

01.02.06
D-793

Государственный комитет Российской Федерации
по высшему образованию
Красноярский государственный технический университет

На правах рукописи

ОСТСЕМИН Александр Амуревич

УДК 621.791;539.4

**"РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ЛОКАЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ
И ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ СТАЛЬНЫХ ТРУБ"**

**01.02.06 - Динамика, прочность машин, приборов
и аппаратуры**

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук**

Красноярск 1994

Работа выполнена в Челябинском государственном техническом университете.

Официальные оппоненты: заслуженный деятель науки и техники РФ,
доктор технических наук,
профессор В.А.Жилкин,
доктор физико-математических наук,
профессор С.И.Сенашев,
доктор технических наук, ведущий
научный сотрудник И.А.Разумовский.

Ведущая организация - АО Челябинский трубопрокатный завод.

Защита состоится 20 октября 1994 г. на заседании диссертационного совета Д 064.54.02 при Красноярском государственном техническом университете по адресу; 660074, г.Красноярск, 74, ул.Киренского, 26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Красноярского государственного технического университета.

Автореферат разослан " " 1994 г.

Ваши отзывы на автореферат в 2-х экземплярах, заверенные печатью, просим направлять в адрес университета.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук,
доцент

П.Н.Сильченко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ



Актуальность и состояние проблемы. Трубопроводы относятся к весьма ответственным конструкциям, разрушение которых может нанести существенный ущерб народному хозяйству и окружающей среде. В настоящее время более половины всех стальных труб выпускаются сварными. Высокая степень ответственности трубопроводов и их высокая металлоемкость исключительно остро поставили проблемы обеспечения надежности сварных труб, экономного расходования металла при их производстве и создании новых конструкций труб, технологий и технических средств их изготовления. Ежегодная стоимость ремонтно-восстановительных работ с использованием традиционной технологии приближается к стоимости вновь сооружаемых трубопроводов.

Успешное решение проблемы обеспечения надежности трубопроводов возможно на базе методов оценки работоспособности сварных труб, учитывающих реальные условия эксплуатации. При строительстве и эксплуатации трубопроводов металл труб подвергается воздействию различных температур и скоростей деформирования в условиях сложного напряженного состояния. Среди целого комплекса проблем, связанных с созданием расчетных методов, важное место занимает проблема наиболее полного учета влияния механической неоднородности, двухосности нагружения и дефектов сварки на эффект контактного упрочнения мягких и твердых прослоек, что не позволяет решить вопросы, связанные с нормированием дефектов. Для решения поставленной проблемы в связи с многообразием расчетных схем и вариантов решений требуется формирование наиболее общего подхода, который давал бы возможность устанавливать закономерности влияния целого ряда параметров на механическое поведение сварных труб. Таким образом, возникает необходимость в постановке и проведении целенаправленных научных исследований по разработке методов оценки работоспособности сварных труб с учетом комплексного влияния на свойства металла напряженного состояния, механической неоднородности, трещиноподобных дефектов, температуры.

В связи с этим создание научных основ анализа локальной прочности и трещиностойкости стальных труб магистральных газонеф-

тепроводов, разработка на этой основе расчетно-экспериментальных методов представляется актуальной проблемой, имеющей важное народнохозяйственное значение. Решение данной проблемы возможно на путях использования теоретических и экспериментальных методов теории упругости, пластичности и механики разрушения. Постановка и решение этой фундаментальной проблемы составляет основу данной работы.

Работа выполнена согласно постановлению Совета Министров СССР N 16 от 18.01.83 г. "О мерах по дальнейшему развитию и более широкому внедрению непрерывных и новых специализированных видов транспорта", приказу Министра metallurgии СССР N 220 от 18.02.83г. постановлению ГКНТ N 555 от 30.10.85 г. и научно-технической программе О.54.07 "Создать и внедрить прогрессивные системы, технические средства и технологические процессы промышленного и новых специализированных видов транспорта", - которыми было предусмотрено сооружение в 1988-1990 гг. около 3000 км магистральных трубопроводов.

Цель настоящей работы состояла в разработке расчетных и экспериментальных методов оценки напряженного состояния и несущей способности газонефтепроводов и их сварных соединений с учетом конструктивно-геометрических факторов, особенностей поведения основного металла конструкции и металла шва в условиях сложного напряженного состояния, а также дефектов сварных стыков и на этой основе предотвращения вязких и хрупких разрушений газонефтепроводов при их эксплуатации.

Для реализации поставленной цели необходимо было решить следующие задачи.

1. На основе математической теории идеальной пластичности разработать теоретический подход для оценки напряженно-деформированного состояния и предельной несущей способности при статическом растяжении (сжатии) сварных соединений и нагружении сварных труб внутренним давлением в зависимости от степени и несимметричности их механической неоднородности, размеров и угла наклона мягких прослоек и дефектов в них, двухосности нагрузления.

2. Разработать методы расчетной оценки несущей способности сварных одно-, двухслойных и бандажированных труб, учитывающие

влияние всего комплекса механических характеристик основного металла и сварного соединения, напряженно-деформированного состояния, температуры и скорости деформации, а также влияния дефектов и параметров бандажа.

3. Провести математический анализ двухмерных плоских и осесимметричных задач идеальной пластичности, развить приближенные аналитические методы применительно к решению задачи Л.Прандтля при сжатии пластического слоя двумя шероховатыми плитами, растяжении (сжатии) наклонной и ортогональной мягкой прослойки механически неоднородного соединения и испытании бандажированной трубы внутренним давлением.

4. Провести обобщение теории глубоких стадий деформирования при растяжении плоского и круглого образцов с надрезами, разработать метод для определения осевого напряжения в шейке этих образцов и получить комплекс новых экспериментальных данных по прочности и трещиностойкости трубных сталей.

5. Предложить пути совершенствования технологии и машин бандажирования нефтепроводов при ремонте.

Научная новизна работы заключается в дальнейшем совершенствовании расчета несущей способности сварных труб на основе развития и обобщения методов теории упругости, пластичности и механики разрушения. Основные научные результаты, защищаемые автором:

1. В замкнутом виде при новых граничных условиях, реально отображающих распределение касательных напряжений на границе твердого и мягкого металлов в сварном стыке труб, проведено обобщение плоской задачи Л.Прандтля при сжатии ортогонального (приближенное решение) и наклонного мягкого слоя между двумя шероховатыми плитами.

2. На основе полученного решения разработан алгоритм оценки несущей способности и предложены уточненные методы расчета статической прочности сварных стыков труб в зависимости от степени и вида механической неоднородности, размеров дефектов в мягких и твердых стыковых швах, их геометрических параметров и двухосности нагружения.

3. Получены расчетные формулы для оценки разрушающего давления стенки трубопровода с учетом вышеназванных факторов и дефор-

мационного упрочнения, которые обобщают известные решения Б.А.Щеглова, Свенсона, А.Н.Моношкова.

4. Предложена математическая модель участка трубопровода с навитым снаружи высокопрочным профилем перпендикулярно и наклонно образующей трубы, которая учитывает такие дополнительные факторы, как угол натяжения профиля при навивке, изменение параметра двухосности нагружения трубы, а также величину ее сжатия, что позволяет регулировать несущую способность нефтепроводов при их ремонте и тем самым повышать надежность их работы.

5. Впервые определено напряженно-деформированное состояние двухслойных сосудов давления при следующих реологических моделях материала: упругий материал, упругий материал с ограниченной сжимаемостью, упруго-идеально-пластический материал, упругохрупкий материал с ограниченной сжимаемостью (имитирующий металл двухслойной износостойкой трубы), жестко-идеально-пластический материал с учетом температурных напряжений при статическом и динамическом нагружении на основе гипотезы Винклера, в отличие от известных решений академика В.Г.Галеркина, Г.С.Шапиро, Е.Х.Агабабяна.

6. Разработан универсальный метод для определения осевого напряжения в минимальном сечении шейки плоского и цилиндрического образцов, вырезаемых из труб, на основе уточненной формулы определения радиуса r кривизны линий осевых главных напряжений. Проведено обобщение теории образования шейки П.Бриджмена, Н.Н.Давиденкова и Н.И.Спиридоновой для образца с эллиптическим сечением на основе конформного отображения с помощью дробно-линейной функции и функции Жуковского. Методом малого параметра предложены и экспериментально проверены формулы для углового, параболического и круглого надрезов. В частном случае получаются известные решения для параболического надреза Е.Оната и В.Прагера, для углового - Л.М.Качанова.

7. Разработан новый метод определения напряженного состояния фрагментов трубопроводов с дефектами на основе голограммической интерферометрии с использованием картин абсолютных разностей хода. Разработана методика двухпараметрического определения коэффициентов интенсивности напряжений для наклонной трещины при двух-

основе нагружении на основе предложения Либовица по учету второго члена в представлении Вильямса компонент напряжений для плоского случая при разложении в ряд по собственным функциям.

Практическая ценность работы заключается в следующем.

1. Полученные результаты имеют прикладное значение и позволяют оценить влияние конструктивно-геометрических факторов на прочность и деформативность сварных однослойных, двухслойных и бандажированных труб с дефектами типа трещин. На основе приведенных алгоритмов представлена возможность поставить и решить некоторые технологические задачи теории пластичности (ковка, штамповка).

2. Разработаны опытно-промышленные технологии для новых конструкций труб большого диаметра (бандажированные, двухслойные: технология и машины локального и непрерывного бандажирования трубопроводов, защищенные 11 авторскими свидетельствами). Разработана и внедрена в Южном управлении магистральными нефтепроводами (г.Шевченко) технологическая инструкция "Бандажирование магистральных нефтепродуктопроводов при капитальном ремонте".

3. Для ряда трубных сталей получен комплекс характеристик прочности, пластичности и разрушения (трещиностойкости), представляющих собой основу для выбора материалов для магистральных газонефтепроводов и их сварных соединений.

4. Для механически неоднородных сварных соединений труб большого диаметра предложены научно обоснованные подходы к нормированию различных дефектов. Внедрена инструкция "Методика оценки степени опасности дефектов труб нефтепроводов" (ВНИИСПТНефть, г.Уфа).

5. Проведена экспертиза нефтепровода Усть-Балык - Омск и разработаны рекомендации для его испытания повышенным внутренним давлением для выявления дефектов. На основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований внедрение полученных в работе результатов на предприятиях и в НИИ: п/я А-3700, Челябинском трубопрокатном заводе, Магнитогорском горно-металлургическом институте, ЦНИИПроектстальконструкции, ВНИИСПТНефть, Южном управлении магистральными нефтепроводами - позволило сократить трудовые и материальные затраты при определении прочности и трещино-

стойкости трубопроводов. Получен экономический эффект от внедрения результатов диссертационной работы более 4 млн руб. в ценах 1990 г. и экономия 1290 т нефти.

Достоверность основных научных положений и полученных результатов обеспечивается строгостью постановки и математическими методами, сопоставлением некоторых частных решений с известными в литературе, полученными другими методами, сопоставлением с результатами проведенных экспериментов и экспериментальными данными других авторов.

Методика исследований. Теоретические и экспериментальные исследования базируются на анализе напряженно-деформированного состояния сварных соединений методами математической теории упругости, теории пластичности и механики разрушения, на современных представлениях о механизме разрушения материалов и трубопроводов. В работе получили дальнейшее развитие статический метод теории предельного равновесия, метод линий скольжения, метод малого параметра, метод конформного отображения, методы линеаризации и др. Для анализа процессов, связанных со значительными расчетами для определения КИН, применяли метод конечных элементов (МКЭ). Экспериментальные исследования механического поведения сварных соединений и образцов проведены на основе метода шаровых полос, координатных сеток, метода голограммической интерферометрии, оптически чувствительных покрытий, тензометрии, метода металлографического анализа, которые позволили получить высокую точность и достоверность результатов экспериментов. Для проведения опытов применяли специально сконструированные установки с широким диапазоном усилий (0,1...5 кН).

Личный вклад автора заключается в постановке данного исследования, формулировке и разработке всех основных положений, определяющих научную новизну работы, а также ее практическую значимость, в непосредственном участии во всех этапах исследований, в руководстве ими и внедрении полученных результатов. Часть экспериментальных и расчетных результатов получена при участии сотрудников ЧГТУ и УралНИТИ, которым автор выражает глубокую благодарность за помощь в работе. Особую признательность автор выражает

докт. физ.-мат. наук, проф. А. Я. Красовскому за ценные советы и внимание к работе.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались на I-III Всесоюзных симпозиумах по механике разрушения (г. Киев, 1978., г. Житомир, 1985, 1990 гг.), на конференции "Методы оценки и пути повышения качества сварных труб и надежности нефтепроводов" (г. Уфа, 1978 г.), на ежегодных конференциях ЧПИ (1977-1990 гг.), на зональных конференциях сварщиков Урала (1980-1986 гг.), на V Сибирской конференции "Повышение эффективности сварочного производства" (г. Красноярск, 1982 г.), Всесоюзной конференции "Прочность материалов и конструкций при низких температурах" (г. Киев, 1982 г.), Всесоюзной конференции "Экспериментальные методы исследований деформации напряжений" (г. Киев, 1983 г.), на II Всесоюзном симпозиуме "Прочность материалов и элементов конструкций при сложном напряженном состоянии" (г. Киев, 1985 г.), на Всесоюзной конференции "Трубопроводный гидротранспорт твердых материалов" (г. Москва, 1986 г.), на Всесоюзных конференциях по оптико-геометрическим методам исследований напряжений и деформаций (г. Миасс, 1984, 1987 гг.), на конференции по конструкционной прочности соединений и механике разрушения (г. Красноярск, 1984 г., г. Челябинск, 1985 г.), на тематических семинарах Института проблем прочности АН Украины (г. Киев, 1984, 1991 гг.), на международной конференции "Усталость металлов" (Венгрия, 1994 г.).

Публикации. Основное содержание работы опубликовано в 36 печатных трудах и 23 авторских свидетельствах.

Объем работы. Диссертация изложена на 258 страницах машинописного текста, содержит 147 рисунов и таблиц. Она разбита на 6 глав, введение и общие выводы. Библиография содержит 424 наименования. Имеется приложение с актами внедрения, экономическими расчетами и отзывами.

Содержание работы. Во введении указывается актуальность и важность проблемы повышения надежности, прочности и трещиностойкости стальных труб газонефтепроводов и их сварных соединений, отражены ее научная новизна и практическая ценность, кратко изложено содержание диссертации по главам и представлены сведения о внедрении ее результатов.

В первой главе проведен литературный обзор, из которого следует, что практика эксплуатации и изготовления различных сварных трубопроводов и конструкций, анализ экспериментальных данных и существующей технологической документации позволили выявить влияние поверхностных и сквозных трещин на трещиностойкость при страгивании трещины. Рассмотрена стадия остановки трещины в магистральных газопроводах. Приведен литературный обзор теоретических результатов математической теории пластичности идеально-пластического тела и существующих точных и приближенных решений.

Фундаментальным вопросам надежности, прочности и трещиностойкости сосудов давления, оболочковых конструкций, труб посвящены работы А.Е.Андрейкива, И.П.Анучкина, О.А.Бакши, Л.Л.Березина, П.П.Бородавкина, В.Г.Галеркина, А.Н.Гузя, А.П.Гусенкова, А.Р.Даффи, М.Каннинена, Г.П.Карзова, Л.М.Качанова, В.Л.Колмогорова, А.Я.Красовского, С.А.Куркина, А.А.Лебедева, А.С.Лифшица, Н.А.Махутова, Н.П.Мельникова, Е.И.Морозова, В.А.Осадчука, В.В.Панасюка, В.З.Партона, Б.Е.Патона, Г.Н.Савина, И.П.Саврука, С.В.Серенсена, В.В.Соколовского, С.П.Тимошенко, В.И.Труфякова, Е.Фолиаса, Г.П.Черепанова, Г.С.Шапиро, Ф.Эрдогана, С.Я.Яремы и др.

В разработку и развитие экспериментальных численных методов оценки прочности и трещиностойкости стальных труб, оболочек существенный вклад внесли Н.П.Абовский, Г.С.Васильченко, В.А.Винокуров, Л.В.Енджеевский, В.А.Жилкин, В.И.Кирьян, П.Д.Кошелев, А.Я.Красовский, В.М.Маркочев, Н.А.Махутов, Е.М.Морозов, Б.Е.Патон, И.А.Разумовский и др.

Прикладные задачи расчетов на прочность и трещиностойкость рассматривались в работах М.П.Анучкина, С.М.Бильтцкого, А.С.Болотова, С.А.Голованенко, А.Г.Гумерова, К.И.Зайцева, Б.С.Касаткина, В.И.Кирьяна, З.О.Княжинского, С.Е.Ковчика, Н.С.Когута, С.А.Куркина, В.В.Ларионова, В.П.Ларионова, Д.А.Литвиненко, А.В.Лыглаева, Н.П.Лякишева, Л.С.Мандельберга, Ю.А.Медникова, Б.Л.Пелеха, П.Г.Пимштейна, М.Ратвани, Г.И.Сайдова, И.И.Сергеева, В.И.Труфякова, Г.И.Хажинского, М.В.Шахматова, Ф.Эрдогана и др.

Решение проблемы по созданию расчетной основы прочности и трещиностойкости стальных труб и их сварных соединений невозможно без рассмотрения влияния дефектов. Оценка влияния дефектов на не-

сущую способность неоднородных соединений должна производиться с учетом условий, при которых в мягких швах реализуются вязкие разрушения и в полной мере проявляются эффекты контактного упрочнения швов.

Несмотря на значительный объем исследований, следует отметить, что закономерности поведения механически неоднородных соединений с дефектами сварки в трубах еще недостаточно изучены. В то же время отдельные теоретические и экспериментальные данные свидетельствуют о значительном влиянии степени механической неоднородности на статическую прочность соединений с дефектами. Для оценки работоспособности механически неоднородных сварных соединений (МНСС) назрела необходимость в создании наиболее общего подхода к учету влияния самых различных конструктивно-геометрических параметров. Местоположение дефектов в мягких швах также существенно влияет на несущую способность соединений, что многократно увеличивает число рассматриваемых вариантов расчетных схем и расширяет круг вопросов, связанных с нормированием допускаемой дефектности в неоднородных соединениях.

Во второй главе описаны свойства материалов, геометрия и схема нагружения образцов, оборудование и методические особенности оценки прочности и трещиностойкости исследуемых сталей.

В качестве основных материалов использовались стали: 14Г2АФ-У – для мощных газопроводов ø1420x17,5 мм на давление 7,5 МПа; 14ХГС, 17ГС и 17Г1С-У – самые распространенные низколегированные стали для трубопроводов ø 1020...1220 мм на 5,5 МПа и ВстЗкп – малоуглеродистая сталь для нефте- и водопроводов.

Температурные зависимости механических свойств трубных сталей и их сварных соединений определяли при испытании образцов на статическое и ударное растяжение. Испытывали цилиндрические пятикратные микрообразцы ø 1,2 мм со скоростью деформации $7,3 \times 10^4$ и 200 с^{-1} . Статические испытания проводили на специально разработанной и изготовленной установке. Все образцы вырезали поперек направления прокатки для определения минимальной прочности и трещиностойкости.

Поляризационно-оптические методы определения коэффициентов интенсивности напряжений были усовершенствованы в трудах И.А.Ра-

зумовского для оценки трещиностойкости элементов оболочковых конструкций.

Для решения задач линейной механики разрушения перспективным является метод голографической интерферометрии, который нашел широкое применение в трудах Л.М.Лобанова, Б.Н.Тараторина и И.В.Жаворонка. В данной работе метод основан на использовании картин абсолютных разностей хода (АРХ). Однако отсутствие единого мнения относительно степени влияния угла наклона главных площадок на распределение интерференционных полос в регистрируемых картинах и недостаточно полное применение получаемой информации с картин АРХ при довольно сложной технике эксперимента значительно сдерживают использование этого метода. В работе экспериментально показана независимость полос АРХ от угла наклона главных площадок, что позволяет определить напряжения для всего поля модели по двум картинам N_1 и N_2 с одинаково высокой точностью. Напряжения σ_1 и σ_2 в фотоупругой модели с помощью метода голографической интерферометрии определяли на основании соотношений Фавра. Использование разработанной методики позволило снизить предельную относительную погрешность изменения напряжений с 26 до 12 % при той же точности обработки картин полос ΔN .

Картину АРХ удобнее всего обрабатывать вдоль направления, совпадающего с продольной осью трещины. Для наклонной трещины при двухосном нагружении в работе получены следующие двухпараметрические выражения для определения КИН [26]:

$$K_{11} = \left[\frac{N_{11} + N_{21}}{2(a+b)} - \frac{\omega}{4} \right] \sqrt{2\pi r}; \quad K_{21} = \left[\frac{N_{11} - N_{21}}{2(a-b)} - \omega \cdot \operatorname{ctg} 2\alpha \right] \sqrt{2\pi r}, \quad (2.1)$$

где a и b — оптические постоянные; ω — параметр двухосности нагружения, $\omega = \sigma(1-\nu)\cos 2\alpha$; ν — коэффициент двухосности нагружения; α — угол наклона трещины; σ — номинальное напряжение.

Следует отметить, что выражения (2.1) являются обобщением полученного ранее автором решения [2] при $\omega = 0$ и при $K_2 = 0$ для ортогональной трещины нашей работы [15]. Таким образом, для определения КИН на оси трещины замеряли координаты r_i полос АРХ и затем по формулам (2.1) строили графики $K_{11}(r_i)$, $K_{21}(r_i)$ с последующей экстраполяцией в вершину трещины $r = 0$.

Экспериментальные значения N_{11} , N_{21} принимали на расстоянии больше чем $3r$. В этой области радиус надреза r не оказывает заметного влияния на полученные результаты. Новые экспериментальные значения КИН совпадают с теоретическим значением K_1, K_2 - Либовица и данными, полученными И.А.Разумовским для наклонной трещины. По этим формулам можно произвести оценку хрупкой прочности спиралешовных труб с дефектами по образующей шов. Для ортогональной трещины анализ результатов показывает хорошее совпадение по ранее предложенной автором методике [2] с решением Феддерсена (относительная ошибка не превосходит 2 %) и данными, полученными О.А.Бакши методом фотоупругости. Эти результаты были использованы в диссертации для оценки трещиностойкости трубных сталей и построения К-тариировки образца, имитирующего разрушение трубопроводов.

Экспериментально получены и проанализированы различные методы определения коэффициентов интенсивности напряжений по картинам изохром, изопах и абсолютной разности хода. Установлен диапазон экстраполяции значений K_1, K_2 в котором теоретически полученные распределения напряжений совпадают с напряжениями, экспериментально замеренными на модели с конечным радиусом вершины концентратора [17].

Для использования метода скольжения и оценки несущей способности МНСС необходимо определить предел текучести на сдвиг $\tau_t = K$ основного металла и сварного соединения исследуемых сталей. Известные методы определения $\tau_{0,3}$ при кручении являются трудоемкими и сложными по исполнению. Поэтому для уменьшения трудоемкости и упрощения обработки результатов предложен метод определения τ_t при испытании конического стержня (А.с. 619825, 1522074). Методом малого параметра исследовано НДС конического стержня из упрочняющегося материала. Показано совпадение трех первых приближений с разложением в ряд по параметру овализации точного решения В.В.Соколовского. Это позволило получить формулу для разрушающего момента, касательных напряжений $\tau_{rz}, \tau_{\varphi z}$ и функции напряжений $\Phi(r, z)$:

$$M = \frac{\tau_B 2\pi R_1^3}{\alpha [(1 + \frac{(1+\alpha)(R_2 - R_1)}{R^2(\alpha+2)})^2 + (\frac{R_2 - R_1}{L})^2]^{1/2}};$$

$$\tau_{rz} = \frac{M\alpha r^{\alpha-2}}{2\pi R_1^3 l} [1 + \frac{\lambda}{L} z(1+\alpha)]; \quad (2.2)$$

$$\tau_{\varphi z} = \frac{M\alpha r^{\alpha-3}}{2\pi R_1^3 l} [1 - \frac{\lambda zx}{L} - \frac{(1+\alpha)\lambda^2}{2} (\frac{z^2\alpha}{L^2} + \frac{\alpha(2+\alpha)^{n/2}}{(2+\alpha)L^2})],$$

где $\lambda = \frac{R_2 - R_1}{L}$ – малый безразмерный параметр; L – безразмерная длина стержня; $\alpha = \frac{6\beta+4}{2\beta+1}$ ($3 \leq \alpha \leq 4$); β – показатель степенного закона упрочнения $T = B\Gamma^\beta$; R_1, R_2 – минимальный и максимальный радиусы конического образца.

Для экспериментальной проверки полученных теоретических зависимостей была разработана оригинальная схема испытания на кручение небольших образцов, изготовленных из материала стенки трубы, на базе машины КМ-50-1. Схема испытания позволяет проводить непрерывное нагружение с автоматической записью диаграммы деформирования "крутящий момент M -угол закручивания φ ". Этот метод позволяет определить $\tau_{0,z}$ различных зон сварного соединения. Указанный вид нагружения выбран потому, что, согласно данным О.А.Бакши, при кручении не проявляется эффект контактного упрочнения. Максимальная погрешность при определении предела текучести при кручении равна 2,6%, при определении разрушающего момента – 2,3 %. Сопоставление проводили с цилиндрическими образцами (50 шт.), изготовленными из сталей ВстЗкп, 17Г1С-У по ГОСТ 3565-80.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований температурно-скоростных зависимостей прочностных и деформационных характеристик сталей ВстЗкп, 17Г1С-У, 14Г2АФ-У и их сварных соединений. На основе экспериментальных исследований получены критические значения энергетических характеристик трещиностойкости (J_c и a_p – работа распространения трещины) для различных толщин стенки трубопроводов из указанных выше сталей. Предложен и апробирован метод оценки сопротивления разрушению стальных труб магистральных газонефтепроводов на стадии зарождения трещи-

ны. На основе испытаний лабораторных образцов можно проводить экспертизу, предсказывать разрушающее давление, критическую длину трещины.

Характер изменения механических свойств металла сварных швов в зависимости от температуры идентичен характеру этой связи для основного металла. При динамическом нагружении прочностные характеристики сталей оказались выше статических, деформационные характеристики незначительно увеличиваются или остаются на прежнем уровне, что согласуется с теоретическими представлениями о скоростном упрочнении этих сталей. Анализ результатов стандартных механических испытаний показал, что трубные стали, хотя и обладают близкими прочностными и пластическими свойствами, однако различаются по температуре начала перехода в квазихрупкое состояние. На основе представлений В.Д.Ярошевича и Д.Г.Рывкиной установлены значения параметров, характеризующих термически активируемую пластическую информацию исследованных сталей и их сварных соединений. Эти результаты позволяют прогнозировать значения предела текучести для других условий испытаний трубных сталей. Развитие современной теории разрушения металлов позволило по-новому подойти к трактовке сопротивления микроскопу. Предложены расчетные зависимости по определению этой характеристики разрушения с использованием диаграмм пластичности, модуля упругости, предела текучести и параметра напряженного состояния Лоде-Надаи. Получена новая методика сопротивления микроскопу на основании работ Тельмана, при этом было выявлено, что R_{mc} является функцией ресурса пластичности λ_p , которая определяется по диаграммам пластичности в трактовке В.Л.Колмогорова. При этом ресурс пластичности широко варьируется от жесткости напряженного состояния. Поэтому для более точного определения показателя жесткости напряженного состояния был проведен анализ напряженного состояния в шейке и надрезах цилиндрического и плоского образцов. Для экспериментального определения значений сопротивления микроскопу исследованных сталей использовали три известных метода. Эти результаты хорошо согласуются с данными А.Я.Красовского и Л.А.Копельмана.

Для построения точной диаграммы деформирования, ресурса

0330814

пластичности от жесткости напряженного состояния, сопротивления микроскопу материалов и оценки несущей способности трубопроводов получен универсальный метод для вычисления осевого напряжения в минимальном сечении шейки растянутого образца на основе зависимости формы линий главных осевых напряжений (ЛОГН) от контура шейки. Предложена новая формула для вычисления радиуса кривизны ЛОГН в минимальном сечении образца:

$$r(x) = \frac{x_0 \left[\beta \left(\frac{x^\alpha}{x_0^\alpha} - 1 \right) + 1 \right]^2}{x} r_0, \quad (3.1)$$

где $-1 \leq \alpha \leq 1$, $-1 \leq \beta \leq 1$ – параметры ЛОГН, за счет которых напряжения являются ограниченными; x_0, x – точки контура шейки и ЛОГН, соответственно расположенные на минимальном сечении шейки; r_0 – радиус кривизны контура шейки.

При $\alpha = 0$ получаем известный результат Н.Н.Давиденкова и Н.И.Спиридоновой для цилиндрического образца. Для плоского образца при $\alpha = 0$ получаем также известный результат П.Бриджмена. На основе предложенного метода получены выражения предельного усилия и средних осевых напряжений при переменных параметрах ЛОГН α , β цилиндрического и плоского образцов. Исследование напряженного состояния при растяжении плоского или цилиндрического образцов приводит к необходимости определять радиус кривизны r для ЛОГН как функцию расстояния x от этих линий до оси образца в минимальном сечении шейки. Можно использовать конформные отображения для преобразования простой координатной сетки (декартовой или полярной) в сетку рассматриваемых продольных и поперечных линий главных напряжений. Дробно-линейная функция переводит полярную координатную сетку в сетку дуг окружностей, ортогональных семейству окружностей, проходящих через фиксированную точку, лежащую вне образца, и пересекающих ось образца под прямым углом. Согласно этому подходу, получаем известные выражения П.Бриджмена для $r = \frac{x_0^2 + 2x_0 r_0 - x^2}{2x}$. Функция Жуковского переводит полярную сетку в сетку, состоящую из гипербол – ЛОГН и эллипсов – линий поперечных главных напряжений, имеющих общие фокусы, при этом лучи переходят в гиперболы, а окружности – в эллипсы. На основе данного конформ-

ногого отображения для образца с эллиптическим поперечным сечением получены новые формулы для радиуса кривизны r ЛОГИ и средних осевых напряжений:

$$r = \frac{x_0^2 + x_0 r_0 - x^2}{x}; \quad \sigma_{cp} = \sigma_1 \cdot \left(1 + \frac{1}{2} \ln \frac{x_0^2 + x_0 r_0 - x^2}{x_0 r_0}\right). \quad (3.2)$$

Определены компоненты тензора напряжений при трехосном состоянии, что явилось необходимым для определения ресурса пластичности и далее – сопротивления микроскопу. Таким образом, решена третья задача диссертации.

В четвертой главе рассмотрено напряженное состояние в условиях плоской деформации идеально-пластического тела. При решении задачи Прандтля для различных случаев нагружения данная работа является продолжением исследований В.Д.Аннина, М.А.Задояна, Д.Д.Ивлева, Л.М.Качанова, А.И.Кузнецова, С.Г.Михлина, А.Надаи, В.Ольшака, С.И.Сенашова, В.В.Соколовского, А.Д.Томленова, Р.Хилла, С.А. Христиановича и др.

Решение задачи Прандтля о сжатии пластического слоя основано на предположении, что касательные напряжения τ_{xy} в слое не зависят от координаты x , то есть постоянны по ширине. В действительности предположение удовлетворяется для точек слоя, не находящихся в его центральной зоне. На основе экспериментальных исследований заменим граничные условия Л.Прандтля более общим $\tau_{xy}^k = -\alpha \cdot K$ ($0 < \alpha \leq 1$), α – параметр. Для компонент тензора напряжений и предельного сжимающего усилия получено приближенное решение [19], обобщающие формулы Л.Прандтля, на основе которого по-новому решена проблема механически неоднородных соединений (МНС). Предельную несущую способность механически неоднородных соединений при растяжении (сжатии) определяют следующие конструктивно-геометрические параметры: степень механической неоднородности (отношение пределов прочности твердого металла к мягкому $K_b = (\sigma_b^T / \sigma_b^M)$, относительные геометрические размеры мягких прослоек ($\alpha = h/B$ – относительная толщина), угол φ наклона контактных границ мягкого (M) и твердого (T) металлов по отношению к вектору действующего усилия P , двухосность нагружения конструкции и т. д. Определенные количественные закономерности влияния указанных параметров на предельную

несущую способность МНС составляют основу для их рационального конструктивно-технологического проектирования.

На основе расчетов были определены базовые соотношения, устанавливающие взаимосвязь контактных касательных напряжений с основными конструктивно-геометрическими параметрами соединений (K_B , φ , α) в условиях плоской деформации при двухосном нагружении. По этим соотношениям разработан общий подход к оценке напряженного состояния и предельной несущей способности МНС. Для компонент тензора напряжений и среднего напряжения при значительной несимметричной механической неоднородности ($K_B > 2$) при двухосном нагружении (Q - горизонтальная нагрузка) получены новые выражения [24]:

$$\begin{aligned}\tau_{xy} &= \frac{\alpha K_B}{h} \operatorname{th} \eta \cdot y; \quad \sigma_x = -\frac{K_B}{2} \ln \operatorname{ch} \eta + \frac{\alpha^2 K_B}{h^2} y^2 + C_1; \\ \sigma_y &= -\frac{\alpha^2 K_B}{h^2} \cdot \frac{y^2}{\operatorname{ch}^2 \eta} - \frac{K_B}{2} \ln \operatorname{ch} \eta + 2K_B + C_1; \\ C_1 &= K_B \left(\frac{Q}{2h} + \frac{1}{2} \ln \operatorname{ch} \frac{2\alpha}{x} - \frac{\alpha^2}{3} \right); \\ \sigma_{cp} &= K_B \frac{x}{2(x-\gamma)} \left[-\alpha \cdot \left(\alpha + \frac{1}{4\alpha} \right) + 4 - \frac{2\alpha^2}{3} + \frac{\alpha}{x} \right],\end{aligned}\quad (4.2)$$

где

$$\alpha_{0,25} = 1 - \frac{1}{2K_B} - \frac{1}{2K_B}; \quad 0 < \alpha < 0,25; \quad \eta = \frac{2\alpha}{h};$$
$$\alpha = \frac{4}{3} \alpha_{0,25} (K_B)(1-\alpha); \quad 0,25 \leq \alpha \leq 1.$$

Влияние малой степени ($K_B < 2$) механической неоднородности на прочность стыковых сварных соединений выражается другими новыми формулами [25]. Учет изменения касательных напряжений как функции двух координат, в отличие от известных решений О.А.Бакши, М.В.Шахматова, позволил уточнить распределение нормальных напряжений в прослойке, средние параллельные напряжения и несущую способность МНСС. Таким образом, теоретический анализ показывает, что при больших ($K_B > 2$) зависимости касательного напряжения τ_{xy}^K на контактной поверхности от координаты x , направленной по ширине полосы, является выпуклой вверх функцией гиперболического тангенса $\operatorname{th} x$. При малой ($K_B < 2$) степени механической неоднородности установлено, что τ_{xy}^K является вогнутой функцией тригонометрического тангенса $\operatorname{tg} x$. Этот вывод подтвержден экспериментальными

данными, приведенными в работе, и расчетами МКЭ. При анализе напряженного состояния МНС при двухосном нагружении использовали данные М.В.Шахматова, на основе которых касательные напряжения τ_{xy} на контактных поверхностях зависят от показателя двухосности нагружения $n = \frac{\sigma_t}{\sigma_1}$ (σ_t, σ_1 – окружные и продольные напряжения), который может изменяться в широких пределах ($0 < n < 2$). Исходя из этого, двухосность нагружения в рамках предложенного решения (4.2) можно учитывать путем корректировки предела текучести на сдвиг K_M . Для этого в полученные зависимости (4.2) необходимо вместо α подставлять величину, которая подсчитывается по формуле

$$\frac{2}{3} \alpha \cdot \sqrt{(n+1)(2-n)}.$$

На рис.1 показаны средние напряжения кольцевой мягкой прослойки сосуда давления при $n = 0,5$; $K = 1,94$, вычисленной по формуле (4.2) и экспериментальным данным О.А.Бакши.

Задача Гурса о растяжении (сжатии) мягкой наклонной прослойки решена на основе математической теории идеальной пластичности. Решение краевой задачи приводится к известному величайшему дифференциальному уравнению в частных производных, приведенному в книге академика Г.С.Писаренко, Н.С.Можарского¹. На основе гипотезы о том, что в мягкой прослойке касательные напряжения τ_{xy} не изменяются по длине прослойки, а зависят лишь от расстояния до контактной поверхности, получено новое решение третьей задачи диссертации:

$$\begin{aligned}\tau_{xy} &= K \cdot \left[\frac{\alpha \cdot \cos 2\varphi}{h} t + \sqrt{1 - \frac{\alpha^2 t^2}{h^2}} \cdot \sin 2\varphi \right]; \\ \sigma_x &= K \cdot \left[-\frac{\alpha \cdot x}{h} \cos 2\varphi - \frac{\alpha \cdot y}{h} (2 + \cos 2\varphi) \cdot \operatorname{tg} \varphi + 2g \cdot \cos^2 \varphi + C \right]; \\ \sigma_y &= K \cdot \left[\frac{\alpha \cdot y}{h} \cos 2\varphi \cdot \operatorname{tg} \varphi - \frac{\alpha \cdot x}{h} (2 - \cos 2\varphi) + 2g \cdot \sin^2 \varphi + C \right]; \quad (4.3) \\ \sigma_{cp} &= \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_B^M \cdot \left[\frac{\alpha}{4\alpha \cdot \cos^2 \varphi} + \frac{\operatorname{tg} \varphi}{2} (\sin 2\varphi \cdot \sqrt{1 - \frac{\alpha^2}{h^2}} + \alpha \cdot \cos 2\varphi) + \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{2} \cos \varphi \cdot \left(\frac{\arcsin \alpha}{\alpha} + \sqrt{1 - \alpha^2} \right) \right],\end{aligned}$$

где $\alpha = \frac{\beta}{\cos 2\varphi}$; $t = y - x \cdot \operatorname{tg} \varphi$; $g = \sqrt{1 - \frac{\alpha^2 t^2}{h^2}}$.

¹ Писаренко Г.С., Можаровский Н.С.

Уравнения и краевые задачи теории пластичности и ползучести. Справочное пособие.– Киев: Наук.думка.– 1981.– 496 с.

При замене знака параметра α на минус впервые получено обобщение задачи Л.Прандтля при сжатии шероховатыми плитами наклонного пластического слоя. При $\varphi = 0$ и $\alpha = 1$ получаем из (4.3) классическое решение Л.М.Качанова для средних предельных напряжений $\sigma_{cp} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma^M \left(\frac{\pi}{4} + \frac{1}{4\bar{\alpha}} \right)$ ортогонального сварного соединения. Заметим, что при $\varphi = 0$ и $\alpha = -1$ получим решение Л.Прандтля для ортогонального пластического слоя и известное предельное сжимающее усилие P . С увеличением φ несущая способность прослойки снижается вплоть до $\varphi = \frac{\pi}{4}$. При $\varphi = 0$ несущая способность соединения соответствует прочности ортогональной мягкой прослойки в условиях плоской деформации. Особенно резкое падение σ происходит в области малых углов φ . Чем меньше относительная толщина прослойки $\bar{\alpha}$, тем прочность чувствительнее к разупрочняющему действию сдвигающей силы. С увеличением угла φ меньше влияет на прочность прослойки относительная толщина $\bar{\alpha}$. Сопоставление новых теоретических формул с экспериментальными данными канд.техн.наук Ю.И.Анисимова показало хорошее соответствие полученных результатов. Полученные результаты для наклонной мягкой прослойки являются полезными при оценке несущей способности спиралешовных труб.

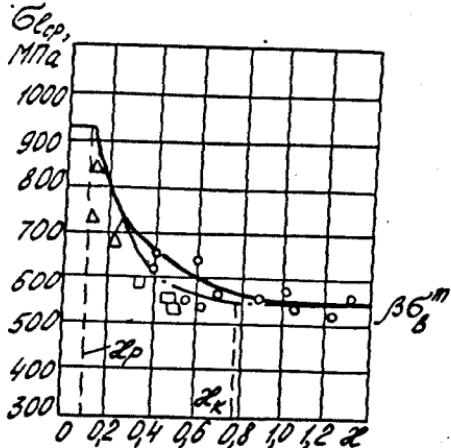
В пятой главе установлены закономерности влияния дефектов на контактное упрочнение мягких и твердых стыковых швов. Практические расчеты сварных соединений с использованием соотношений механики разрушения рассматривались в работах О.А.Бакши, О.В.Болотина, В.Н.Волченко, В.С.Гиренко, А.Б.Злочевского, Г.П.Карзова, А.А.Копельмана, В.И.Кирьяна, В.П.Ларионова, В.Ф.Лукьяннова, Н.А.Махутова, В.И.Махненко, В.В.Москвичева, В.В.Напрасникова, А.А.Попова, В.И.Труфякова, М.В.Шахматова и др. Развитие исследований в рамках данного направления при выполнении настоящей работы связано с совершенствованием расчетной основы для оценки влияния механической неоднородности, основных конструктивно-геометрических параметров, типа и размеров дефектов на несущую способность сварных соединений на основе теории пластичности.

На базе теоретического и экспериментального анализа установлено, что к множеству факторов, определяющих статическую прочность МНС (см.предыдущую главу), необходимо добавить тип дефекта (непровар, несплавление, трещина), его геометрические размеры и

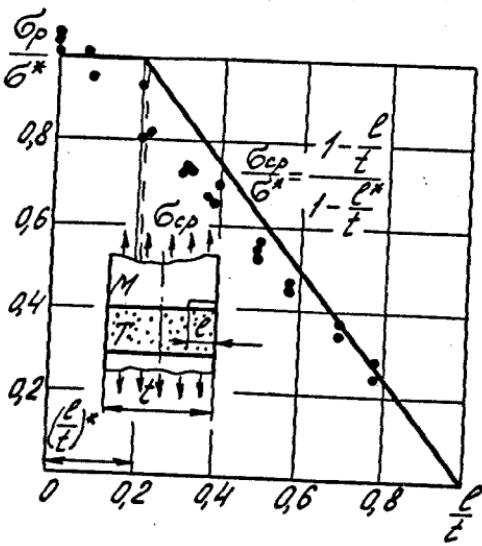
местоположение в мягком и твердом стыковых швах. Разработанный алгоритм позволяет рассматривать множество расчётных вариантов МНС с дефектами сварки, однако наглядно закономерности их влияния на трещиностойкость соединений можно проследить на примере прямоугольной мягкой прослойки (рис.2). При нагружении соединений с мягкими стыковыми швами вблизи вершины дефектов наблюдается разветвление пластического течения. На основе изученных особенностей и подходов, предложенных в предыдущей главе, были получены расчетные зависимости для оценки локальной прочности и трещиностойкости реальных МНС с дефектами сварки по схеме СТ-М-Т (СТ – самый твердый сварной шов, М – зона термического влияния, Т – основной металл). Для соединений из пластин (в условиях плоской деформации) формулы для определения средних предельных напряжений и допускаемая глубина дефектов для несимметричной и симметричной механической неоднородности при статическом растяжении приведены в табл.1 на основе полученного решения. Предложенные расчетные зависимости и методики проверены экспериментально на моделирующих данные соединения образцах с применением метода муаровых полос на основе известных подходов В.А.Жилкина.

Экспериментальную проверку полученных зависимостей проводили в ТЭСЦ N6ЧТПЗ на образцах размером 250x25x12 мм, вырезанных из разрушенных труб стали 17Г1С ø 1220x12 мм ЧТПЗ и ø 1020x11 мм стали 14ХГС Новомосковского трубного завода с нефтепровода "Усть-Балык-Омск". Сварной шов был выполнен по серийной технологии, например, на ЧТПЗ проволокой СВО8ХМ ГОСТ 2246-70 ø 4 мм под слоем флюса АН-60 ГОСТ 9087-81. Результаты экспериментов по трещиностойкости согласуются с предложенными расчетными формулами и литературными данными*. Для сварных соединений труб большого диаметра существует диапазон допустимых размеров поверхностных дефектов, равный 20 % толщины стенки, не снижающих прочность относительно бездефектного соединения (рис.3). Кратковременные заводские гидравлические испытания отдельных труб не позволяют выявить целый ряд дефектов, которые, развиваясь в период эксплуатации,

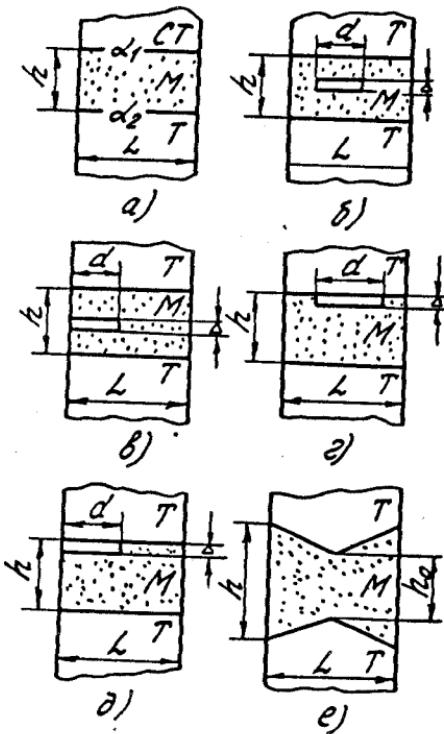
* Трещиностойкость сталей магистральных трубопроводов /Красовский А.Я., Красико В.Н.; Отв.ред. Трощенко В.Т.; АН УССР Ин-т проблем прочности.– Киев: Наук.думка, 1990.– 176 с.



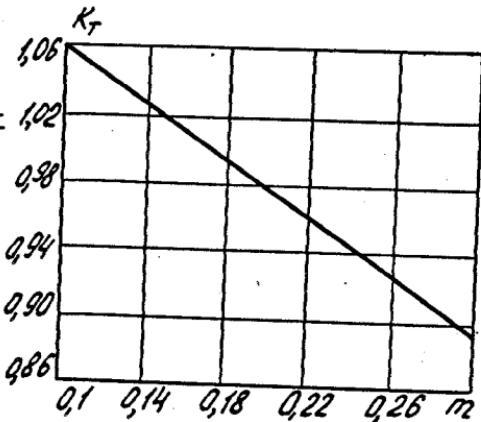
Puc. 1



Puc. 2



Puc. 3



Puc. 4

могут привести к разрушению трубопровода. Поэтому предпусковые трассовые гидравлические испытания повышенным внутренним давлением при сооружении магистральных нефтепроводов обязательны. Они позволяют, наряду с проверкой прочности и герметичности всего трубопровода, выявить дефекты труб, возникшие при транспортировке и производстве сварочно-монтажных и изоляционно-укладочных работ.

При сравнительном анализе несущей способности сварных соединений, а также на основе приведенных экспериментов было установлено, что для соединений СТ-М-Т с мягкой прослойкой граница металлов СТ и М является наиболее опасным местоположением дефекта. Этот вывод, имеющий принципиальное значение, объясняет причины 90 % разрушений труб большого диаметра в заводских и трассовых условиях. В настоящей работе проведена экспертиза и разработаны рекомендации по выбору параметров режима гидравлических испытаний нефтепровода $\varnothing 1020 \times 11$ мм из стали 14ХГС "Усть-Балык - Омск" (УБО) на участке 266-505 км, построенного в 1967 г. Эксперименты были проведены в ТЭСЦ № 6 и ЦЗЛ ЧТПЗ. Степень механической неоднородности $K_B = 1,17$. Твердость шва немного выше твердости основного металла, а в зоне перегрева резко увеличивается до 227 HV по шкале Викерса. Испытания по трещиностойкости показали, что для нефтепровода УБО существует критическая глубина поверхностного дефекта по линии сплавления $l_{kp} = 1,8$ мм, а по центру шва $l_{kp} = 3$ мм, поэтому при равных длинах трещин разрушение произойдет по линии сплавления. Это согласуется с разработанной теорией и объясняется обнаруженной механической неоднородностью, очень высокими коэффициентами концентрации напряжений и деформаций, появлением закалочных структур, низкой пластичностью. После проведения гидравлических испытаний и аварийно-восстановительного ремонта резко снизилось количество отказов, разлив нефти, замазученность полей.

В шестой главе рассмотрена задача определения несущей способности нефтепровода с дефектами с учетом изменения радиуса R, толщины t, деформационного упрочнения и сталей и двухосности нагрузления $n = \frac{\sigma_1}{\sigma_2}$. Обосновано применение критерия разрушения, связанного с потерей трубой пластической устойчивости. Проведено уточнение данного критерия с учетом двухосности нагрузления трубы

и параметров продольной поверхностной трещины глубиной l и длиной L . Предложены новые аналитические зависимости для инженерных расчетов прочности тонкостенных цилиндрических сосудов давления [32]:

$$P_p = K_t \frac{\sigma_v t_o}{R_o}; \quad K_t = K_p \cdot K_d; \quad K_d = \frac{t_o - l}{t_o - (L/M)}; \quad M = 1 + 1,61 \frac{L^{1,65}}{4R_o t_o};$$

$$K_p = \left(\frac{2}{2-n} \right)^m \cdot (1-n+n)^{\frac{m-1}{2}} \cdot \exp\left(-\frac{1+n}{2-n} m\right); \quad n = \frac{S}{2} + \sqrt{\frac{S^2}{4} - \Psi}; \quad (6.1)$$

$$S = 1 - \frac{1-K_d}{1-K_N^2}; \quad \Psi = 1 - \frac{1-(K_d^2/4)}{1-K_N^2}; \quad K = f_N \left(\frac{m}{I\varepsilon_1} \right)^m = \frac{N}{2\pi R_o \sigma_1 t_o}.$$

Для этих формул проведено уточнение коэффициента влияния размеров K_d поверхностной трещины. При отсутствии дефектов в трубопроводе ($K_d = 1$) и осевых нагрузок ($K_N = 0$), $S = 1$, $\Psi = -\frac{1}{4}$ и, следовательно, по формуле (6.1) $n = 0,5$. Из приведенного анализа нового теоретического решения с экспериментальными результатами следует, что котельная формула $P = \frac{\sigma_v t_o}{R_o}$ завышает разрушающее давление при наличии наиболее часто встречаемых поверхностных дефектов средних размеров ($l = 0,3t$; $L = 0,5R$) на 25...40% (рис.4). В результате численных расчетов (табл.2) показана высокая точность формул (6.1). Даны практические примеры расчета усилия гидравлического пресса расширителя при экспандировании труб большого диаметра и при проведении экспертизы участка нефтепровода "Усть-Балык-Омск" $\varnothing 1020 \times 11$ мм из стали 14ХГС по определению несущей способности, рабочего давления и режимов гидравлических переиспытаний повышенным давлением для выявления дефектов в нем и для достижения цели диссертации. Для оценки несущей способности стальных труб с поверхностными дефектами в сварном шве необходимо в формуле (6.1) вместо времени сопротивления σ_v основного металла поставить среднее предельное напряжение σ_{cr} из табл.1 пятой главы.

В диссертации проведен анализ статистических данных по справкам ОТК ЧПЗ разрушенных труб на пресс-расширителе ТЭСЦ N 6 за 1977 г. и 6 мес. 1978 г. Для сварных труб $\varnothing 530, 720$ и 820 мм наиболее слабой по числу разрушений оказался основной металл (OM), затем центр сварного шва (ЦШ). Для труб $\varnothing 1220$ мм число

Таблица 1

Сравнительные средние предельные напряжения и диапазон допустимых размеров дефектов

| Номер рисунка | Относительное среднее предельное напряжение $\sigma_{cp} / \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_b^m \right)$ | Условия применения | Диапазон допустимых размеров дефектов ($\frac{l}{E}$) |
|---------------|--|---|--|
| Рис.3а | $\frac{\alpha^2+0,2}{\alpha+\alpha \cdot \alpha_2} - \frac{\alpha_1 \cdot \alpha_2}{\alpha_2} + 2 - \frac{1}{3} (\alpha_1^2 - \alpha_1 \cdot \alpha_2 + \alpha_2^2)$ | - | - |
| Рис.3б | $\frac{\alpha}{2\alpha} \left(1 - \frac{d}{L}\right)^2 + \left(1 - \frac{\alpha^2}{6}\right) \left(1 - \frac{d}{L}\right) - \frac{\alpha \alpha_2}{4} - \frac{\alpha}{20L}$ | $1 + \frac{2\alpha}{\alpha} - \frac{\alpha \alpha_2}{3} - \frac{2\alpha}{\alpha}$ | $\sqrt{\frac{\alpha^4}{36} - \frac{\alpha^2}{12} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{\alpha}{2} + \frac{21}{20}}$ |
| Рис.3в | $\frac{\alpha}{2\alpha} \left(1 - \frac{d}{L}\right)^2 + \left(1 - \frac{\alpha^2}{6}\right) \left(1 - \frac{d}{L}\right) - \frac{\alpha \alpha_2}{8} - \frac{\alpha}{40L}$ | $1 + \frac{\alpha}{2} - \frac{2\alpha}{6} - \frac{\alpha}{\alpha}$ | $\sqrt{\frac{\alpha^4}{36} - \frac{\alpha^2}{12} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{\alpha}{2} + \frac{21}{20}}$ |
| Рис.3г | $\frac{\alpha}{4\alpha} \left(1 - \frac{d}{L}\right)^2 + \left(1 + \frac{25}{48} \alpha^2\right) \left(1 - \frac{d}{L}\right) - \frac{11}{16} \alpha^2 - \frac{\alpha \alpha_2}{4} - \frac{\alpha}{20L}$ | $1 + \frac{2\alpha}{\alpha} - \frac{25}{48} \alpha \alpha_2 - \frac{2\alpha}{\alpha}$ | $\sqrt{\frac{\alpha^4}{4} + \frac{11\alpha^3}{16\alpha} + \frac{31}{24} \alpha^2 - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{\alpha}{2} + \frac{21}{20}}$ |
| Рис.3д | $\frac{\alpha}{2\alpha} \left(1 - \frac{d}{L}\right)^2 + \left(1 + \frac{25}{48} \alpha^2\right) \left(1 - \frac{d}{L}\right) - \frac{11}{16} \alpha^2 - \frac{\alpha \alpha_2}{8} - \frac{\alpha}{20L}$ | $1 + \frac{2\alpha}{\alpha} - \frac{25\alpha \alpha_2}{48} - \frac{2\alpha}{\alpha}$ | $\sqrt{\frac{\alpha^4}{4} + \frac{11}{8} \frac{\alpha^3}{2} + \frac{31}{24} \alpha^2 - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{\alpha}{2} + \frac{21}{20}}$ |
| Рис.3е | $1 + \frac{\alpha}{4\alpha_2} - \frac{\alpha}{4} - \frac{\alpha}{20\alpha} - \frac{1}{6} \alpha^2 + \frac{\alpha^2 (1-\nu) (5+3\nu)}{16}$ | $2\alpha \sinh$ | - |

$$\nu = \frac{h_o}{h}$$

Т а б л и ц а 2

Сравнение точности формул [32] по экспериментальным данным, полученным для труб $\phi 762 \times 9,5$ мм, $t = 0,35$

| Параметры труб | | Разрушающее давление Р, МПа | Разрушающее давление (МПа) и относительная погрешность (%), рассчитанные по формулам | | | | | |
|---|-------------|-----------------------------|--|--|-------------------------------------|--------------------|--|----------------|
| Дефект | | | ГОСТ 3845-65 | Свенссон с поправкой Зайн-нуллина Р.С. | (6.1) с поправкой Зайн-нуллина Р.С. | (6.1) наша формула | ГОСТ 3845-65 с поправкой ин-та Баттер-ля (США) | |
| глубина l, мм | длина L, мм | | | | | | | |
| 3,7 | 360 | 586 | 0,930 | 1,462 47,2 | 1,029 10,6 | 0,952 2,3 | 0,904 -2,8 | 0,916 -1,5 |
| 3,7 | 212 | 594 | 1,020 | 1,480 45,1 | 0,938 -8,0 | 0,862 -15,5 | 1,010 -1,0 | 0,966 -5,3 |
| 3,7 | 73 | 586 | 1,220 | 1,462 19,8 | 0,872 -28,5 | 0,790 -35,3 | 1,173 -3,8 | 1,182 -3,1 |
| 5,7 | 358 | 574 | 0,623 | 1,432 129,9 | 0,599 -3,8 | 0,563 -9,6 | 0,635 2,0 | 0,596 -4,3 |
| 5,7 | 207 | 574 | 0,718 | 1,432 99,5 | 0,566 -21,2 | 0,528 -26,5 | 0,765 6,6 | 0,639 -10,9 |
| 5,7 | 71 | 541 | 1,080 | 1,350 25,0 | 0,521 -51,8 | 0,475 -56,0 | 1,002 -7,2 | 0,877 -18,8 |
| 7,7 | 357 | 565 | 0,273 | 1,408 415,7 | 0,254 -7,0 | 0,242 -11,2 | 0,323 18,3 | 0,282 3,2 |
| 7,7 | 210 | 572 | 0,403 | 1,425 253,7 | 0,252 -37,4 | 0,240 -40,5 | 0,435 8,0 | 0,313 -22,3 |
| 7,7 | 72 | 565 | 0,975 | 1,408 44,4 | 0,253 -74,1 | 0,235 -75,9 | 0,826 -15,2 | 0,549 -43,7 |
| Средняя относ.ошибка,% | | | 121,1 | -24,6 | -29,8 | 0,5 | -11,9 | |
| Средняя относ.ошибка по модулю,% | | | 121,1 | 26,9 | 30,3 | 7,2 | 12,6 | |

разрушений по ОМ и ЦШ практически одинаково. Меньше всего разрушилось труб по оклошовной зоне (ОЗ) всех диаметров. В работе вскрыты причины разрушения зон сварного соединения труб большого диаметра. Одной из основных причин разрушений труб по сварному шву является овальность трубы до экспандирования. В процессе взаимодействия конуса экспандера с трубой и роста гидравлического давления происходит формоизменение трубы от овальной к круглой. Характерным для этой стадии является то, что нагружение идет по схеме с заданной деформацией. Сварной шов, обладая повышенными прочностными характеристиками и пониженной пластичностью, на этой стадии вынужден деформироваться и, если запаса его пластичности недостаточно для перехода трубы из овальной в круглую, происходит разрушение. В оклошовной зоне сварных соединений газонефтепроводных труб, как показывают непосредственные замеры, имеется участок пониженной твердости, а следовательно, и прочности. Наличие мягкой прослойки с пониженными механическими свойствами и средними относительными размерами $\alpha = 0,3 \dots 0,5$ приводит к разрушению труб по оклошовной зоне.

Установлено, что величина пластической деформации металла шва на исследованных образцах стали 17Г1С-У \varnothing 530 и 720 мм колеблется в диапазоне 7,65...13,9 %, в оклошовной зоне - 6,25...23%. Величины деформаций, вызываемые раздачей кольца, соизмеримы с запасом пластичности шва и оклошовной зоны. Этим можно объяснить частые разрушения труб по ОЗ на экспандерах и трассе, поскольку в процессе раздачи трубы металл ОЗ практически выбирает свой запас пластичности. Из проведенного исследования следует, что трубы большого диаметра ЧТПЗ удовлетворяют заводским техническим условиям и обладают удовлетворительным качеством и надежностью. Об этом свидетельствуют также низкий (2-2,4) процент перевода в пониженное качество сварных труб и статистика отказов на трассах.

В работе впервые рассмотрено НДС двухслойных сосудов давления при различных реологических свойствах материала: упругого, упругого с ограниченной сжимаемостью, упруго-идеально-пластического и упруго-хрупкого с ограниченной сжимаемостью, жестко-идеально-пластического, ползучего. Для цилиндра и сферы задача решена в общем виде, когда на стыке двух слоев и внешней поверх-

ности сосудов приложено постоянное давление σ , а также соответственно при гипотезе Винклера для среды и стыка. Для двухслойного сосуда, изготовленного из разных упругих материалов (ν_1, ν_2, G_1, G_2), нагруженного внутренним давлением P , и на стыке двух слоев -постоянным давлением σ , на наружном радиусе b , когда грунт упруго сопротивляется по гипотезе Винклера $u_r(b) = KI$, получим следующие формулы:

$$\sigma_r = c_1 - c_2 \frac{a^{n+1}}{r^{n+1}}; \quad \sigma_\theta = c_1 + c_2 \frac{a^{n+1}}{nr^{n+1}}; \quad (6.2)$$

$$c_1^B = \frac{\sigma c + pa}{c^{n+1} - a^{n+1}}; \quad c_2^B = \frac{\sigma + p}{c^{n+1} - a^{n+1}} c^{n+1}$$

$$\sigma = \frac{Pa^{n+1} \cdot (n+1)}{nG_1 \left[\frac{(1-2\nu_1)\alpha c^{n+1}}{G_1} - \frac{a^{n+1}}{nG_1} \right]} -$$

$$-\frac{(c^{n+1}a^{n+1})(1-2\nu_2)\alpha c^{n+1}(1-\frac{bK}{2G_1 n}) + \frac{1}{n}(1+\frac{bK}{2G_2}(1-2\nu_2)\alpha b^{n+1})}{G_2 D}; \quad (6.2)$$

$$c_1^H = \frac{\sigma c^{n+1} \left(1 - \frac{bK}{2G_2 n}\right)}{b^{n+1} - c^{n+1} + \frac{bK}{2G_2} D}; \quad c_2^H = \frac{\sigma [1 + \frac{bK}{2G_2} (1-2\nu_2)\alpha] b^{n+1}}{D}, \quad (6.3)$$

$$\text{где } D = \frac{bK}{2\sigma_2} [(1-2\nu_2)\alpha b^{n+1} + \frac{C^{n+1}}{n}].$$

Для цилиндра $n=1$; для сферы $n=2$; $\alpha=1$ при $n=1$; $\alpha=\frac{1}{1+\nu}$ при $n=2$; a, c, b - внутренний, промежуточный и наружный радиусы соответственно. Для внутреннего сосуда при $a \leq r \leq c$ в формулы (6.2) подставляем c_1^B и c_2^B , а для наружного сосуда при $c \leq r \leq b$ подставляем c_1^H и c_2^H . В обоих случаях постоянное межслойное напряжение σ имеем из (6.3). Для упругого материала с ограниченной сжимаемостью при предельном значении δ объемной деформации для двухслойной трубы получены радиальное σ_r , тангенциальное σ_θ и промежуточное σ напряжения:

$$\sigma_r = \frac{\sigma - K\delta b(d^{-(n+1)} - r^{-(n+1)}) - \gamma}{d^{-(n+1)} - b^{-(n+1)} + 0,5Kn^{-1}G_2^{-1}b^{-n}}; \quad (6.4)$$

$$\sigma_\theta = \frac{\sigma - K\delta b(d^{-(n+1)} + n^{-1}r^{-(n+1)}) - \sigma}{d^{-(n+1)} - b^{-(n+1)} + 0,5Kn^{-1}G_2^{-1}b^{-n}};$$

$$\sigma = \frac{-G_1 K \delta \beta (a^{-(n+1)} - d^{-(n+1)} - G_2 P (d^{-(n+1)} - b^{-(n+1)} + 0,5Kn^{-1}G_2^{-1}b^{-n})}{G_2 (d^{-(n+1)} - b^{-(n+1)} + 0,5Kn^{-1}G_2^{-1}b^{-n}) - G_1 (a^{-(n+1)} - d^{-(n+1)})}; \\ d \leq r \leq b;$$

$$\sigma_r = 2Gn C (a^{-(n+1)} - r^{-(n+1)}) - p; \quad C = \frac{\sigma + p}{2Gn(a^{-(n+1)} - d^{-(n+1)})};$$

$$\sigma_\theta = \sigma_r + 2Gc \frac{n+1}{r^{n+1}}, \quad a \leq r \leq d. \quad (6.5)$$

Для других реологических случаев в диссертации приведены полученные выражения [22; 23]. Теоретический анализ для однослоиного сосуда совпадает с результатами Г.С.Шапиро, О.Е.Анджаларидзе, при отсутствии внешнего постоянного давления $q = 0$ дает классические формулы Ляме, а при гипотезе Винклера получаем решение академика В.Г.Галеркина. В общем случае получены формулы для упруго-идеально-пластического материала с ограниченной сжимаемостью δ , в частном случае $\delta = 0$ имеем случай несжимаемого материала. В случае идеально-пластического материала определены пластическая граница и внутреннее давление, начиная с которого происходит переход в пластическое состояние в двухслойном сосуде. Для всех рассматриваемых реологических случаев получены формулы для радиальных и тангенциальных напряжений с учетом температурных напряжений.

Ремонт магистральных трубопроводов с заменой отдельных участков (наряду со значительным ущербом от простоя) требует больших капитальных затрат в связи с невосполнимыми потерями нефтепродуктов, наносит ощутимый вред окружающей среде. В связи с необходимостью повышения несущей способности действующих магистральных нефтепроводов с дефектами совместно с УралНИТИ проведены исследования по разработке новой технологии ремонта нефтепровода в трассовых условиях. Наиболее перспективным направлением по дальнейшему увеличению работоспособности трубопроводов является бандажирование – усиление стенки трубопровода стальной проволокой, лентой,

стеклоровингом и производство двухслойных труб. Основная идея бандажирования трубопровода следующая – с помощью высокопрочной предварительно растянутой обмотки перераспределить усилия в конструкции таким образом, чтобы разгрузить трубу-основу (использовать более тонкий слой) и довести эффективность ее работы до уровня сферы за счет выравнивания продольных и кольцевых напряжений в трубе. Это повышает прочность и надежность нефтепровода почти в два раза. Проволочный бандаж является дешевым, простым, экспериментально проверенным гасителем хрупких и вязких разрушений газопроводов. Получены уравнения и приближенная аналитическая формула для оценки параметра напряженного состояния трубы от ее деформации и предварительного натяга. Выведены выражения для экстремального значения внутреннего давления и аналитическое соотношение для определения предельной деформации при наклонной и попечечной намотке. Отличие наклонной намотки от прямой состоит в том, что она способна воспринимать не только кольцевые, но и продольные нагрузки, возникающие в трубе. Углом наклона γ намотки можно регулировать отношение нагрузок, воспринимаемых от трубы-основы в кольцевом и продольном направлениях. Эта особенность наклонной намотки является полезной при изготовлении труб, цистерн, баллонов, сосудов и т.д. Даны соотношения, позволяющие найти разрушающее давление P и предельную кольцевую деформацию ϵ_2 и сравнить их с предельными (экстремальными) величинами [20]:

$$P = \frac{1}{R_o} (K_p^T \sigma_B^T t_o + K_p^n \sigma_B^n h_o) \quad K_p^T = \left[\left(\frac{e \cdot \epsilon_{2p}}{m_T} \right)^{m_T} + \frac{\sigma_{2H}}{\sigma_B^T} \right] \cdot e^{\frac{3}{2-K} \epsilon_{2p}} ; \quad (6.6)$$

$$K_p^n = \left[\frac{h_1}{a} \left(\frac{e \cdot \epsilon_{2p}}{m \sin \gamma} \right)^{m_n} + \frac{\sigma_H}{\sigma_B^n} \right] \sin^2 \gamma \cdot e^{-(1 + \frac{1}{2} \sin \gamma) \epsilon_{2p}};$$

$$\epsilon_2 = m_T \frac{2-K}{3} \cdot \frac{\sigma_{2p} t + \frac{m_n}{m_T} \cdot \frac{h_1}{a} h \sin^2 \gamma (1 - \epsilon_2 \cos^2 \gamma) \sigma_p^n h}{(\sigma_{2p}^T + \sigma_{2H}^T) t + \frac{2-K}{3} \cdot \frac{h_1}{a} h \sin^2 \gamma (\sigma_H^n + \sigma_B^n) h} , \quad (6.7)$$

где $\sigma_{2p}^T, \sigma_{2H}^T$ – кольцевые напряжения в трубе от внутреннего давления и натяжения бандажа; σ_H^n – напряжение в нитке бандажа;

$h_1 = \frac{h_o}{n}$; $D = 1 + \frac{1 - e_2 \cos^2 \gamma}{2 \sin \gamma} - 2 \cos^2 \gamma$; n, a, h – число слоев, шаг и толщина намотки. Полученные формулы (6.6) вырождаются в наше решение [18] для бандажированных труб с прямой ортогональной намоткой при $\gamma_0 = \pi/2$ и решают пятую задачу диссертации. Сравнение литературных данных, полученных при натурных испытаниях бандажированной трубы $\varnothing 1220 \times 12,5$ мм из стали 17ГС с ортогональной намоткой из проволоки 65Г диаметром 3 мм, с расчетными формулами свидетельствует о достаточной точности предложенной математической модели.

Для повышения работоспособности и экономичности трубопровода за счет ограничения распространения продольных разрушений путем изменения направления разрушения предложена его новая конструкция [35], содержащая навитый по спирали гибкий элемент, закрепленный в начале и в конце навивки, причем, по данным анализа, диаметр гибкого элемента обратно пропорционален его временному сопротивлению и прямо пропорционален толщине и временному сопротивлению материала трубопровода, относительное равномерное удлинение материала гибкого элемента меньше, чем у трубопровода. С целью повышения производительности и качества ремонта предложено, изготовлено и внедрено новое устройство для бандажирования, содержащее корпус с опорными валками и приводами поступательного и врачательного перемещений, смонтированный концентрично корпусу механизма намотки с укладчиком, средство натяжения проволоки с механизмом торможения и разъемную катушку для намотки проволоки, которая снабжена зубчатым венцом для связи с механизмом торможения, при этом последний выполнен в виде последовательно расположенных блоков направляющих втулок и роликов с взаимно перпендикулярными осями. Для надежности в работе устройство дополнительно снабжено механизмом предотвращения опрокидывания. Для обеспечения заданной точности управления при значительных колебаниях натяжения гибкого элемента машина содержит устройство для управления намоткой и устройство для регулирования натяжения проволоки. Разработаны технологии и изготовлены машины, которые ремонтируют нефтепроводы $\varnothing 1020$ мм, и защищены 11 авторскими свидетельствами. Предложены машины по защите от коррозии внутренней поверхности нефтепрово-

дов, которые защищены 5 авторскими свидетельствами. Следовательно, решена пятая задача диссертации.

Полученные в настоящей работе результаты исследований позволяют решить крупную научно-техническую проблему в области развития расчетно-экспериментальных методов механики разрушения, теории пластичности и их приложениям к оценке локальной прочности и трещиностойкости стальных труб, имеющую важное народнохозяйственное значение.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Разработанные теоретические основы расчетов на прочность однослоиных, двухслойных, бандажированных труб и экспериментальные методики позволяют установить количественную взаимосвязь условий эксплуатации, несимметричной механической неоднородности, размеров и местоположения дефектов, температуры, скорости деформирования и двухосности нагружения на их работоспособность. Это открывает имеющиеся резервы и возможности для их конструктивно-технологического проектирования, ремонта и экономного расходования металла при их производстве.

2. На основе статического метода теории предельного равновесия получены фундаментальные решения для распределения касательных напряжений (в виде гиперболического и тригонометрического тангенсов), реально отражающие механизм их развития при нагружении механически неоднородных соединений, позволяющие существенно уточнить оценку напряженного состояния и несущую способность рассматриваемых соединений с несимметричной неоднородностью с учетом двухосности нагружения имеющихся дефектов стыковых мягких швов, а также их местоположения в последних.

3. На базе экспериментальных данных о механическом поведении неоднородных соединений с дефектами и разработанного алгоритма получены расчетные зависимости для определения трещиностойкости МНСС. Степень контактного упрочнения, определяемая в каждом конкретном случае посредством разработанных в процессе теоретического анализа расчетных методик, зависит не только от характерных для механически неоднородных соединений параметров, но и от размеров

и местоположения дефектов в мягких и твердых швах. Новые данные, полученные на основе созданных оценок прочности соединений с трещиноподобными дефектами, положены в основу их нормирования.

4. На основе аналитического решения нелинейного дифференциального уравнения в частных производных в декартовых координатах получено новое точное решение для идеально-пластического тела задачи о сжатии наклонного пластического слоя между параллельными жескими плитами. Формулы для расчета компонент тензора напряжений, предельное сжимающее усилие в частном случае для ортогонального слоя вырождаются в классическое решение Л.Прандтля.

5. На основе приближенного решения системы равновесия и условия пластичности Губера-Мизеса получены новые теоретические формулы для напряженного состояния ортогонального слоя. Сравнение новой формулы для расчета среднего предельного давлений с формулой Л.Прандтля, В.В.Соколовского и экспериментальными результатами свидетельствует о хорошем соответствии. Решена краевая задача Гурса для оценки напряженного состояния и прочности наклонной мягкой прослойки механически неоднородных соединений. В частном случае для ортогонального слоя из найденного решения получается известная формула Л.М.Качанова.

6. На основе метода конформного отображения с помощью дробно-линейной функции и функции Жуковского проведено обобщение теории образования шейки в образцах при их деформировании и предложена новая методика вычисления поправки, учитывающая влияние трехосного напряженного состояния в шейке. Разработан универсальный метод для определения осевого напряжения в минимальном сечении шейки образцов различных типов. При параметре ЛОГН $\alpha = 0$ частными случаями полученного решения являются известные формулы П.Бридгмена, Н.Н.Давиденкова и Н.И.Спиридоновой.

7. Установленные и экспериментально проверенные расчетные формулы сопротивления микроскопу сталей, зависящие от жесткости напряженного состояния, предела текучести и характеристик пластичности, позволяют произвести оценку момента разрушения металлов без проведения специальных экспериментальных работ. Эти расчетные зависимости проверены на обширном экспериментальном материале в диапазоне температур $-196\dots+20^{\circ}\text{C}$ и скоростей дефор-

мации $c = 7,3 \cdot 10^4$ и 200 с^{-1} на трубных сталях 09Г2С, 14ХГС, 14Г2САФ, 14Г2АФ-У, 17ГС, 17Г1С-У, ВстЗкп и их сварных соединениях и находятся в удовлетворительном соответствии, а также в соответствии с экспериментальными результатами А.Я.Красовского, Л.А.Копельмана. Получены большой комплекс новых экспериментальных данных для механических свойств и характеристики трещиностойкости (J_c -интеграл, a_p) вышеуказанных сталей.

8. На основе теоретического анализа впервые определены напряженно-деформированное состояние и прочность двухслойных труб при различных реологических законах для материала: упругого, упругого с ограниченной сжимаемостью, упруго-идеально-пластического, упруго-хрупкого с ограниченной сжимаемостью, жестко-идеально-пластического с учетом температурных напряжений. Получены новые выражения для напряжений, возникающих в трубах при испытании статическим внутренним давлением. Для однослойных сосудов данное решение совпадает с выражениями Г.С.Шапиро; при отсутствии внешнего давления – с классическим решением Ляме; при гипотезе Винклера – с формулой академика В.Г.Галеркина для цилиндра и сферы. Используя данное решение, получены эпюры распределения радиальных напряжений в износостойких и прямошовных двухслойных трубах $\varnothing 1220$ мм.

9. Разработана математическая модель расчета предельного состояния участка нефтепровода, бандажированного снаружи высокопрочным профилем, навитым машиной перпендикулярно и под углом к образующей трубы. Получены выражения для предельного давления и параметра двухосности нагрузления нефтепровода с учетом дефектов предварительного натяга бандажа и деформации от внутреннего давления. Толщина обмотки и натяг бандажа существенно влияют на перераспределение продольных и кольцевых напряжений.

10. В результате теоретических и экспериментальных исследований разработан новый способ определения напряженного состояния тел с дефектами, основанный на абсолютных разностях хода метода голографической интерферометрии. Получены и апробированы распределения главных напряжений σ_1 и σ_2 , жесткости напряженного состояния $\frac{\sigma_1}{\sigma_2}$ и интенсивности напряжений σ_1 . Создана общая методика

определения коэффициентов интенсивности напряжений K_1 и K_2 с учетом регулярного члена разложения на основе двухпараметрического представления для наклонной трещины при двухосном нагружении. Получены формулы для изопах и изохром для этого случая, которые отличаются простотой и удобством применения. Установлен диапазон экстраполяции значений K_1 и K_2 , в котором теоретически полученные распределения напряжений совпадают с напряжениями, замеренными экспериментально на модели. Проведена К-тариировка образца, имитирующего разрушение трубопровода.

11. Результаты работы получили применение на трубных заводах, в управлениях магистральными нефтепроводами, строительно-монтажных трестах и научно-исследовательских институтах. Разработаны машины, технология, новая конструкция трубопровода и нормативно-техническая документация для бандажирования коррозионно-ослабленных участков нефтепровода без подъема его из траншеи и без остановки перекачки в Южном управлении нефтепродуктопроводов г.Шевченко. Проведена экспертиза участка нефтепровода "Усть-Балык - Омск" ø 1020x11 мм из стали 14ХГС, построенного в 1967 г., и разработаны рекомендации для его гидроиспытаний повышенным давлением для выявления дефектов в нем и повышения его работоспособности. Часть разработок одобрена и используется в руководящих документах ВНИИСПТНефть, инструкциях "Главтранснефти" Миннефтегазпрома СССР. Годовой экономический эффект на 1990 г., получаемый по результатам внедрения выполненных исследований, превысил 4 млн руб., и экономия составила 1200 т нефти.

Публикации по работе

1. Кручение стержней из упрочняющегося материала, сечение которых близко к круговым /А.А.Остсемин, С.В.Максимов, В.А.Лупин, Л.В.Максимова //Пробл. прочности.-1982.- N 11.- С.63-66.

2. Определение коэффициента интенсивности напряжений методом голографической фотоупругости /А.А.Остсемин, С.А.Денискин, Л.И.Ситников, А.А.Загребалов //Завод. лаб.- 1982.- N 9.- С.81-83.

3. Определение напряженного состояния тел с дефектами методом голографической фотоупругости /А.А.Остсемин, С.А.Денискин,

Л.Л.Ситников и др.//Пробл.прочности.- 1982.- N 10.- С.77-81.

4. Остсемин А.А., Ерофеев В.В., Файзорин В.М. К вопросу определения предельной нагрузки при совместном действии изгиба и растяжения //Пробл.прочности.- 1983.-N 5.- С.55-58.

5. Температурные зависимости механических свойств основного металла и сварных соединений труб большого диаметра/А.А.Остсемин, Г.И.Саидов, А.Н.Моношков, Ю.И.Пашков //Пробл.прочности.- 1983. - N 6.- С.108-110.

6. Остсемин А.А., Саидов Г.И. Исследование температурных зависимостей механических свойств трубных сталей при статическом и динамическом нагружении //Пробл.прочности.- 1983.-N 12.-С.98-100.

7. К вопросу определения коэффициента интенсивности напряжений образца, испытываемого по схеме "изгиб-растяжение" /А.А.Остсемин, С.А.Денискин, Л.Л.Ситников и др. //Пробл.прочности.- 1984- N 1. С.81-85.

8. Определение сопротивления микроскопу материалов с использованием диаграмм пластичности /А.А.Остсемин, М.В.Шахматов, В.В.Ерофеев, Г.И.Саидов //Пробл.прочности.- 1984.-N 3.-С.105-107.

9. Влияние дефектов, расположенных на границе сплавления, на статическую прочность сварного стыка труб большого диаметра /А.А.Остсемин, М.В.Шахматов, В.В.Ерофеев, В.А.Лупин //Пробл.прочности.- 1984.- N 8.- С.111-116.

10. Остсемин А.А., Лупин В.А. Кручение конического стержня из упрочняющегося материала // Пробл. прочности. - 1985. - N 6. - С.60-64.

11. Остсемин А.А., Саидов Г.И. Установка для определения механических свойств микрообразцов при статическом деформировании в диапазоне температур 77...293⁰К //Пробл.прочности.- 1985.- N 11.- С.117-118.

12. Остсемин А.А. Метод оценки чувствительности к надрезу основного металла и сварного соединения на кольцевых образцах //Автом.сварка.- 1986.- N 12.- С.67-78.

13. Остсемин А.А. Метод определения трещиностойкости тонколистовых трубных сталей //Пробл.прочности.- 1987.- N 1.- С.16-20.

14. Остсемин А.А. Определение предела текучести сварного соединения //Сварочн.пр-во.- 1987.- N 6.- С.42-43.

15. Определение коэффициентов интенсивности напряжений для наклонной трещины методом голографической интерферометрии /А.А.Остсемин, С.А.Денискин, Л.Л.Ситников и др./ //Завод.лаб.-1987.-N 12.- С.65-67.
16. Ю.Г.Матвиенко, А.А.Остсемин, Е.В.Никешичева. Методика оценки склонности материалов к неустойчивому росту трещины //Завод.лаб.- 1989.- N 10.- С.75-78.
17. Остсемин А.А., Денискин С.А., СитниковЛ.Л. Определение коэффициента интенсивности напряжений методами фотоупругого моделирования //Пробл.прочности.- 1990.- N 1.- С.33-37.
18. Остсемин А.А., Заварухин В.Ю. К расчету предельного состояния бандажированных труб //Пробл.прочности.- 1990.- N 1.- С.76-82.
19. Остсемин А.А., Дильтман В.Л. О сжатии пластического слоя двумя шероховатыми плитами //Пробл.прочности.- 1990.- N 7.- С.107-112.
20. Остсемин А.А., Заварухин В.Ю. Прочность бандажированного нефтепровода при наклонной намотке //Пробл.прочности.- 1990.- N 11.- С.100-105.
21. Остсемин А.А. Анализ напряженного состояния в шейке круглого и плоского образца при растяжении //Пробл.прочности.- 1991.- N 6.- С.75-79.
22. Остсемин А.А., Менихес Л.Д. Напряженно-деформированное состояние двухслойных сосудов давления. Сообщение 1. Случай винклеровости внешней среды //Пробл.прочности.- 1991.- N 1.- С.80-87.
23. Остсемин А.А., Менихес Л.Д. Напряженно-деформированное состояние двухслойных сосудов давления. Сообщение 2. Определение напряжений в сосудах при постоянном давлении //Пробл.прочности.- 1991.- N 5.- С.83-86.
24. Остсемин А.А. Напряженное состояние и статическая прочность механически неоднородных соединений. Сообщение 1. Оценка влияния значительной механической неоднородности на статическую прочность сварных соединений //Пробл. прочности. - 1991.- N 4. - С.30-35.
25. Остсемин А.А. Напряженное состояние и статическая прочность механически неоднородных соединений. Сообщение 2. Влияние

- малой степени механической неоднородности на прочность стыковых сварных соединений //Пробл.прочности.- 1991.- N 4.- С.35-38.
26. Остсемин А.А. Двухпараметрическое определение коэффициентов интенсивности напряжений для наклонной трещины методом голографической интерферометрии//Завод.лаб.- 1991. -N 12.- С.45-48.
27. Остсемин А.А. Определение работы распространения трещины трубных сталей по их механическим свойствам //Завод.лаб.- 1990.- N 11.- С.83-86.
28. Остсемин А.А. Обобщение решения задачи Прандтля о сжатии пластического слоя двумя шероховатыми плитами //Пробл.прочности.- 1991. - N 12.- С.70-74.
29. Остсемин А.А. Напряжение в наименьшем сечении круглого и плоского образцов при растяжении //Пробл.прочности.-1992.- N 4.- С.25-28.
30. Остсемин А.А. О решении плоской осесимметричной задачи теории идеальноplasticеского тела //Прикл.механика.- 1992.- N 9.- С.30-34.
31. Остсемин А.А. Исследование сопротивляемости разрушению сварных труб на образцах, испытываемых по схеме "изгиб-растяжение"//Сварочн.пр-во.- 1991.- N 10.- С.11-14.
32. Остсемин А.А., Заварухин В.Ю. Прочность нефтепровода с поверхностными дефектами //Пробл.прочности.-1993.- N 12.-С.51-59.
33. А.с.619825, МКИ G 01 N 3/22. Способ определения предела упругости /А.А.Остсемин, А.Н.Моношков.- Опубл.15.08.78. Бюл.N 30.
34. А.с.634168, МКИ G 01 N 3/20. Способ определения сопротивляемости хрупкому разрушению /А.А.Остсемин, А.Н.Моношков.- Опубл.25.11.78. Бюл.N 43.
35. А.с.1268502, МКИ В 65 Н 81/06. Устройство для бандажирования трубопровода /А.А.Остсемин, Ю.И.Блинов, В.А.Лупин и др.- Опубл.07.11.86. Бюл.N 41.
36. А.с.1379687, МКИ G 01 N 3/08. Способ определения механических характеристик сварного, паяного или клеевого соединения элементов на ус /А.А.Остсемин, М.В.Шахматов, Ю.Г.Матвиенко.- Опубл.07.03.88. Бюл.N 9.
37. А.с.1382796, МКИ В 65 Н 81/06. Устройство для управления намоткой провода /А.А.Остсемин, В.А.Лупин, Е.А.Остсемин. - Опубл. 23.03.88. Бюл.N 11.

38. А.с.1406109, МКИ В 65 Н 81/06. Устройство для регулирования натяжения проволоки на механизме бандажирования трубопровода /А.А.Остсемин, Е.А.Остсемин, В.А.Лупин и др.- Опубл.30.06.88. Бюл.N 24.

39. А.с.1460016, МКИ В 65 Н 81/06. Укладчик проволоки при намотке / А.А.Остсемин, Е.А.Остсемин, В.А.Лупин и др. - Опубл. 13.02.89. Бюл.N 7.

40. А.с.1522074, МКИ G 01 N 3/32. Способ определения предела текучести сварного соединения /А.А.Остсемин, Ю.Г.Матвиенко и др.- Опубл.15.11.89. Бюл.N 42.

41. А.с.1551931, МКИ F 16 L 9/09. Трубопровод /А.А.Остсемин, В.А.Лупин, А.С.Кумалганов и др.- Опубл.23.03.90. Бюл.N 11.

42. А.с.1610188, МКИ F 16 L 57/00/ F 16 L 55/18. Способ повышения прочности действующего трубопровода /А.А.Остсемин, В.А.Лупин, Ю.Г.Матвиенко, А.И.Каширский.- Опубл.30.11.90. Бюл.N 44.

43. А.с.1712181, МКИ В 29 С 63/02. Устройство для нанесения ленточного покрытия на поверхность /А.А.Остсемин, Е.А.Остсемин, В.Х.Галюк и др.- Опубл.15.02.92. Бюл.N 6.

44. А.с.1717260, МКИ В 05 С7/08. Устройство для покрытия внутренней поверхности кольцевого шва трубопровода /А.А.Остсемин, Е.А.Остсемин, В.Х.Галюк и др.- Опубл.07.03.92. Бюл.N 9.

45. А.с.1722860, МКИ В 29 С 63/30. Устройство для нанесения полимерного покрытия на внутреннюю поверхность трубопровода /А.А.Остсемин, Е.А.Остсемин, В.Х.Галюк и др.-Опубл.30.03.92. Бюл. N 12.

46. А.с.1752442, МКИ В 05 С 7/-08. Машина для антакоррозионной защиты внутренней поверхности труб /А.А.Остсемин, Е.А.Остсемин, В.Х.Галюк и др.- Опубл.07.08.92. Бюл.N 29.

47. А.с.1757757, МКИ В 05 С 7/08. Устройство для нанесения покрытий на внутреннюю поверхность трубы /А.А.Остсемин, В.М.Асташкин, В.Х.Галюк и др.- Опубл.30.08.92. Бюл.N 32.

48. А.с.1799835, МКИ В 65 Н 81/06, F 16 L 55/00. Машина для бандажирования труб /А.А.Остсемин, Е.А.Остсемин.- Опубл.07.03.93. Бюл.N 9.

А.Остсемин