

На правах рукописи

Чурилова Татьяна Валерьевна

ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ИЗДЕЛИЙ С ГИБКИМИ
МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ОБОЛОЧКАМИ ИЗ ХРОМОНИКЕЛЕВЫХ
СТАЛЕЙ ТИПА 18-10

Специальность 05.02.01 – «Материаловедение»
(Машиностроение в нефтегазовой отрасли)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Уфа – 2004

Работа выполнена в Уфимском государственном нефтяном техническом университете.

Научный руководитель доктор технических наук, профессор,
Абдуллин Ильгиз Галеевич.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Бакиев Ахмет Вахитович;

кандидат физико-математических наук
Сергеев Владимир Ильич.

Ведущая организация ОАО «Уфаоргсинтез».

Защита состоится 26 мая 2004 года в 10-00 на заседании диссертационного совета Д.212.289.05 при Уфимском государственном нефтяном техническом университете по адресу: 450062, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Уфимского государственного нефтяного технического университета.

Автореферат разослан «_23_» апреля 2004 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Ибрагимов И.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В последние годы в связи с конверсией оборонной промышленности существенно возросло использование ее изделий в народном хозяйстве России. Одним из основных конструкционных материалов для их изготовления являются хромоникелевые нержавеющие стали. Высвобождение этого вида конструкционных материалов позволило разработать и наладить выпуск новых изделий для различных отраслей промышленности. Типичным примером может служить использование конструкций с гибкими металлическими оболочками (ГМО) в нефтегазовой отрасли в качестве: сильфонов; шлангов для разлива и транспортировки нефти, нефтепродуктов и агрессивных сред; гибких трубопроводов при шельфовой добыче для подачи нефти или газа на грузочные терминалы и для соединения подводного устьевого оборудования с контрольными линиями; гибких узлов в системах водоспуска плавающих крыш резервуаров, а также в виде гибких напорных нефтегазовых трубопроводных систем. Изделия с ГМО применяют также в схожих условиях эксплуатации и в других отраслях промышленности, например в теплоэнергетике, в качестве компенсаторов тепловых и монтажных перемещений трубопроводов.

В ходе эксплуатации в металле наиболее нагруженных участков гофрированных оболочек изделий с ГМО (выступы и впадины гофра) возникают упругопластические деформации, которые, вследствие изменения внешних и внутренних факторов, носят переменный характер. Анализ отказов этих изделий свидетельствует о коррозионно-механической природе разрушения, механизм которого включает зарождение и развитие усталостной трещины по периметру гофра и дальнейшую потерю герметичности.

Таким образом, долговечность и надежность нефтегазовых систем во многом определяются коррозионными, коррозионно-механическими и коррозионно-усталостными свойствами сталей типа 18-10.

Несмотря на то, что исследованию данной группы сталей посвящено большое количество работ, некоторые вопросы до сих пор остаются открытыми. В частности, недостаточно изучены электрохимическое поведение стали при затруднении доступа к ее поверхности пассивирующих агентов (в основном кислорода воздуха) в условиях щелевой коррозии; влияние питтингообразующих хлорид-ионов, анодной поляризации блуждающими токами и нестационарных режимов нагружения на коррозионно-усталостную долговечность сталей типа 18-10 и их сварных соединений.

Работа выполнялась в рамках Государственных научно-технических программ АН РБ «Научоемкая техника и технологии для машиностроения Республики Башкортостан» и «Машиноведение, конструкционные материалы и технологии».

Целью диссертационной работы является разработка и усовершенствование методов и средств повышения долговечности изделий с ГМО на основе исследования коррозионного и коррозионно-механического поведения сталей типа 18-10 и их сварных соединений.

Основные задачи исследования

1. Исследование коррозионно-усталостного поведения сталей типа 18-10 в условиях их анодной поляризации полями блуждающих токов при эксплуатации изделий с ГМО и совершенствование на этой основе методов расчета их долговечности.

2. Исследование влияния режимов микроплазменной и контактно-роликовой сварки гибкой части изделий с ГМО на коррозионную стойкость и коррозионно-усталостную долговечность сварных соединений сталей типа 18-10.

3. Исследование возможности повышения ресурса изделий с ГМО из сталей типа 18-10 путем ингибирования общей и питтинговой коррозии, а также их коррозионно-усталостного разрушения в условиях анодной поляризации блуждающими токами.

Научная новизна

1. Впервые установлено существенное, в 2-4 раза, снижение коррозионной стойкости и коррозионно-усталостной долговечности стали 12Х18Н10Т и ее сварных соединений, полученных микроплазменной и контактно-роликовой сваркой, в условиях воздействия блуждающих токов различной амплитуды.

2. Обосновано использование связующего литейного марки КО по ТУ 38.1071277-90 в качестве ингибитора общей и питтинговой коррозии, а также коррозионно-усталостного разрушения стали 12Х18Н10 со степенью защиты не менее 98 % и 1,5-2,0 соответственно, в условиях анодной поляризации.

На защиту выносятся результаты исследования коррозионного и коррозионно-усталостного поведения сталей типа 18-10 и их сварных соединений, совершенствование на этой основе методов расчета долговечности изделий с ГМО и повышение их ресурса путем рационального выбора режимов сварки и методов ингибиторной защиты от питтинговой коррозии и коррозионно-усталостного разрушения при действии блуждающих токов.

Практическая значимость и реализация работы

Определенные коэффициенты влияния коррозионно-активной среды и анодной поляризации на коррозионно-усталостную долговечность гибких металлических оболочек из сталей типа 18-10 используются в ЛПДС Нурлино Черкасского НУ ОАО «Уралсибнефтепровод» при расчете действительного срока эксплуатации гибкой части компенсирующих систем приемораздаточных трубопроводов на резервуарах в зависимости от условий их эксплуатации.

Разработанный расчетно-графический метод определения ресурса сильфонных компенсаторов тепловых перемещений теплопроводов (узлов компенсационных металлорукавных) для различных условий эксплуатации используются в «Тепловых сетях» ОАО «Башкирэнерго» для определения срока службы сильфонных компенсаторов в зависимости от места их располо-

жения и амплитуды блуждающих токов.

Апробация работы

Основные положения и результаты работы докладывались на научно-технических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ (Уфа, 2000-2003 гг.); Межрегиональной научно-методической конференции «Проблемы нефтегазовой отрасли» (Уфа, декабрь 2000 г.); III и IV Конгрессах нефтегазопромышленников России (Уфа, май 2001 г. и май 2003 г.); конференциях отделения технических наук АН РБ «Технические проблемы развития машиностроения в Башкортостане» (Уфа, декабрь 2001 г.) и «Инновационные проблемы развития машиностроения в Башкортостане» (Уфа, декабрь 2003 г.); учебно-научно-технической межотраслевой конференции «Коррозия металлов: диагностика, предупреждение, защита и ресурс» (Уфа, январь 2002 г.); Международной научно-технической конференции «Трубопроводный транспорт – сегодня и завтра» (Уфа, ноябрь 2002 г.); II Всероссийской научно-практической конференции «Инновации в машиностроении» (Пенза, октябрь 2002 г.); IV Межрегиональной молодежной конференции «Севергеоэкотех-2003» (Ухта, март 2003 г.); Научно-практической конференции «Нефтепереработка и нефтехимия-2003» (Уфа, май 2003 г.); II Всероссийской учебно-научно-методической конференции «Реализации государственных образовательных стандартов при подготовке инженеров-механиков: проблемы и перспективы» (Уфа, декабрь 2003 г.); II Международной научно-практической конференции «Новоселовские чтения» (Уфа, март 2004 г.).

Публикации

По теме диссертационной работы опубликовано 16 печатных работ, из них 11 статей и 5 тезисов докладов.

Объем и структура работы

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, основных выводов; содержит 135 страницы машинописного текста, 8 таблиц, 34 рисунка,

библиографический список использованной литературы из 151 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ*

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель и основные задачи, научная новизна и практическая ценность результатов проведенных исследований.

Первая глава посвящена аналитическому обзору коррозионно-механического поведения и коррозионной стойкости аустенитных хромоникелевых сталей типа 18-10 и их сварных соединений в агрессивных средах нефтегазовой, нефтеперерабатывающей промышленности, отраслях топливно-энергетического комплекса. Рассмотрены взаимосвязь долговечности изделий из таких сталей в различных средах и условиях эксплуатации с их физико-механическими свойствами и структурным состоянием; особенности эксплуатации изделий с ГМО из этих сталей и характер их разрушения, связанного в основном с потерей пассивности и коррозионно-усталостным нагружением в условиях эксплуатации. Разрушение ГМО, как правило, происходит по вершине гофра в околошовной зоне сварного соединения в местах питтинговой коррозии, обусловленной наличием активирующих хлорид-ионов в рабочих средах, а также частичной потерей пассивности, многократно усиленной анодной поляризацией блуждающими токами.

Приведен аналитический обзор применения ингибиторов для борьбы с общей, локальной, межкристаллитной коррозией, коррозионным растрескиванием сталей типа 18-10 в различных средах.

Во второй главе приведено описание использованных в диссертации известных и разработанных с участием соискателя методов исследований.

Наличие щелей и зазоров в конструкциях с ГМО из сталей типа 18-10, а также паровоздушная окружающая среда с температурой до 60...80 °С, при которой растворимость кислорода в воздухе резко снижается, требуют про-

* Исследовательская часть выполнена при консультировании кандидата технических наук, доцента Давыдова Сергея Николаевича.

ведения электрохимических исследований с имитацией этих условий эксплуатации. Электрохимические исследования коррозионного поведения стали проводили путем снятия анодных и катодных поляризационных кривых в специально разработанной электрохимической прижимной трехэлектродной ячейке, снабженной дополнительно штуцером для продувки инертным газом (гелием) и гидрозатвором. Потенциал регистрировали относительно хлорсеребряного электрода сравнения (ХСЭ). Аналогичные исследования проводили на сварных швах из этой стали. Содержание кислорода определяли методом сравнения при помощи компараторов «Dissolved oxygen».

Коррозионно-усталостные испытания тонколистовых материалов гибкой части металлорукавов и компенсаторов из нержавеющей стали типа 18-10 проводили на усталостной машине, дополненной специально разработанным устройством, позволяющим в условиях жесткого усталостного нагружения проводить одновременную внешнюю анодную поляризацию. Проводили шесть параллельных опытов с использованием статической обработки опытных данных и нахождением доверительного интервала результатов.

Наличие мартенсита деформации, который может образовываться в нержавеющей стали 12Х18Н10Т в условиях формования гибкой части изделий с ГМО, оценивали по величине остаточной индукции сталей при помощи ферротестера TR-980I/A.

Испытания на микротвердость стали 12Х18Н10Т и ее сварных соединений проводили по стандартной методике в соответствии с ГОСТ 9450-76 на микротвердомере ПМТ-3. Микро- и макроструктурные исследования проводили на сварных соединениях стали типа 18-10 общепринятыми методами с использованием электрохимического травления.

Склонность сталей 12Х18Н10 и 12Х18Н10Т и их сварных швов к межкристаллитной коррозии определяли по методу АМ кипячением в водном растворе сернокислой меди и серной кислоты с добавлением медной стружки в соответствии с ГОСТ 6032-84.

В третьей главе представлены результаты исследования коррозионно-электрохимического, коррозионно-усталостного поведения и физико-механических свойств сталей 12X18H10 и 12X18H10T.

В процессе изготовления гибкой части компенсационного узла материал подвергается холодной деформации, при которой возможно образование мартенсита деформации (σ -фазы). На рис. 1 представлены результаты исследования изменения остаточной индукции в зависимости от напряжения (степени деформации) при двух скоростях деформирования, проведенного с целью определения принципиальной возможности ускорения процесса форми-

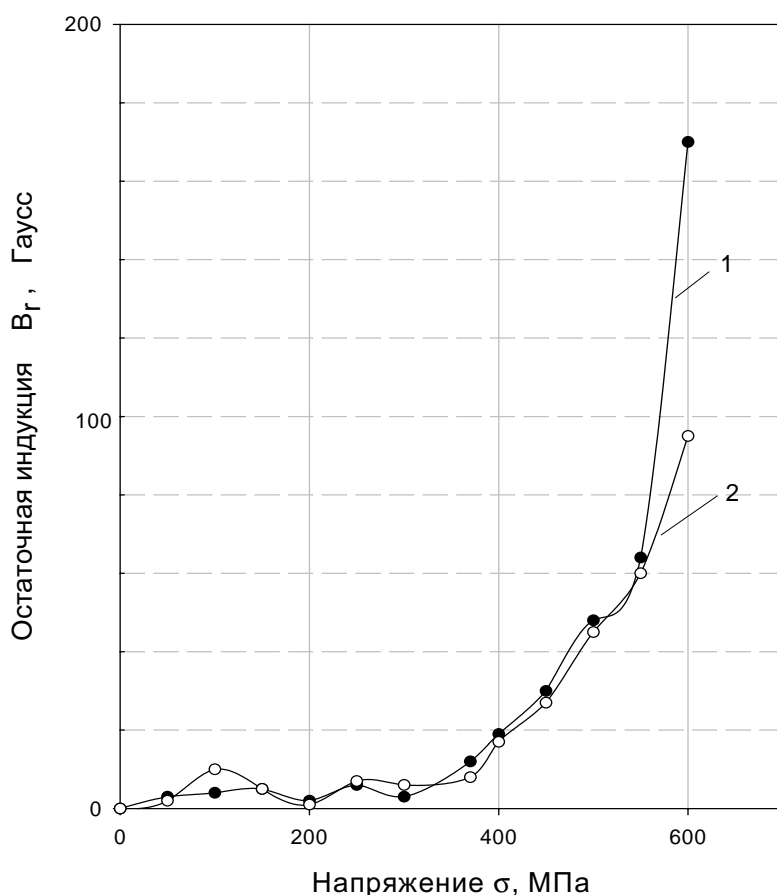


Рис. 1. Зависимость изменения остаточной индукции стали 12X18H10 от величины напряжения при разных скоростях деформирования:
1 – 10 мм/мин;
2 – 90 мм/мин

рования гибкой части компенсатора. При этом исходили из очевидной прямой зависимости между скоростью сварки и скоростью формования гибкой части компенсатора (при создании гибкой оболочки навивкой профилированной ленты со сваркой внахлест контактно-роликовым швом по вершинам гофра).

Как показали проведенные исследования, пластическая деформация ста-

ли 12X18H10 приводит к появлению магнитной составляющей – мартенсита деформации. Незначительный рост количества мартенсита наблюдался уже практически в области упругих напряжений и деформаций (более 200 МПа), что связано, вероятно, с переходом стали при ее растяжении из упругой области в стадию легкого скольжения. Его количество практически не изменяется на ранних стадиях деформационного упрочнения и экспоненциально возрастает в области больших пластических напряжений (более 400 МПа) и деформаций. Видно, что увеличение скорости деформирования сплава практически не влияет на мартенситообразование вплоть до предела прочности.

Степень остаточной деформации стали 12X18H10 при формировании гибкой части компенсатора из ленты методом сварки вследствие технологической наследственности, по данным литературных источников, не превышает 13 % (соответствует остаточным напряжениям менее 400 МПа). Таким образом, проведенные исследования показали, что существенного образования мартенсита деформации как анодной составляющей микроструктуры стали ($\gamma \rightarrow M_d$ превращение) в количествах, достаточных для усиления коррозии, при принятой технологии изготовления гибкой части компенсаторов не происходит. Исследованный диапазон варьирования скоростей деформирования (скоростей сварки) не оказывает практического влияния на повышение коррозионной активности стали.

На рис. 2 представлены потенциостатические поляризационные кривые стали 12X18H10 в 3%-м хлориде натрия со свободным и затрудненным доступом кислорода (моделирование щелевой коррозии). Как видно из рис.2, при затрудненном доступе кислорода исследуемая сталь теряет пассивность и ведет себя как активная (что характерно для углеродистых и низколегированных сталей). При этом плотность тока саморастворения увеличивается в 2-2,5 раза, а при поляризации – на порядок и более.

Анализ поляризационной кривой 2 позволяет определить скорость коррозии и выявить область потенциалов блуждающих токов, не вызывающих

существенного усиления скорости коррозии сильфонных компенсаторов тепловых перемещений теплопроводов канальной прокладки из сталей типа 18-10. Результаты расчетов приведены в табл. 1.

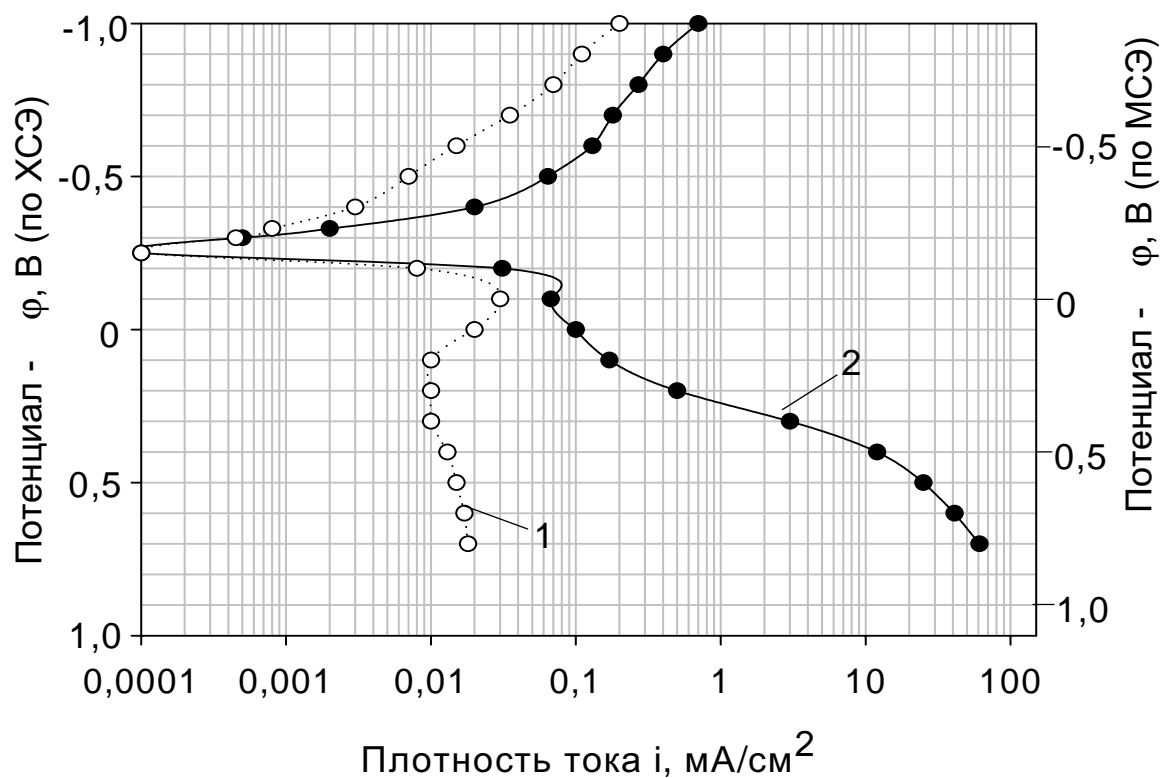


Рис. 2. Поляризационные кривые для стали 12X18H10 в 3%-м NaCl:
1 – со свободным доступом кислорода;
2 – с затрудненным доступом кислорода

Таблица 1

Скорость коррозии стали 12X18H10 в зависимости от поляризационного потенциала

Поляризационный потенциал ϕ , В (МСЭ)	-0,25	-0,1	0,0	+0,1	+0,2	+0,9
Скорость коррозии, мм/год	0,001	0,003	0,100	1,000	7,800	244,000

Для рассматриваемых условий сильфонные компенсаторы из тонколистовой стали 12X18H10 могут эксплуатироваться без защиты в области потенциалов блуждающих токов отрицательнее минус 0,1 В по медносульфатному электроду сравнения (МСЭ).

Аналогичные значения имеют и другие стали этого типа (12X18H10T, 12X18H9T, 12X18H9, 08X18H10T).

Распределение микротвердости и микроструктуры по глубине и сечению гофра изучали на серийном компенсаторе с $D_y = 300$ мм, полученном контактно-роликовой сваркой с одновременным профилированием ленты из стали 12X18H10. Из анализа результатов исследования следует, что наклеп в процессе изготовления гибкой части компенсатора сваркой из ленты распределяется равномерно по сечению на всю глубину металла. Такая однородность распределения микротвердости и характера микроструктуры по глубине гофра делает возможным перенос результатов малоцикловых коррозионно-усталостных испытаний, проведенных на пластинах на всю конструкцию гофрированной оболочки.

С целью определения влияния полей блуждающих токов на малоцикловую долговечность сильфонных компенсаторов тепловых расширений теплопроводов, эксплуатирующихся в условиях нестационарных режимов нагружения, были проведены малоцикловые усталостные испытания стали 12X18H10 на воздухе и в 3%-м хлориде натрия в том числе с анодной поляризацией +0,2 В (по МСЭ), выявленной в ходе проведенных трассовых исследований на теплопроводах городского теплоснабжения. По результатам усталостных испытаний были построены зависимости чисел циклов до разрушения стали от размаха приложенной деформации (рис. 3). Ранее проведенными исследованиями было выявлено снижение коррозионно-усталостной долговечности исследуемой стали в 3%-м хлориде натрия во всем диапазоне приложенных амплитуд деформации, не превышающее 30 %.

Как видно из рис. 3, анодная поляризация оказывает наиболее сильное влияние на коррозионно-усталостную долговечность стали 12X18H10. При этом наблюдается более чем двухкратное снижение циклической долговечности, что необходимо учитывать при выборе места установки компенсаторов в зависимости от наличия и амплитуды блуждающих токов и назначении

их ресурса.

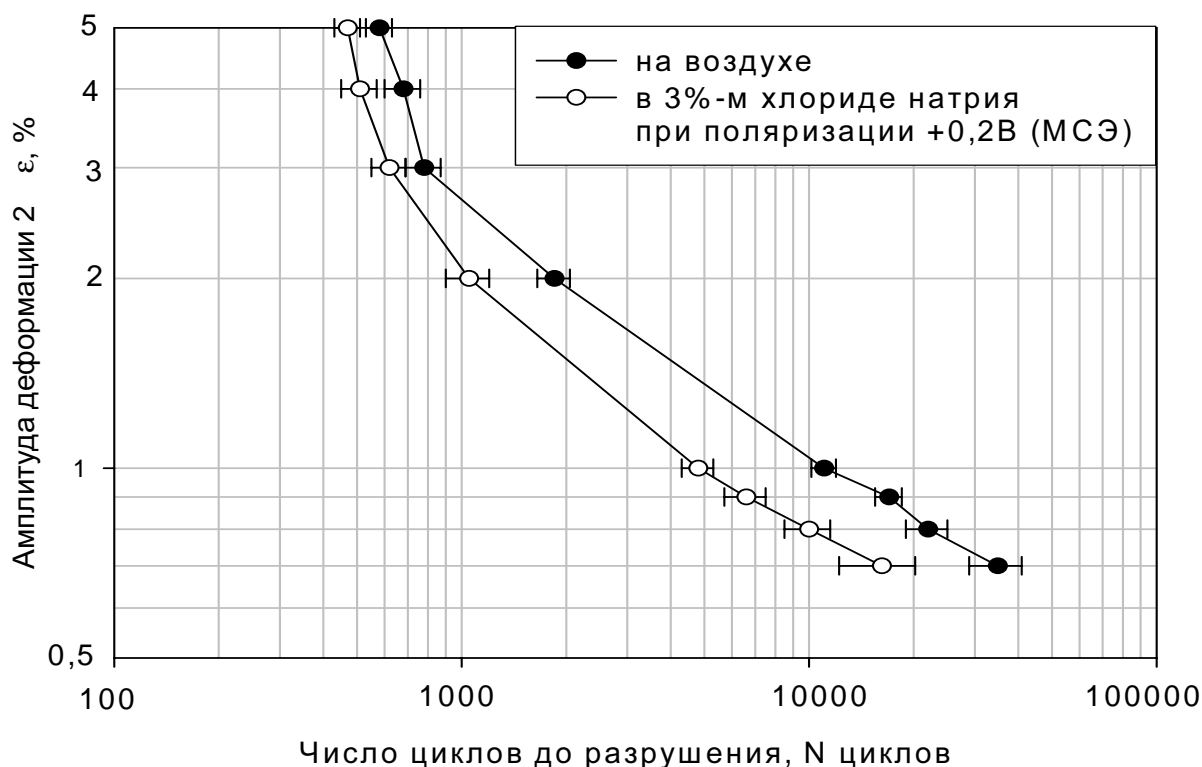


Рис. 3. Кривые малоциклового усталости для стали 12X18H10

Зависимости долговечности от величины пластической деформации при малоцикловом нагружении описываются известными соотношениями Коффина-Мэнсона ($\epsilon_p \cdot N^m = C$) и Лэнджера ($\epsilon_p = C \cdot N^{-m} + \sigma_{-1}/E$), где ϵ_p – амплитуда упругопластической деформации; N – число циклов до разрушения; σ_{-1} – предел усталости сплава; E – модуль упругости стали; C – постоянная, зависящая от механических свойств материала; m – показатель степени, зависящий от физико-механических свойств стали и влияния коррозионной среды.

При расчетах долговечности без учета коррозионного влияния среды показатель степени m принимается равным 0,5 для $\sigma_B < 700$ МПа или находится из выражения $m = 0,36 + \sigma_B \cdot 2 \cdot 10^{-4}$ для $700 < \sigma_B < 1200$ МПа (где σ_B – временное сопротивление при разрыве). Параметр C , связанный с пластическими свойствами металла, принимают равным $0,5 \cdot \delta_5$ или находят как $C = 0,5 \cdot \ln[1/(1-\psi)]$, где ψ – относительное поперечное сужение сплава при раз-

рыве, δ_5 - относительное удлинение сплава при разрыве, определенное на пятикратных образцах.

Для сталей типа 18-10 (близких по химическому составу и коррозионной стойкости) механические свойства, особенно такие как σ_B , ψ , δ_5 , могут существенно отличаться в зависимости от термообработки, сортамента и состояния поставки. Так, например, даже одна из наиболее популярных сталей этого типа 12X18H10T имеет по ГОСТ 5582-93 $\sigma_B = 900-1000$ МПа и $\delta_5 = 10\%$ в нагартованном состоянии и $\sigma_B = 750$ МПа, $\delta_5 = 25\%$ в полунагартованном состоянии, а для тонколистового проката $\sigma_B = 540$ МПа, $\delta_5 = 45\%$. Тонколистовая сталь этой марки после закалки с $1000-1080^\circ\text{C}$ и охлаждения в воде или на воздухе имеет $\sigma_B = 540$ МПа, $\delta_5 = 38\%$. Сортовая калиброванная сталь этой марки после аналогичной термической обработки имеет $\sigma_B = 520$ МПа,

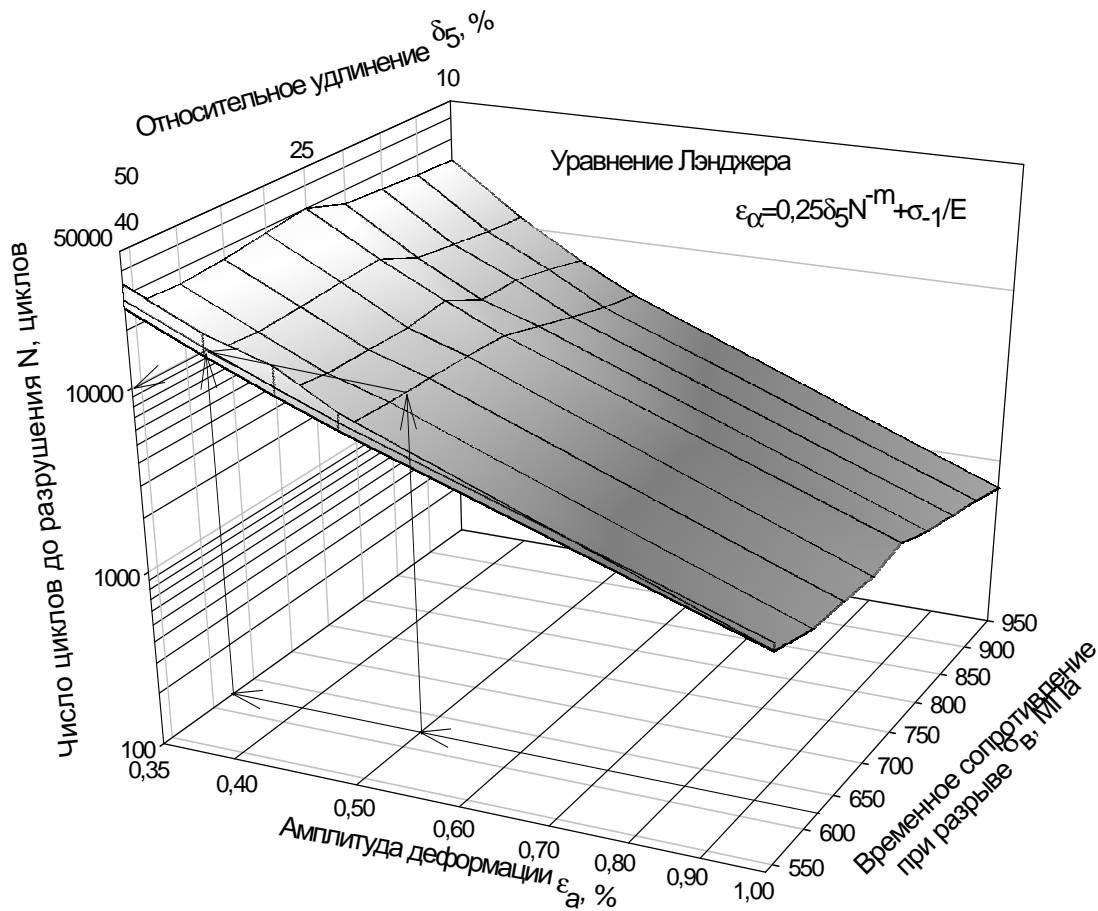


Рис. 4. Графическое определение малоциклового долговечности ($N_{\text{цикл}}$) сталей 12X18H10 и 12X18H10T

$\delta_5 = 40\%$. Такие же существенные отличия механических свойств в зависимости от поставки, сортамента и термической обработки имеют и другие стали этого типа.

Очевидно, что состояние поставки, термообработка и сортмент этого сплава необходимо учитывать при расчетной оценке его усталостной долговечности. Это подтверждается полученными в работе сравнительными результатами расчетных и экспериментальных усталостных долговечностей для различных состояний исследуемого сплава. Также очевидно, что сортность и состояние поставки, в соответствии с вышесказанным, оказывает значительное влияние и на величины показателя степени m и параметра C .

На основании результатов исследований и их анализа построен трехмерный график (рис. 4), позволяющий определить малоцикловую долговечность ($N_{\text{цикл}}$) изделий из сталей 12X18H10 и 12X18H10T с учетом их прочностных и пластических свойств в состоянии поставки.

В четвертой главе представлены результаты сравнительных исследований коррозионно-усталостного поведения, микроструктуры и физико-механических свойств сварных соединений, полученных микроплазменной и контактно-роликовой сваркой стали 12X18H10T в диапазонах регламентируемых режимов сварки, используемых для изготовления гибкой части изделий с ГМО.

В табл. 2 и 3 приведены результаты малоцикловых усталостных и коррозионно-усталостных испытаний сварных соединений стали 12X18H10T при анодной поляризации +0,2 В (МСЭ).

На рис. 5 представлены микроструктуры сварных соединений стали 12X18H10T, полученных микроплазменной сваркой.

Как видно из рис. 5, с увеличением скорости сварки больше 80 м/ч структура сварного соединения становится более неоднородной, что может отрицательно сказываться на коррозионно-усталостной долговечности сварных соединений. Исследования микротвердости сварных соединений не вы-

Таблица 2

Усталостная долговечность сварных соединений стали 12Х18Н10Т, полученных микроплазменной сваркой в зависимости от скорости сварки

Размах деформации, 2ϵ , %	Число циклов до разрушения, N циклов							
	120...125 м/ч		90...100 м/ч		70...80 м/ч		60...70 м/ч	
	на воздухе	при поляризации, в 3 %-м NaCl	на воздухе	при поляризации, в 3 %-м NaCl	на воздухе	при поляризации в 3 %-м NaCl	на воздухе	при поляризации, в 3 %-м NaCl
4,0	390	220	320	180	330	250	450	230
3,0	680	350	580	310	630	425	630	385
2,0	1600	495	1250	400	1680	670	1000	650
1,0	5900	1830	4000	2050	4500	2680	3700	2080
0,9	7300	2370	5000	2600	7000	3730	5200	2790
0,8	9000	2950	6000	3060	10100	5000	7900	3500
0,7	13000	3800	7900	3840	17000	7420	11000	4900

Таблица 3

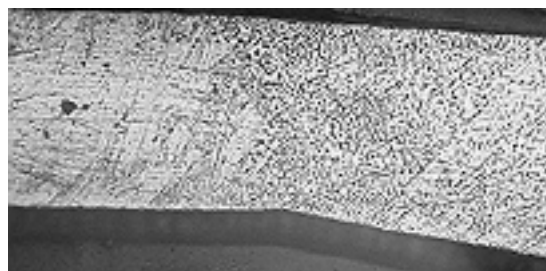
Усталостная долговечность сварных соединений стали 12Х18Н10Т, полученных контактно-роликовой сваркой в зависимости от частоты импульсов сварочного тока

Размах деформации, 2ϵ , %	Число циклов до разрушения, N циклов					
	25 импульсов в минуту			100 импульсов в минуту		
	на воздухе	в 3 %-м NaCl	при поляризации, в 3 %-ном NaCl	на воздухе	в 3 %-м NaCl	при поляризации, в 3 %-ном NaCl
4,0	450	220	210	390	210	170
3,0	850	490	410	750	380	270
2,0	2050	1230	680	1900	580	550
1,0	10050	6500	4980	8900	2000	1300
0,9	12000	9200	5320	11000	3500	2100
0,8	15000	12000	9000	15000	8100	5100
0,7	19000	18000	13250	19900	15000	7800

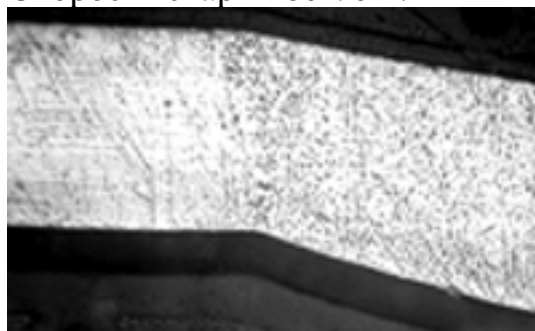
явили однозначного влияния микротвердости на коррозионно-усталостную долговечность при малоцикловом нагружении.



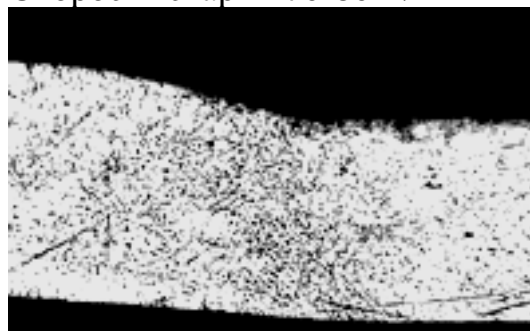
Скорость сварки 60-70 м/ч



Скорость сварки 70-80 м/ч



Скорость сварки 90-100 м/ч



Скорость сварки 120-125 м/ч

Рис. 5. Микроструктуры сварных соединений стали 12X18H10T, полученных с различными скоростями микроплазменной сваркой (x 100)

Проведенные малоцикловые коррозионно-усталостные испытания и металлографические исследования показали, что скорости микроплазменной сварки оказывают неоднозначное влияние на усталостную и коррозионно-усталостную при внешней анодной поляризации долговечности сварных соединений стали 12X18H10T.

Малоцикловые усталостные и коррозионно-усталостные испытания контактно-роликовых сварных соединений, полученных с различной частотой импульсов сварочного тока, показали, что большей циклической долговечностью как на воздухе, так и в коррозионно-активной среде, в том числе при анодной поляризации, обладают соединения, полученные с частотой тока 25 имп./мин.

С целью определения причин такого поведения сварных контактно-роликовых соединений были проведены исследования их микро- и макро-структуры, показавшие, что сварные соединения, полученные с частотой сварочного тока 25 имп./мин, обладают более однородным характером пере-

крытия ядер шва по сравнению со 100-импульсной сваркой (рис. 6).



Частота импульсов сварочного тока
25 имп./мин



Частота импульсов сварочного тока
100 имп./мин

Рис. 6. Макроструктуры сварных контактно-роликовых швов (x 50)

Вероятно, более высокая неоднородность поверхности сварного шва, формы и размеров ядер сплавления, полученных с частотой импульсов сварочного тока 100 имп./мин, оказывает негативное влияние на усталостную и коррозионную усталостную долговечность сварных соединений, связанное также с более высокой степенью концентрации напряжений на участках пересечения ядер, что подтверждается результатами измерения микротвердости.

Следует отметить, что усталостная и коррозионно-усталостная долговечность сварных микроплазменных и контактно-роликовых швов ниже, чем у основного металла, особенно в области упругопластических деформаций.

Для сварных соединений, полученных контактно-роликовой сваркой, были проведены электрохимические поляризационные исследования. Из результатов анализа поляризационных кривых, сведенных в табл. 4, следует, что сварные соединения, полученные с частотой сварочного тока 25 имп./мин, обладают более высокой коррозионной стойкостью, хотя в обоих случаях она пренебрежительно мала и не вызывает опасности разрушения из-за общей коррозии.

В этой связи для изготовления гибкой части металлорукавов из нержавеющей аустенитных хромоникелевых сталей типа 18-10 предлагается применять контактно-роликовую сварку с частотой импульсов сварочного тока 25 имп./мин и микроплазменную сварку со скоростью 70-80 м/ч, которые по-

зволяют получить сварные соединения с наибольшей коррозионно-усталостной долговечностью в условиях анодной поляризации.

Таблица 4

Частота импульсов сварочного тока, имп./мин	Стационарный потенциал $\varphi_{ст}$, мВ	Плотность тока коррозии $i_{кор}$, мкА/см ²	Показатель потери массы K_m , г/(м ² ·год)	Скорость коррозии, мм/год	Микротвердость Н, МПа
25	-310	0,2	18,26	0,0023	165
100	-400	0,4	36,51	0,0046	220
основной металл	-250	0,1	9,13	0,0010	157

Одним из основных факторов, позволяющих определить назначаемый гарантированный ресурс изделий с ГМО, является рабочая длина гибкой части и эпюра изменений деформаций в течение всего периода эксплуатации в соответствующих средах. В этой связи по заказу «Тепловых сетей» ОАО «Башкирэнерго» г. Уфы на основе проведенных исследований был разработан расчетно-графический метод определения ресурса сильфонных компенсаторов тепловых перемещений теплопроводов с учетом колебаний температуры теплоносителя в отопительный сезон. Метод позволяет также выбрать оптимальный типоразмер компенсатора в зависимости от места установки и длины линейного участка теплопровода между компенсаторами тепловых расширений.

Все исследованные сварные швы и основной металл (стали 12Х18Н10 и 12Х18Н10Т) были испытаны на склонность к межкристаллитной коррозии с целью обоснованной замены стали 12Х18Н10Т (не склонную к МКК) на более дешевую сталь 12Х18Н10 (в ряде случаев склонной к МКК, особенно в области сварных швов). Все сварные швы оказались устойчивыми против МКК.

Пятая глава посвящена исследованию возможности повышения ресурса сильфонных компенсаторов тепловых перемещений путем ингибирования коррозии и коррозионно-усталостного разрушения в условиях эксплуатации

при воздействии анодной поляризации блуждающими токами.

С целью повышения коррозионной стойкости сильфонных компенсаторов из сталей типа 18-10 к питтинговой и общей коррозии был исследован кубовой остаток производства СЖК, модифицированный рядом новых органических соединений, целенаправленно синтезированных в качестве ингибиторов коррозии.

В качестве кубового остатка использовался готовый продукт – связующий литейный марки КО по ТУ 38.1071277-90, представляющий собой раствор кубового остатка производства СЖК марок А и В. Он предназначен для использования в литейном производстве при изготовлении стержней всех классов сложности, машинной и ручной формовки и для изготовления форм. Химический состав, физико-химические свойства и токсичность литейного связующего предполагают возможность его использования в качестве ингибитора коррозионно-механического разрушения. Ингибиторы предварительно наносились на поверхность стали методом окунания и в дальнейшем выполняли роль пластичного герметика.

Результаты электрохимических коррозионных исследований приведены в табл. 5. Все исследованные ингибиторы показали высокую, не менее 98 % степень защиты, однако обладают различными потенциалами начала и конца пассивации и областью пассивного состояния. Как видно из табл. 5, с увеличением времени экспозиции, наиболее стабильными характеристиками обладает связующий литейный без добавок, поэтому дальнейшие испытания проводили только с ним. Питтингов на образцах после испытаний не обнаружено.

С целью определения адгезионных свойств смазок проводили исследование по определению склонности к сползанию связующего литейного. Испытание проводили по ГОСТ 6037-75 «Смазки пластичные. Метод определения склонности к сползанию». Связующий литейный выдержал испытание при температурах до 100⁰С.

Защитные свойства ингибированных смазок

Композиция	Скорость коррозии, мм/год	Потенциал пассивации, мВ (по ХСЭ)	Потенциал перепассивации, мВ (по ХСЭ)	Область пассивного состояния, мВ	Степень защиты, Z, %
Время экспозиции 15 минут					
без добавок	0,010	-	-	-	-
ХПК+СЛ	менее 0,001	-660	+420	1080	≈ 98
ТХ+СЛ	менее 0,001	-480	+420	500	≈ 98
СЛ	менее 0,001	-300	+100	400	≈ 98
Время экспозиции 1 час					
без добавок	0,010	-	-	-	-
ХПК+СЛ	менее 0,001	-500	+280	780	≈ 98
ТХ+СЛ	менее 0,001	-800	+480	1280	≈ 98
СЛ	менее 0,001	-460	+280	740	≈ 98
Время экспозиции 2 часа					
без добавок	0,010	-	-	-	-
ХПК+СЛ	менее 0,001	-340	+280	620	≈ 98
ТХ+СЛ	менее 0,001	-380	+300	680	≈ 98
СЛ	менее 0,001	-460	+280	740	≈ 98

Примечание. СЛ – связующий литейный; ХПК, ТХ – рабочие названия новых ингибиторов.

Учитывая, что одним из видов коррозионномеханоэлектрохимического разрушения сильфонных компенсаторов тепловых и монтажных перемещений является малоцикловая коррозионная усталость, была исследована возможность повышения циклической долговечности стали 12Х18Н10 путем ингибирования связующим литейным в условиях анодной поляризации. Результаты коррозионно-усталостных испытаний приведены в табл. 6.

Как видно таблиц, связующий литейный снижает скорости общей коррозии и питтингообразование (степень защиты не менее 98 %), увеличивает усталостную и коррозионно-усталостную долговечности в условиях внешней анодной поляризации при умеренных режимах нагружения ($2\varepsilon=0,7-0,8\%$) в 1,5-1,7 раз. Это позволяет рекомендовать использовать связующий литейный в качестве ингибитора коррозии и малоцикловой коррозионной усталости нержавеющей сталей типа 18-10 при анодной поляризации блуждающими токами.

Малоцикловая коррозионно-усталостная долговечность стали 12X18H10
при ингибировании

Размах деформации 2ε , %	Число циклов до разрушения, N циклов			
	на воздухе	при поляризации +0,2 В (МСЭ), 3%-м NaCl	на воздухе с СЛ	при поляризации +0,2 В (МСЭ), 3%-м NaCl с СЛ
4,0	680	510	980	650
3,0	780	620	1300	760
2,0	1850	830	2850	1100
1,0	11050	4800	13500	7000
0,9	17000	6600	19500	9000
0,8	22000	10000	34500	16000
0,7	34900	16200	55000	28400

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. На основе анализа проведенных исследований получена графическая трехмерная зависимость, позволяющая определять малоцикловую долговечность сталей 12X18H10 и 12X18H10T с учетом их прочности и пластичности в состоянии поставки. Определена область потенциалов блуждающих токов (менее минус 0,1 В по МЭС), в которой сильфонные компенсаторы из сталей типа 18-10 не подвержены коррозии в течение гарантированного срока эксплуатации.

2. Показано неоднозначное влияние скорости микроплазменной сварки и частоты импульсов тока контактно-роликовой сварки гибкой части металлорукавов на коррозионно-усталостную долговечность и коррозионную стойкость сварных швов стали 12X18H10T. В диапазонах регламентированных режимов микроплазменной и контактно-роликовой сварки, используемых для изготовления гибкой части изделий с ГМО, установлены области рабочих параметров, позволяющие получать сварные соединения с наибольшей коррозионно-усталостной долговечностью в условиях анодной поляризации (скорость 70-80 м/ч при микроплазменной сварке и частота 25 имп./мин при контактно-роликовой).

3. Показано, что связующий литейный КО по ТУ 38.1071277-90 снижает скорость общей коррозии и питтингообразования (степень защиты

не менее 98 %), а также увеличивает в 1,5-1,7 раза усталостную и коррозионно-усталостную долговечность изделий с ГМО при умеренных режимах нагружения ($2\varepsilon=0,7-0,8$ %) в условиях внешней анодной поляризации.

4. Разработан расчетно-графический метод определения долговечности гибкой части сильфонных компенсаторов из сталей типа 18-10 в зависимости от конкретных условий эксплуатации и типоразмера компенсатора.

Основные результаты работы опубликованы в следующих научных работах:

1. Козлова (Чурилова) Т.В., Бугай Д.Е., Давыдов С.Н. Повышение коррозионно-механической стойкости стали 12Х18Н10Т при ее депассивации ингибированными композициями// Матер. 51-й науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2000. – С. 67.
2. Давыдов С.Н., Козлова (Чурилова) Т.В., Бугай Д.Е., Лаптев А.Б., Абдуллин И.Г. Защита от коррозии гибких металлических трубопроводов ингибированными смазками// Проблемы нефтегазового комплекса: Матер. науч.-метод. конф. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2000. – С.35.
3. Давыдов С.Н., Козлова (Чурилова) Т.В., Абдуллин И.Г. Повышение коррозионно-усталостной прочности стали 12Х18Н10 в условиях депассивации консистентными смазками// Науч. тр. III Конгресса нефтегазопромышленников России. Секция Н «Проблемы нефти и газа». – Уфа: Реактив, 2001. – С.339-340.
4. Давыдов С.Н., Абдуллин И.Г., Козлова (Чурилова) Т.В. Циклическая долговечность сварных швов стали 12Х18Н10Т, полученные контактно-шовной сваркой// Технологические проблемы развития машиностроения в Башкортостане: Сб. науч. тр. – Уфа: Гилем, 2001. – С. 53-55.
5. Давыдов С.Н., Козлова (Чурилова) Т.В. Малоцикловая коррозионно-усталостная долговечность сварных швов тонколистовой стали 12Х18Н10Т, полученных при различных режимах микроплазменной сварки// Коррозия металлов: диагностика, предупреждение, защита и ресурс: Сб. науч. ст. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2002. – С.68-71.
6. Федотов И.А., Козлова (Чурилова) Т.В., Давыдов С.Н. Влияние режимов контактно-шовной сварки на микротвердость зоны сварного соединения тонколистовой стали 12Х18Н10Т// Сб. тез. 53-й науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2002. – С. 56.
7. Давыдов С.Н., Козлова (Чурилова) Т.В., Абдуллин И.Г. К оценке ресурса гибких металлических трубопроводов при малоцикловом нагружении в условиях механохимической коррозии// Трубопроводный транспорт – сегодня и завтра: Матер. Междунар. науч.-техн. конф. – Уфа: Монография, 2002. – С.267-269.

8. Давыдов С.Н., Козлова (Чурилова) Т.В. Влияние режимов контактно-шовной сварки на коррозионно-усталостную долговечность сварного соединения тонколистовой стали 12Х18Н10Т в условиях анодной поляризации// Инновации в машиностроении: Сб. ст. II Всерос. науч.-практ. конф. – Пенза, 2002. – С.123-126.
9. Вахитова А.Р., Зиннатуллин А.К., Козлова (Чурилова) Т.В., Давыдов С.Н. Коррозионная стойкость сварных соединений стали 12Х18Н10Т в 3%-м растворе// Сб. тез. 54-й науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2003. – С. 62.
10. Козлова (Чурилова) Т.В. Учет механических свойств сталей типа 18-10 в зависимости от их сортамента и состояния поставки при расчете долговечности изделия// Сб. тез. 54-й науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2003. – С. 81.
11. Давыдов С.Н., Козлова (Чурилова) Т.В. Ингибирование малоциклового усталости нержавеющей аустенитных хромоникелевых сталей// Матер. IV конгресса нефтегазопромышленников России. – Уфа: РИА Центр «РИД», Изд-во «GreenFish Studio», 2003. – С.192-194.
12. Давыдов С.Н., Козлова (Чурилова) Т.В. Влияние сортамента и механических свойств сталей типа 18-10 на усталостную долговечность при малоцикловом нагружении// Нефтепереработка и нефтехимия-2003: Матер. науч.-практ. конф. – Уфа: Изд-во ИНХП, 2003. – С. 355-357.
13. Козлова (Чурилова) Т.В. Основные факторы, влияющие на коррозионно-механическое поведение сварных швов особотонколистовой стали типа 18-10// СЕВЕРГЕОЭКОТЕХ-2003: Матер. IV Межрегион. молодежной науч. конф. – Ухта, 2003. – С. 269.
14. Давыдов С.Н., Козлова (Чурилова) Т.В., Абдуллин И.Г. Применение кубового остатка производства СЖК в качестве ингибитора коррозионно-усталостного разрушения стали 12Х18Н10 в условиях анодной поляризации// Инновационные проблемы развития машиностроения в Башкортостане: Сб. науч. тр. – Уфа: Гилем, 2003. – С. 167-173.
15. Давыдов С.Н., Абдуллин И.Г., Козлова (Чурилова) Т.В., Киреев Д.М. Унификация установки малоциклового усталости для различных условий испытаний// Реализации государственных образовательных стандартов при подготовке инженеров-механиков: проблемы и перспективы: Матер. II Всерос. уч.-науч.-практ. конф. – Уфа, 2003.
16. Давыдов С.Н., Чурилова Т.В. Графическое определение числа циклов до разрушения сталей типа 12Х18Н10(Т) в условиях малоциклового нагружения в зависимости от их механических свойств// Новоселовские чтения: Матер. 2-й Междунар. науч.-практ. конф. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2004. – С. 95-97.