свойств двухслойных материалов с компонентами различной степени жесткости, и расчеты коэрцитивной силы двухслойного образца. Подробно описано совершенствование технологий производства трубных марок сталей за последние шесть десятилетий; требования, предъявляемые к уровню прочностных, эксплуатационных и технологических свойств трубных сталей разных классов прочности. Анализ литературных источников по состоянию проблемы контроля сварных соединений показал, что работы в основном ведутся в направлении выявления различного рода дефектов, возникающих при изготовлении и эксплуатации. При работе с литературными источниками публикации, посвященные исследованию магнитных свойств отдельных зон сварных соединений, и влиянию различного вида нагружения на них, не встречались.

Показано, что в работах российских и зарубежных авторов описано решение проблемы, связанной с необходимостью контроля свойств отдельных слоев в многокомпонентных изделиях, которую можно решить путем использования особенностей перемагничивания двухслойного ферромагнетика. Проведен анализ работ, посвященных влиянию пластического и упругопластического деформирования на магнитные характеристики однородных материалов. Однако, результатов, представленных в опубликованных работах, оказывается недостаточно для обоснования применения и создания методик по оценке влияния упругопластических деформаций на структуру и физико-механические свойства многокомпонентных материалов, и тем более их отдельных слоев.

**Вторая глава** посвящена описанию исследуемых материалов, применяемого оборудования и использованных методик.

Круг исследованных материалов включает в себя: слоистые материалы - трехслойный модельный пакет «сталь 12Х18Н10Т – армко-железо – сталь 12Х18Н10Т» и изготовленный по технологии сварки взрывом двухслойный материал «сталь 08Х18Н10Т – сталь Ст3»; отдельные компоненты слоистых материалов - армко-железо, коррозионностойкие стали аустенитного класса 12Х18Н10Т и 08Х18Н10Т, конструкционная сталь Ст3; трубные стали 22ХГ2А, 30ХМА и 32Г2; трубные низкоуглеродистые стали контролируемой прокатки классов прочности Х70 и Х80.

Приведены технические характеристики приборов и установок, использованных в экспериментах.



В третьей главе рассматривали влияние пластического и упругопластического деформирования на структуру, фазовый состав и физико-механические свойства слоистых материалов.

Проведенные микроструктурные исследования отдельных компонентов и слоистых материалов, составленных из них, показали, что увеличение степени деформации прокаткой  $\epsilon_{пр}$  приводит к измельчению зерна всех исследуемых материалов и формированию кристаллографической текстуры деформации. В структуре метастабильной аустенитной стали под действием пластической деформации происходит протекание фазового  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращения с образованием в структуре коррозионностойких сталей типа 18-10 магнитно-упорядоченной фазы –  $\alpha'$ -мартенсита деформации. Экспериментально установлено, что более интенсивное протекание фазового превращения идет на поверхности прокатываемой пластины. Из рисунка 1 видно, что количество  $\alpha'$ -фазы для обеих сталей, определенное при помощи рентгенофазового анализа (берется в расчет только тонкий поверхностный слой) несколько больше, чем при определении магнитным методом (анализируется весь объем материала). Пластическая деформация прокаткой биметаллического соединения, полученного по технологии сварки взрывом, приводит к выравниванию волнообразной границы раздела двух компонентов и к увеличению прочностных свойств материала (Рисунок 2).

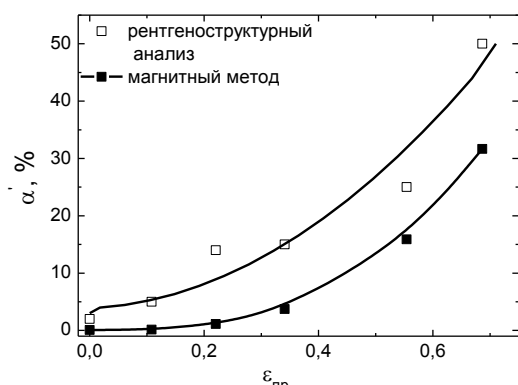


Рисунок 1 – Количество мартенсита деформации  $\alpha'$  в стали 12X18H10T в зависимости от степени деформации прокаткой  $\epsilon_{пр}$

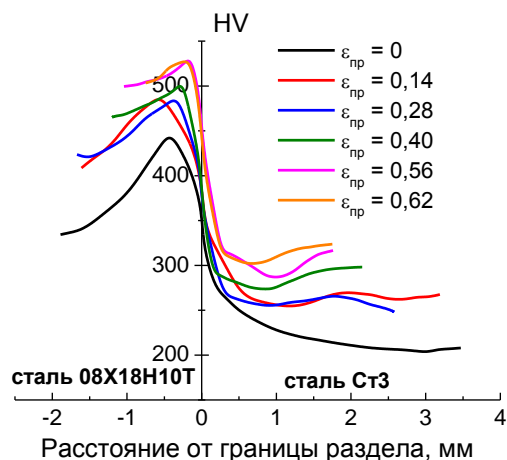


Рисунок 2 – Распределение твердости HV по сечению двухслойного материала при различных степенях деформации прокаткой  $\epsilon_{пр}$

Установлен однозначный характер изменения коэрцитивной силы  $H_c$  армко-железа и углеродистой стали на основе железа, а также слоистых материалов «сталь 12X18H10T – армко-железо – сталь 12X18H10T» и «сталь 08X18H10T – сталь Ст3», компонентами которых они являются, с увеличением степени деформации прокаткой (Рисунок 3).

Величины коэрцитивной силы с увеличением степени обжатия возрастают. Очевидно, подобное поведение обусловлено увеличением плотности дислокаций ( $H_c \sim N^{1/2}$ , где  $N$  – плотность дислокаций) и

измельчением зерна в обоих материалах при пластической деформации прокаткой ( $H_c \sim d^{-1}$ , где  $d$  – размер зерна). Можно предположить, что для углеродистых сталей подобного класса будут наблюдаться качественно похожие однозначные зависимости  $H_c$  от уровня пластической деформации прокаткой. Количественный уровень магнитных характеристик углеродистых сталей в основном будет определяться химическим составом сталей. Схожий характер поведения  $H_c$  отдельного компонента и слоистого материала в целом позволяет говорить о том, что основной вклад в формирование магнитных свойств многокомпонентных материалов вносит составляющая с более высоким уровнем магнитных свойств.

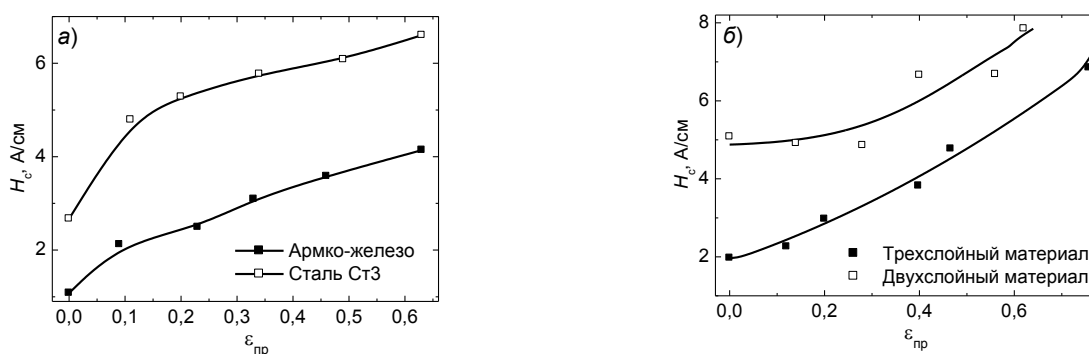


Рисунок 3 – Изменение коэрцитивной силы  $H_c$  армко-железа, Ст3 (а) и трех- и двухслойных материалов (б) в зависимости от степени деформации прокаткой  $\epsilon_{пр}$

Как видно из рисунка 4 такие магнитные характеристики как намагниченность в максимальном приложенном поле  $\mu_0 M_{\max}$ , среднеквадратичные значения напряжений магнитных шумов Баркгаузена (МШБ)  $U$ , значение максимума дифференциальной проницаемости  $\mu_{\text{дифМакс}}$ , определяемое из полевых зависимостей дифференциальной магнитной проницаемости, с увеличением степени деформации прокаткой монотонно возрастают. Это позволяет использовать установленные параметры для диагностики образования и количественной оценки магнитно-упорядоченной фазы -  $\alpha'$ -мартенсита деформации, образующейся в коррозионностойких аустенитных сталях типа 18-10 под действием приложенных напряжений и деформаций.

Использование накладных преобразователей для определения магнитных свойств макронеоднородных материалов и их отдельных компонентов позволяет решать широкий круг задач, как в лабораторных условиях, так и на производстве. Кроме того, в случае двухслойных материалов применение накладных датчиков дает возможность проводить измерения магнитных характеристик на каждой из их сторон, в отличие от использования проходных преобразователей, позволяющих получать только интегральные магнитные характеристики слоистых материалов. Результаты измерений магнитных характеристик с применением накладных магнитных устройств определенных геометрических размеров дают возможность получения информации о

состоянии той компоненты слоистого материала, со стороны которой размещен преобразователь. Значения тока размагничивания  $I_{рс}$ , пропорциональные коэрцитивной силе, и величина  $\varepsilon_{д.с.макс}$ , пропорциональная магнитному потоку при максимальном намагничивающем токе, измеренные при помощи приставных преобразователей на компонентах двухслойного материала «сталь Ст3 – сталь 08Х18Н10Т» демонстрируют качественно похожие зависимости кривым, полученные при измерении в замкнутой магнитной цепи на отдельных компонентах этого материала.

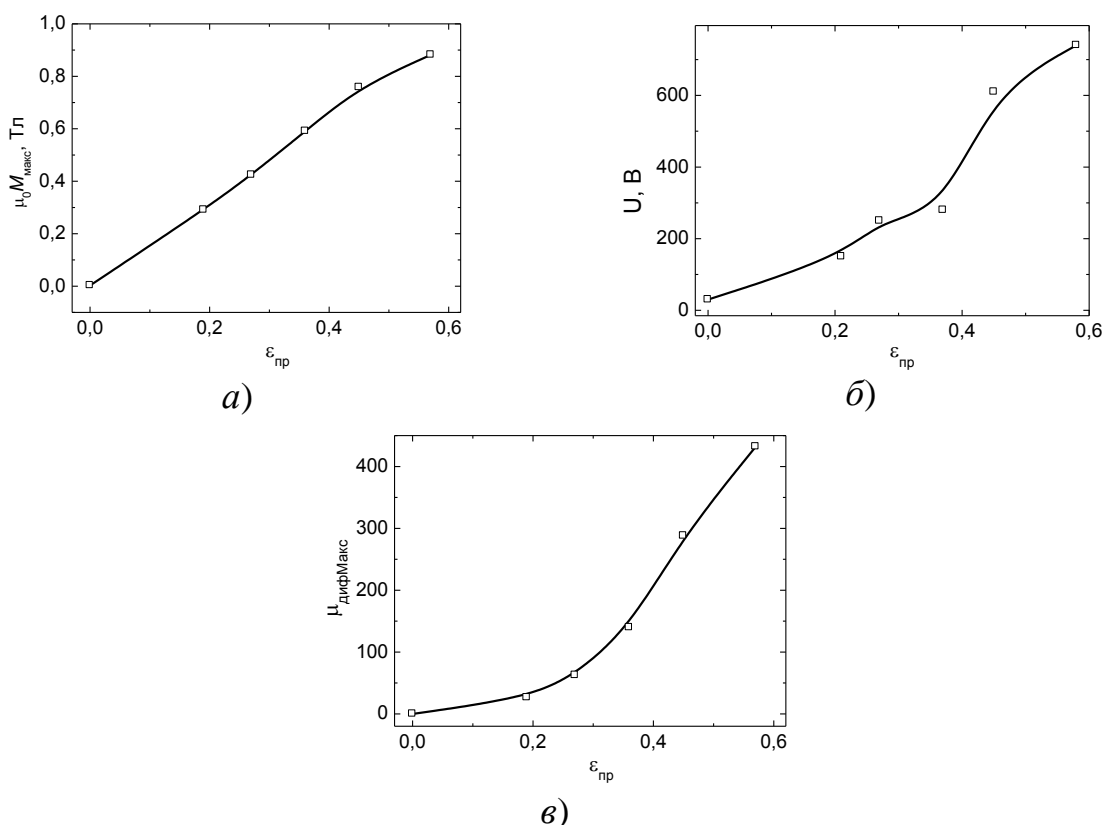


Рисунок 4 – Зависимости намагниченности в максимальном приложенном поле  $\mu_0 M_{макс}$  (а), среднеквадратичные значения напряжений МШБ  $U$  (б) и максимальной дифференциальной проницаемости  $\mu_{дифМакс}$  (в) стали 08Х18Н10Т от степени деформации прокаткой  $\varepsilon_{пр}$

Величина магнитного поля, соответствующего значению максимума дифференциальной проницаемости на полевых зависимостях слоистых материалов, приблизительно соответствует коэрцитивным силам компонентов их образующих. Максимум, соответствующий стали Ст3, как отдельному компоненту, так и в составе биметалла, с увеличением степени деформации прокаткой сдвигается в сторону более сильных полей.

На рисунке 5 представлены кривые  $\mu_{диф}(H)$  для сталей Ст3, 08Х18Н10Т и двухслойного материала «сталь Ст3 – сталь 08Х18Н10Т», прокатанных на различные степени деформации. В исходном состоянии (см. Рисунок 5а) на полевой зависимости биметалла мы видим только один пик, соответствующий компоненту из стали Ст3 (поля, в которых локализуются максимумы биметалла

и стали Ст3 практически совпадают), поскольку коррозионностойкая сталь при  $\varepsilon_{пр} = 0$  парамагнитна и пик не образуется. Как видно из рисунка 5б на кривой  $\mu_{диф}(H)$  для двухслойного материала, прокатанного с  $\varepsilon_{пр} = 0,62$ , наблюдается уже два пика, соответствующие двум ферромагнитным фазам – ферриту в стали Ст3 и мартенситу в стали 08X18H10T.

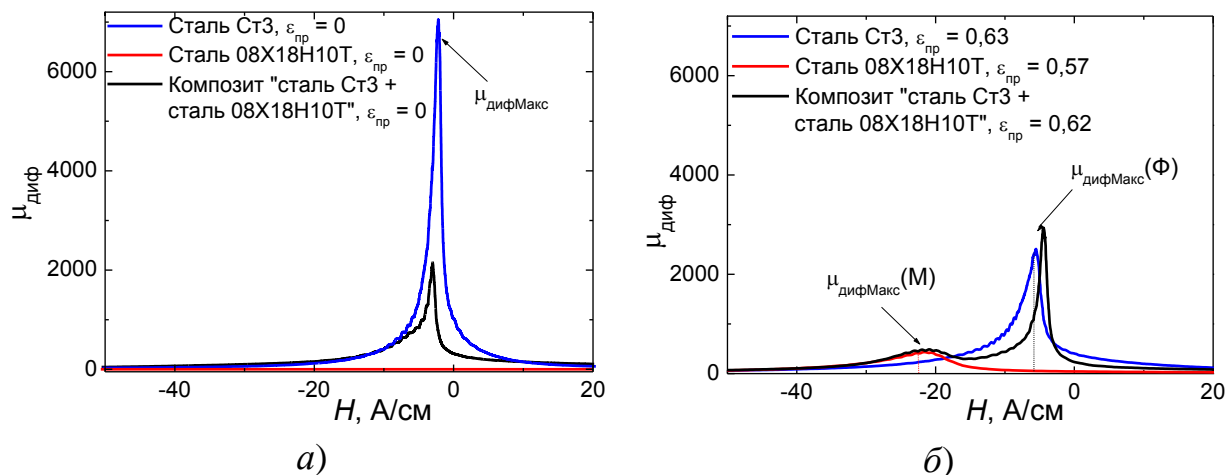


Рисунок 5 – Полевые зависимости дифференциальной магнитной проницаемости двухслойного материала «сталь 08X18H10T – сталь Ст3» и его отдельных компонентов, построенные для различных степеней деформации прокаткой  $\varepsilon_{пр}$  (Пунктирной линией обозначены значения  $H_c$ , соответствующие двум ферромагнитным фазам – ферриту и мартенситу)

Таким образом, по значению поля соответствующего максимуму дифференциальной проницаемости на полевых зависимостях дифференциальной магнитной проницаемости углеродистых сталей и слоистых материалов на их основе можно оценивать степень пластической деформации прокаткой в материале. Максимум дифференциальной проницаемости, определяемый из полевых зависимостей слоистых материалов, может служить параметром для диагностики количества, образовавшейся в процессе пластической и упругопластической деформации новой магнитно-упорядоченной фазы –  $\alpha'$ -мартенсита деформации.

Экстремумы, наблюдаемые на зависимостях коэрцитивной силы от уровня приложенных растягивающих напряжений  $H_c(\sigma/\sigma_{0,2})$  стали Ст3 и биметалла (Рисунок 6а и 6в) в упругой области растяжения, можно объяснить формированием магнитной текстуры напряжений, получившей также название наведенной магнитной анизотропии. Действие напряжений, достигающих и превышающих предел текучести, приводит к разрушению магнитной текстуры напряжений, и основным фактором, влияющим на коэрцитивную силу в области пластической деформации, является увеличение плотности дислокаций и дислокационных скоплений. Для стали 08X18H10T (см. Рисунок 6б) образование максимума при напряжениях, превышающих предел текучести (для  $\varepsilon_{пр} = 0$ ) и в районе  $\sigma_{0,2}$  (для  $\varepsilon_{пр} = 0,19$  и  $\varepsilon_{пр} = 0,27$ ) может быть обусловлено переходом магнитоупорядоченной фазы из однодоменного в многодоменное состояние и последующим ростом этой фазы.

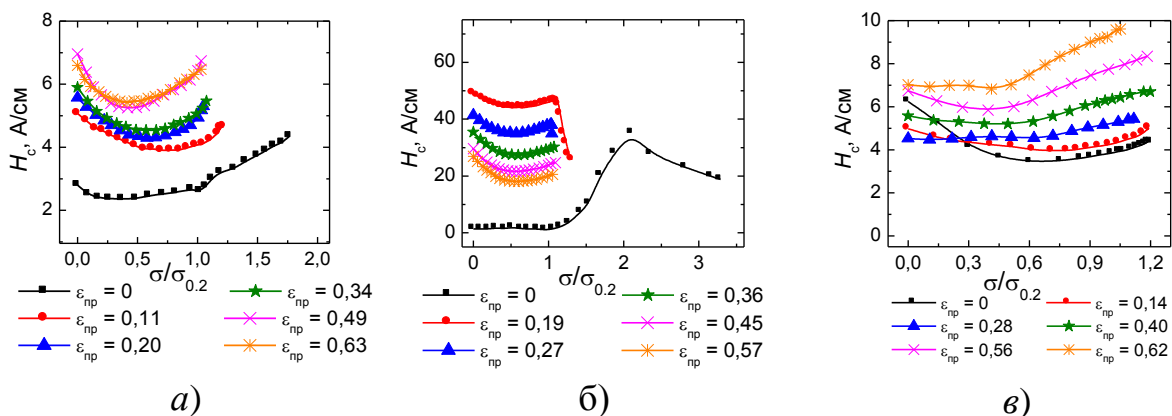


Рисунок 6 – Зависимость коэрцитивной силы  $H_c$  сталей Ст3 (а), 08X18H10Т (б) и двухслойного материала «сталь 08X18H10Т – сталь Ст3» (в) от приложенных растягивающих напряжений  $\sigma/\sigma_{0,2}$

Однако в упругой области растяжения при напряжениях меньше, чем 0,4 от предела текучести, как для отдельных компонентов, так и для слоистых материалов коэрцитивная сила, остаточная индукция и максимальная магнитная проницаемость изменяются монотонно. Это позволяет использовать эти характеристики для оценки степени деформации одноосным растяжением на стадии упругих напряжений в изделиях из исследованных материалов в процессе эксплуатации.

**В четвертой главе** приводятся результаты, отражающие возможность применения магнитных характеристик для оценки текущего состояния отдельных зон сварных соединений.

Проведено исследование структуры, механических и магнитных свойств материала тела труб, изготовленных из сталей марок 22ХГ2А, 30ХМА и 32Г2, после различных операций термической обработки. Из рисунка 7а видно, что недогрев под закалку приводит к снижению твердости и коэрцитивной силы, ввиду образования в структуре мягкой структурной составляющей – феррита. При дальнейшем увеличении температуры закалки до оптимальных температур аустенитизации и выше HRC и  $H_c$  в пределах погрешности не изменяются. С увеличением температуры отпуска твердость и коэрцитивная сила изменяются однозначно (Рисунок 7б). Установлено, что коэрцитиметрический метод может быть использован для контроля качества таких операций термической обработки как недогрев под закалку и отпуск сталей 22ХГ2А, 30ХМА и 32Г2. Установлено качественное подобие зависимостей коэрцитивной силы, определенной в замкнутой магнитной цепи и с применением приставного электромагнита. Небольшие количественные отклонения возникают ввиду того, что при намагничивании приставным электромагнитом состояние технического насыщения не достигается, поэтому значения  $H_c$  ниже, чем при измерениях в замкнутой магнитной цепи.

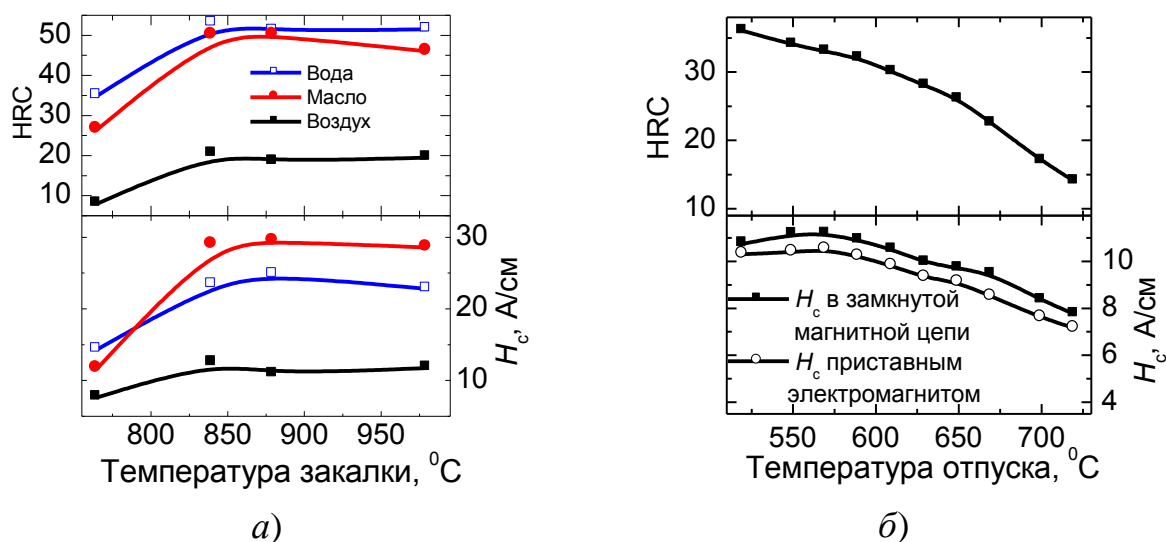


Рисунок 7 – Зависимости твердости HRC и коэрцитивной силы  $H_c$  от температуры закалки (а) и отпуска (б) для трубной стали 30XMA

Показано, что материал шва обеих исследованных сталей обладает большей дисперсностью по отношению к основному металлу и тем более к материалу ОШЗ, где происходит формирование крупнозернистой структуры. По уровню прочностных свойств сварное соединение стали класса прочности X80 является более равнопрочным, чем у стали класса прочности X70, о чем свидетельствует показатель  $\sigma_{0,2}/\sigma_B$  (Таблица 1). Большее значение  $\sigma_{0,2}/\sigma_B$  для материала ОШЗ стали X70 по сравнению с основным металлом и материалом шва свидетельствует о меньшей способности к деформационному упрочнению, этого материала.

Таблица 1 – Механические и магнитные свойства металла из различных зон сварных труб большого диаметра классов прочности X70 и X80

Класс прочности	Зона сварного соединения	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	$\sigma_{0,2}/\sigma_B$	$H_c$ , А/см	$B_r$ , Тл	$\mu_{\max}$	$\mu_0 M_{\max}$ , Тл
X70	Основной металл	505	635	17,2	0,79	5,3	0,922	788	2,0
X80		595	650	14,7	0,91	7,1	1,125	744	2,03
X70	Металл шва	490	640	17,5	0,77	8,9	0,58	342	1,95
X80		640	710	14,8	0,90	10,6	1,063	544	1,97
X70	Металл ОШЗ	525	615	19,5	0,85	6,2	0,86	670	2,05
X80		600	680	14,2	0,88	7,1	1,127	760	2,04

Установлено, что значения поля максимума дифференциальной проницаемости на полевых зависимостях, коррелируют с различным структурным состоянием и уровнем физико-механических свойств отдельных зон сварных соединений (Рисунок 8). Показано также, что по величине максимума дифференциальной проницаемости можно судить о вкладе каждой из зон в сигнал первичного преобразователя измерительного прибора.

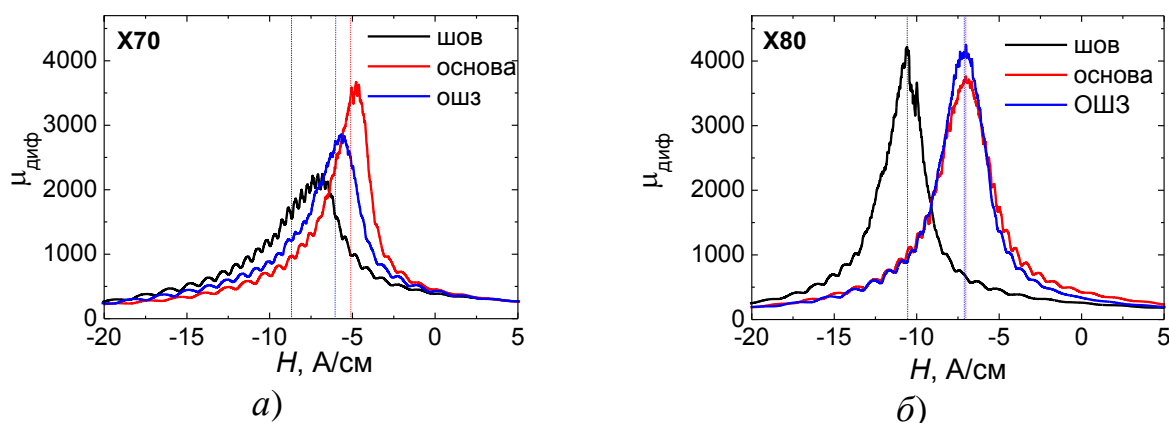


Рисунок 8 – Зависимости дифференциальной магнитной проницаемости  $\mu_{\text{диф}}$  от напряженности магнитного поля  $H$  материала из различных зон сварных соединений сталей классов прочности X70 (а) и X80 (б)

Полученные новые экспериментальные результаты по влиянию различных схем нагружения (растяжение/сжатие, кручение и комбинированное нагружение) на магнитные характеристики, показали, снижение чувствительности последних в условиях приложения касательных напряжений (Рисунки 9 и 10). Из рисунка 9 видно, что при уровне нормальных напряжений от -200 до 200 МПа, не превышающих 0,4 от предела текучести и в несколько раз превышающих рабочее давление в трубе (порядка 10-15 МПа), коэрцитивная сила, остаточная индукция и максимальная магнитная проницаемость ведут себя однозначно, что позволяет использовать их в качестве параметров для оценки текущего состояния отдельных зон сварных соединений труб большого диаметра.

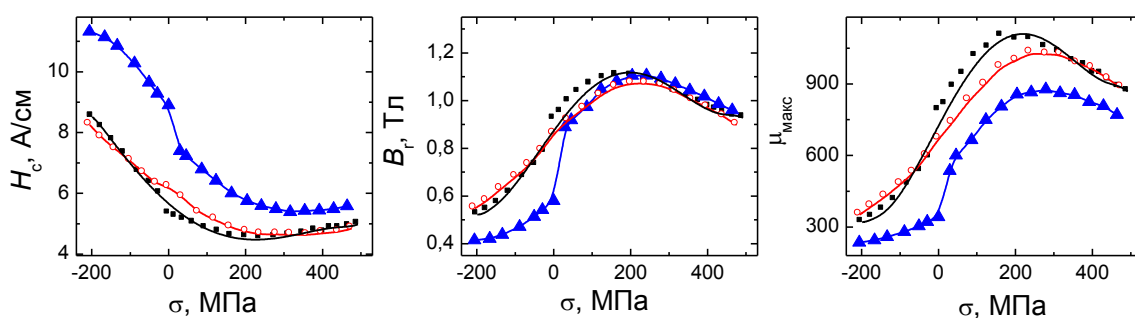


Рисунок 9 – Зависимости коэрцитивной силы  $H_c$ , остаточной индукции  $B_r$  и максимальной магнитной проницаемости  $\mu_{\text{макс}}$  основного металла (■), материала шва (▲) и ОШЗ (○) стали класса прочности X70 от нормальных напряжений  $\sigma$

Из рисунков 10 и 11 видно, касательные напряжения оказывают слабое влияние на магнитные характеристики.

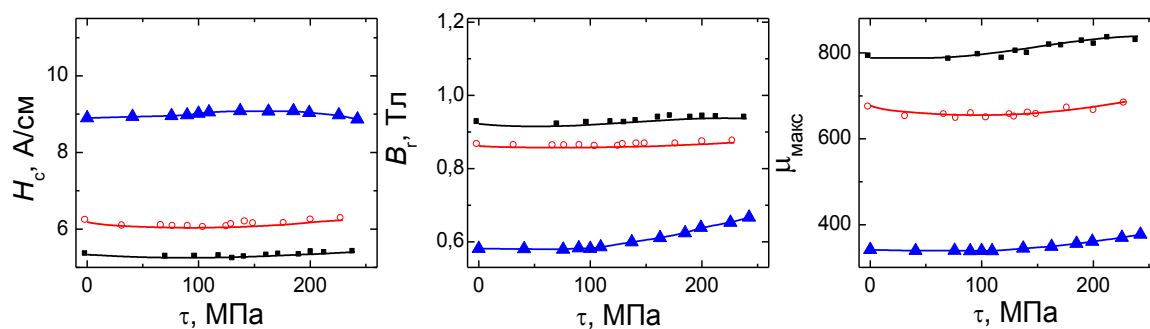


Рисунок 10 – Зависимости коэрцитивной силы  $H_c$ , остаточной индукции  $B_r$  и максимальной магнитной проницаемости  $\mu_{\max}$  основного металла (■), материала шва (▲) и ОШЗ (○) стали класса прочности X70 от касательных напряжений  $\tau$

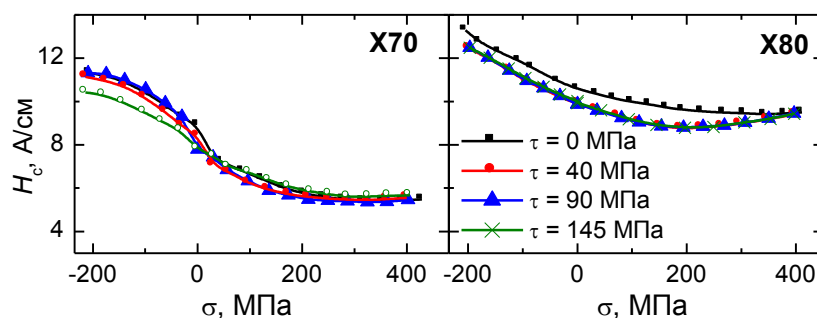


Рисунок 11 – Зависимости коэрцитивной силы  $H_c$  материала шва сталей классов прочности X70 (а) и X80 (б) от нормальных напряжений  $\sigma$  при различном уровне касательных напряжений  $\tau$

При комбинированном нагружении (см. Рисунок 11) наложение касательных напряжений лишь приводит к небольшому изменению наклона зависимостей коэрцитивной силы от уровня нормальных напряжений.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложено использовать значение максимума дифференциальной проницаемости, определяемого из зависимости дифференциальной магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля, в качестве параметра при диагностике образования магнитно-упорядоченной фазы в коррозионноустойчивых аустенитных сталях, как компоненте макронеоднородной системы, в процессе пластического и упругопластического деформирования.

2. Экспериментально установлено, что основной металл и материал шва и околошовной зоны сварных соединений трубных сталей обладают различной структурой и уровнем механических и магнитных свойств, что позволяет рассматривать сварное соединение в магнитном отношении как многослойный материал. Установленные различия могут быть использованы в качестве основы для создания методик по контролю однородности структурного состояния и физико-механических свойств сварных соединений с



целью диагностики отклонения от требуемого состояния. Показано, что коэрцитиметрический метод может быть использован для контроля прочностных свойств термически упрочненных трубных сталей, причем измерения, возможно, проводить как в замкнутой магнитной цепи, так и с использованием накладных преобразователей.

3. Установлено снижение чувствительности магнитных характеристик к приложенным касательным напряжениям по сравнению с нормальными напряжениями. При уровне нормальных напряжений от -200 до 200 МПа, более чем в десять раз превышающих рабочее давление в трубопроводе, коэрцитивная сила, остаточная индукция и максимальная магнитная проницаемость ведут себя однозначно, что позволяет использовать их в качестве параметров для оценки текущего состояния отдельных зон сварных соединений труб большого диаметра.

4. В качестве параметров для оценки величин приложенных нормальных напряжений в диапазоне напряжений до 0,4 от предела текучести для макронеоднородных материалов и их отдельных компонентов могут быть использованы коэрцитивная сила, максимальная магнитная проницаемость и остаточная индукция.

5. Показана возможность использования магнитных характеристик, определяемых при помощи накладных преобразователей, в качестве параметров, чувствительных к структурным и деформационным изменениям, а также установлен минимальный относительный объем компонента макронеоднородного материала, участвующего в перемагничивании, необходимого для получения достоверной информации.

Предложенные магнитные параметры могут быть использованы при создании методик:

- диагностики образования и количественной оценки мартенсита деформации, образующегося в коррозионностойких аустенитных сталях в результате пластического деформирования в процессе изготовления и эксплуатации, и приводящего к снижению коррозионной стойкости конструкций, используемых в химическом машиностроении;
- контроля структуры, ее однородности и уровня физико-механических свойств сварных соединений труб большого диаметра, эксплуатируемых в тяжелых климатических условиях, а также для оценки уровня действующих напряжений в различных зонах сварных труб с целью прогнозирования превышения допустимого уровня приложенных нагрузок.

## **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Публикации в научных изданиях, входящих в список ВАК РФ:**

1. Горкунов Э.С. Влияние деформации прокаткой и одноосным растяжением на структуру, магнитные и механические свойства армко-железа, стали 12X18H10T и составного материала «сталь 12X18H10T – армко-железо –

сталь 12X18H10T» [Текст] / Горкунов Э.С., Задворкин С.М., Коковихин Е.А., Туева Е.А. (Путилова), Субачев Ю.В., Горулева Л.С., Подкорытова А.В. // Дефектоскопия. – 2011. - №6. – С. 16-30.

2. Горкунов Э.С. Определение магнитных свойств отдельных зон сварного соединения и ширины сварного шва по магнитным измерениям [Текст] / Горкунов Э.С., Поволоцкая А.М., Туева Е.А. (Путилова), Горулева Л.С., Задворкин С.М. // Дефектоскопия. – 2011. - №9. – С. 3-16.

3. Горкунов Э.С. Использование магнитного структурно-фазового анализа для диагностики состояния композиционного материала «сталь 08X18H10T – сталь Ст3» и составляющих его компонент, подвергнутых пластической деформации [Текст] / Горкунов Э.С., Задворкин С.М., Путилова Е.А., Поволоцкая А.М., Горулева Л.С., Веретенникова И.А., Каманцев И.С. // Дефектоскопия. – 2012. - №6. – С. 30-43.

4. Горкунов Э.С. Оценка приложенных напряжений при упругопластической деформации одноосным растяжением двухслойного композиционного материала «сталь Ст3 – сталь 08X18H10T» магнитными методами [Текст] / Горкунов Э.С., Задворкин С.М., Путилова Е.А. // Дефектоскопия. – 2012. - №8. – С. 64-76.

#### **Основные публикации в научных изданиях, не входящих в список ВАК РФ:**

1. Горкунов Э.С. Оценка напряжений в высокопрочных трубных сталях по магнитным измерениям [Текст] / Горкунов Э.С., Задворкин С.М., Митропольская С.Ю., Туева Е.А. (Путилова), Шершнева Л.С. // Научни известия на НТСМ. – 2010. – Година XVII. – Брой 5(115). – С. 18-23.

2. Горкунов Э.С. Диагностика состояния отдельных зон сварного соединения и геометрии сварного шва по магнитным измерениям [Текст] / Горкунов Э.С., Поволоцкая А.М., Туева Е.А. (Путилова), Горулева Л.С., Задворкин С.М. // Научни известия на НТСМ. – 2011. – Година XIX. – Брой 1(121). – С. 29-35.

3. Горкунов Э.С. Влияние пластической деформации прокаткой на фазовый состав, механические и магнитные свойства композиционного материала «сталь Ст3-сталь 08X18H10T» [Текст] / Горкунов Э.С., Поволоцкая А.М., Путилова Е.А., Задворкин С.М., Миховски М. // Научни известия на НТСМ. – 2012. – Година XX. – Брой 1(133). – С. 7-11.

4. Горкунов Э.С. Диагностика состояния композиционного материала «сталь Ст3-сталь 12X18H10T» и его компонентов при упругопластическом одноосном растяжении по магнитным измерениям [Текст] / Горкунов Э.С., Задворкин С.М., Путилова Е.А., Горулева Л.С., Иванова Й. // Научни известия на НТСМ. – 2012. – Година XX. – Брой 1(133). – С. 3-6.

5. Горкунов Э.С. Влияние упругих деформаций растяжением и кручением на магнитные свойства металла в различных зонах труб большого

диаметра [Текст] / Горкунов Э.С., Задворкин С.М., Путилова Е.А. // Научни известия на НТСМ. – 2013. – Година XXI. – Брой 2(139). – С. 22-25.

6. Путилова Е.А. Исследование влияния упругих деформаций растяжением и кручением на магнитные свойства металла в различных зонах труб большого диаметра [Электронный ресурс] / Путилова Е.А., Э.С. Горкунов, С.М. Задворкин, Р.А. Саврай, Л.С. Горулева. // "Трубы-2012": материалы XX научно-технической конф. – Сочи, 2012. – Электронно-оптический диск.

7. Evgeniia A. Putilova State Diagnostic of the metal in the different zones of welded large diameter pipes under elastic deformation by tension (compression) and torsion by means of magnetic measurements [Электронный ресурс] / Evgeniia A. Putilova, Edward S. Gorkunov, Sergey M. Zadvorkin // 5th International Conference on NDT of HSNT- IC MINDT: материалы конф. – Греция, Афины, 2013. - Электронно-оптический диск.

8. Путилова Е.А. Структура и физико-механические свойства металла в различных зонах сварных труб большого диаметра [Текст] / Путилова Е.А., Горкунов Э.С., Задворкин С.М. // «Современные металлические материалы и технологии (СММТ'2013)»: труды международной научно-технической конф. – Санкт-Петербург, 2013. – С. 308-309.