

05.23.01
Т 427

КОНТРОЛЬНЫЕ
ЭКЗЕМПЛЯРЫ

На правах рукописи



Тиньгаев Александр Кириллович

**КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ И МЕТОД ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ХЛАДОСТОЙКОСТИ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ
С ДЕФЕКТАМИ СПЛОШНОСТИ В СВАРНЫХ ШВАХ**

Специальность 05.23.01

"Строительные конструкции, здания и сооружения"

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Челябинск
2004

Работа выполнена на кафедре “Строительные конструкции и инженерные сооружения” Южно-Уральского государственного университета.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор,
Одесский Павел Дмитриевич;
доктор технических наук, профессор,
Ерофеев Валерий Владимирович;
доктор технических наук, профессор,
Еремин Константин Иванович.

Ведущая организация — ЦНИИПроектстальконструкция
им.Н.П.Мельникова (г. Москва).

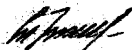
Защита состоится 23 декабря 2004 г., в 14-00, на заседании диссертационного совета ДМ212.298.08 в Южно-Уральском государственном университете по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, главный корпус, ауд.1001.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Южно-Уральского государственного университета.

Просим направить Ваш отзыв в двух экземплярах, заверенных печатью, по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, Ученый совет.

Автореферат разослан ” ____ “ ноября 2004 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
докт. техн. наук, профессор



Трофимов Б.Я.

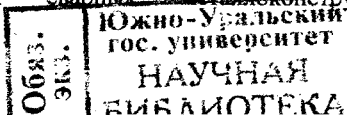
ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Интенсивное освоение северной строительно-климатической зоны, занимающей около 40% территории России и обладающей богатейшими запасами полезных ископаемых, определяет потребность в решении ряда крупных научно-технических и социально-экономических задач. Проблема хрупкого разрушения стальных строительных конструкций, предназначенных для эксплуатации в условиях холодного климата, имеет важное хозяйственное значение, так как при снижении температуры окружающей среды ниже -20°C в 2-3 раза увеличивается интенсивность потока отказов, в 3 и более раз снижаются показатели наработки конструкций, существенно увеличивается тяжесть экономических и экологических последствий от аварий. По причине неприспособленности сварных конструкций из малоуглеродистых и низколегированных сталей к эксплуатации при низкой температуре окружающей среды происходит около 20% аварий.

Хрупкое разрушение стальных строительных конструкций является одним из опаснейших видов их предельного состояния и изучается учеными и специалистами-практиками во всем мире на протяжении более чем 100 лет. В частности, в России и странах СНГ этой проблемой активно занимаются в ЦНИИПСК им.Мельникова, ЦНИИСК им.Кучеренко, ИЭС им.Патона, институте металлургии им.Байкова, институте физико-технических проблем Севера СО РАН, институте металлофизики НАН Украины. Целый ряд вопросов успешно решается в МГТУ (МВТУ), СПбГТУ (ЛПИ), НГАС (НИСИ), ЯГУ, ЮУрГУ (ЧПИ), МГТУ (МГМИ). Благодаря совместным усилиям отечественных и зарубежных исследователей за прошедший период достигнуты значительные успехи: исследованы физико-механические аспекты явления хладноломкости металлов и сплавов, определены наиболее значимые факторы, разработаны критерии и методы оценки склонности стали к хрупкому разрушению. Однако, несмотря на проделанную работу, проблема обеспечения хладостойкости стальных строительных конструкций окончательно не решена. Нет пока завершенной теории квазихрупкого разрушения, позволяющей удовлетворительно описывать физические и статистические закономерности разрушения элементов металлоконструкций в области вязко-хрупкого перехода. Остается открытым вопрос о критериях и методе оценки критических температур хрупкости стали при сложном напряженном состоянии. Требуют совершенствования методы выбора марки стали, нормирования дефектов сварных соединений и оценки влияния технологических и эксплуатационных факторов на хладостойкость элементов конструкций.

Сложность данной ситуации заключается в отсутствии на сегодняшний день общей методологии решения проблемы обеспечения сопротивления хрупкому разрушению стальных строительных конструкций, эксплуатируемых в суровых природных условиях северной строительно-климатической зоны, охватывающей все этапы их жизненного цикла.

Целью настоящей работы является развитие научных основ, критериев и методов обеспечения хладостойкости сварных металлоконструкций.



позволяющих на основе системного подхода учитывать особенности влияния конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов и их взаимодействий на сопротивление стали хрупкому разрушению.

Научную новизну работы составляют следующие результаты, защищаемые автором.

1. Общие принципы и алгоритм системного подхода к решению проблемы обеспечения хладостойкости стальных строительных конструкций при двухуровневой схеме декомпозиции объекта на сварные соединения и узлы, соответствующей кинетике хрупкого разрушения.

2. Система вероятностно-детерминистических критериальных соотношений предельного состояния сварного соединения с дефектами сплошности в металле шва.

3. Деформационные критерии температурного интервала вязко-хрупкого перехода, отражающие структурно-кинетические особенности процессов пластического течения и разрушения строительных сталей.

4. Феноменологическая модель предельной пластичности металла при сложном напряженном состоянии, раскрывающая ее связь с внешними (показателем жесткости Π , Лоде-Надаи μ_0) и внутренними (универсальной постоянной разрушения Δ , критической жесткостью $\Pi_{кр}$) параметрами состояния материала в конструкции.

5. Метод расчетной оценки критических температур хрупкости элементов стальных конструкций, позволяющий с единых феноменологических позиций учитывать особенности технологических и эксплуатационных воздействий на металл.

6. Результаты оценки влияния технологических дефектов, остаточных напряжений и вида разрушения (вязкого, квазихрупкого и хрупкого) на величину ударной вязкости металла сварных соединений элементов конструкций.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций достигается использованием современных методов теории надежности механических систем, физики прочности и пластичности, механики разрушения, проведением экспериментальных исследований на современном оборудовании и статистическими методами обработки результатов, а также сопоставлением полученных данных с известными теоретическими и экспериментальными исследованиями.

Практическое значение полученных результатов.

1. Разработан метод комплексного нормирования технологических дефектов и механических свойств сварных соединений стальных конструкций, обеспечивающий их работоспособность при воздействии низких температур.

2. Предложен метод классификации сварных соединений строительных металлоконструкций по категориям ответственности.

3. Выполнен анализ структуры дефектности сварных стыковых соединений, определены вероятностные модели и параметры функций распределения их размеров в условиях стабильного технологического процесса сварки.

4. Установлены закономерности изменения поля остаточных напряжений в элементах металлоконструкций больших толщин, изготовленных в условиях

реального производства с использованием типовых технологических процессов. Дана оценка эффективности термической обработки и предварительного подогрева в отношении снижения остаточных сварочных напряжений.

5. Получены расчетные зависимости для учета влияния технологических дефектов, остаточных напряжений и количества ремонтов на величину ударной вязкости металла сварного соединения. Определены минимальные требования к ударной вязкости металла сварных соединений при наличии риска их хрупкого разрушения.

Внедрение. Результаты работы использовались при разработке следующих нормативных документов:

1. ГОСТ 23118-99. Межгосударственный стандарт. “Конструкции стальные строительные. Общие технические условия”. Госстрой России, ГУП ЦПП, 2001.– 37 с.

2. ГОСТ Р. Государственный стандарт России. “Резервуары стальные вертикальные цилиндрические для нефти и нефтепродуктов объемом от 100 до 50000 м³. Общие технические условия” (проект). Госстрой России, ГУП ЦПП, 2003.– 40 с.

3. СП 53.101-98. Свод правил по проектированию и строительству. “Изготовление и контроль качества стальных строительных конструкций”. Госстрой России, ГУП ЦПП, 1999.– 29 с.

4. ВСН 39-3.3.1292.4-91. Ведомственные строительные нормы. “Конструкции стальные морских стационарных платформ. Правила производства и приемки работ”. Миннефтегазпром СССР.– М.: ВНИИОНГ, 1991.– 65 с.

Наряду с нормативными документами результаты диссертационной работы использовались при решении ряда практических задач, в частности, при разработке:

– методики определения допустимых дефектов сварных соединений морских стационарных платформ при их статическом нагружении в области квазихрупких разрушений для ЦНИИПроектстальконструкции (г.Москва) и ППСО Шельфпроектстрой (г.Баку);

– методики оценки хладостойкости узлов опорного блока ОБ-1 ледостойкой стационарной платформы, установленной в Балтийском море на Кравцовском нефтяном месторождении;

– технических условий на изготовление и контроль качества стальных конструкций опорных частей ледостойких стационарных платформ для Пельтун-Астохского, Луньского и Чайво-1 месторождений на Северо-восточном шельфе о.Сахалин;

– технических условий на изготовление и контроль качества стальных конструкций покрытия Большой спортивной арены стадиона “Лужники”;

– рекомендаций по нормированию технологических дефектов сварных соединений вертикальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов III класса опасности по ИБ 03-380-00 для ЗАО “Завод Анкер” (г.Челябинск).

Личный вклад автора заключается в постановке данного исследования; разработке основных положений, определяющих научную новизну и

практическую значимость работы; создании расчетных моделей, критериев и методов оценки хладостойкости сварных соединений и элементов металлоконструкций, а также в руководстве творческим коллективом сотрудников кафедры СКИИС ЮУрГУ при выполнении экспериментальных работ по исследованию остаточных напряжений, оценке дефектности сварных соединений и влиянию ремонтной сварки на склонность стали к хрупкому разрушению.

Научным консультантом по диссертации является доктор технических наук, профессор Губайдулин Рафкат Галимович.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

– IV, V украинских республиканских научно-технических конференциях “Развитие, совершенствование и реконструкция специальных сварных конструкций зданий и сооружений, построенных в металле” (Киев: КИСИ, 1988, 1992 гг.);

– Всесоюзной научно-технической конференции “Морские сооружения континентального шельфа” (Севастополь: РДНТЭП, 1989 г.);

– Международной конференции “Сварные конструкции” (Киев: ИЭС им. Патона, 1990 г.);

– Всесоюзной научно-технической конференции “Испытания строительных металлических конструкций в условиях действующих предприятий” (Магнитогорск: МГМИ, 1991 г.);

– II Международной конференции “Материалы для строительства” (Днепропетровск: ДИСИ, 1993 г.);

– Международной конференции “Металлостроительство-96. Состояние и перспективы развития” (Донецк. Макеевка: ПГАСиА, 1996 г.);

– Международном научном семинаре “Вопросы современного материаловедения” (Донецк: ПГАСиА, 1997 г.);

– Международной научной конференции “Проблемы современного материаловедения” (Днепропетровск, ПГАСиА, 1998 г.);

– научно-технической конференции “Архитектура и строительство” (Томск, ТГАСУ, 1999 г.);

– 18, 19, 20-й научно-технических конференциях сварщиков Урала “Сварка Урала – в XXI век” (Екатеринбург, УГТУ, 1999 г., Челябинск, ЧГТУ, 2000 г., Нижний Тагил, УГТУ, 2001 г.);

– Международной научно-технической конференции “Эксплуатация, ремонт и реконструкция резервуаров для нефти и нефтепродуктов” (Самара, СамГАСА, 1999 г.);

– IV, V Международных конференциях “Проблемы прочности материалов и сооружений на транспорте” (Санкт-Петербург, ПГУПС, 1998 г. Череповец, ЧГУ, 2002 г.);

– II, IV, V Международных конференциях “Научно-технические проблемы прогнозирования надежности и долговечности металлоконструкций и методы их решения” (С.Петербург: СПбГТУ, 1997, 2001, 2003 гг.);

– Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 150-летию со дня рождения Н.Г. Славянова “Сварка и контроль 2004” (Пермь, ПГТУ, 2004 г.);

– научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава ЮУрГУ (ЧПИ, ЧГТУ) в период с 1986 по 2004 гг.

Публикации. Основные результаты исследований опубликованы в 38 статьях и тезисах докладов. Всего по теме диссертации опубликована 61 работа.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, шести глав и общих выводов. Содержание диссертации изложено на 339 страницах машинописного текста, включая 143 иллюстрации, 75 таблиц. Список литературы содержит 233 наименования. В приложение к диссертации включены документы, подтверждающие использование результатов работы в ведущих научно-исследовательских организациях и на промышленных предприятиях.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность рассматриваемой проблемы, сформулированы цель работы, научная новизна и практическое значение полученных результатов, а также дана общая характеристика диссертации.

Первая глава посвящена анализу современного состояния проблемы хрупкого разрушения сварных конструкций из малоуглеродистых и низколегированных марок сталей. Рассмотрены основные причины их низкой хладостойкости, проанализированы теоретические предпосылки, критерии и методы оценки склонности стали и элементов конструкций к хрупкому разрушению. По результатам анализа определена методология, общий алгоритм и методы решения рассматриваемой проблемы.

Исследованию хрупкого разрушения стальных конструкций посвящено большое количество работ. Теоретические положения этой проблемы сформулированы и рассмотрены в работах Н.Н. Давиденкова, А.И. Иоффе, Г.П. Карзова, М.Я. Леонова, Н.А. Махутова, Ю.А. Мешкова, Е.М. Морозова, В.В. Панасюка, Я.Б. Фридмана, Г.П. Черепанова, D. Broek, P.S. Dagdale, G.R. Irwin, A.A. Griffith, E. Orowan, J.R. Rice и др. Изучению причин хрупкого разрушения элементов металлоконструкций и разработке методов оценки их хладостойкости посвящены работы В.А. Балдина, Е.М. Баско, В.В. Бирюлева, В.А. Винокурова, В.С. Гиренко, В.М. Горичко, Р.Г. Губайдулина, К.И. Еремина, Л.А. Копельмана, А.Я. Красовского, В.Р. Кузьмина, В.В. Ларионова, В.П. Ларионова, Н.А. Махутова, Н.П. Мельникова, Ю.А. Мешкова, П.Д. Одесского, В.А. Прохорова, А.В. Сильвестрова, С.Д. Шафрая, Н. Kinara, W.J.Hall, T.H.Kanazawa, A.A.Wells. Вопросы оценки прочности сварных соединений и нормирования их дефектов отражены в работах О.А. Бакши, В.А. Винокурова, В.Н. Волченко, В.В. Ерофеева, Г.П. Карзова, Л.А. Копельмана, А.М. Лепихина, В.Ф. Лукьянова, И.И.Макарова, В.И. Махненко, В.В. Москвичева, Г.А. Николаева, М.В. Шахматова.

На основании анализа выполненных исследований установлено, что современное состояние проектирования, изготовления и ремонта строительных металлоконструкций не обеспечивает в должной мере их сопротивления хрупкому разрушению. По данным Н.П. Мельникова, А.В. Сильвестрова, С.Д. Шафрая среднестатистическая температура максимальной интенсивности отказов находится в диапазоне от -15°C до -30°C , в то время как для северной строительной-климатической зоны температура наиболее холодных суток опускается ниже -40°C . Теоретические основы существующих методов оценки хладостойкости стали и элементов конструкций не позволяют в полной мере учитывать их типичные конструктивно-технологические несовершенства, так как ориентированы на описание микромеханизма разрушения металла в простейших условиях. Предпринимаемые попытки развить их применительно к стальным строительным конструкциям имели в основном внесистемный характер, зачастую без должного научного обоснования и в отрыве от реального состояния производства. Как следствие, на сегодняшний день нет единой точки зрения относительно критериев и метода определения критических температур хрупкости стали, что приводит к существенным расхождениям при оценке ее хладостойкости в составе конструкции. Нормативные требования по допустимой дефектности сварных соединений, с одной стороны, являются чрезмерно жесткими по отношению к малозначительным дефектам, что приводит к необоснованным затратам на ремонт, а с другой — не гарантируют их сопротивления хрупкому разрушению. Методы расчета на прочность с учетом хрупкого разрушения не учитывают реального состояния дефектности сварных соединений, а также особенностей технологических и эксплуатационных воздействий на металл, являющихся причинами порядка 60...70% аварий, произошедших при низкой температуре окружающей среды.

В работе показано, что хрупкое разрушение сварных строительных конструкций относится к категории сложных событий, поэтому развитие теоретических основ, критериев и методов обеспечения их хладостойкости необходимо осуществлять на основании системного подхода. Это позволит систематизировать полученные ранее результаты теоретических и экспериментальных исследований, переосмыслить их с позиции междисциплинарного комплекса обобщающих взглядов и сформулировать новые критерии оценки и методы обеспечения хладостойкости стальных строительных конструкций.

Для реализации принципов системного подхода (работы В.В. Болотина, А.М. Лепихина, Н.А. Махутова, С.А. Тимашева и др.) принята двухуровневая схема декомпозиции конструкции (C_t) на сварные соединения (e_{ij}) и узлы (p_i), которая не противоречит кинетике хрупкого разрушения и в общем случае имеет вид

$$C_t = \bigcup_{i=1}^n p_i \left(\bigcup_{j=1}^m e_{ij} \right). \quad (1)$$

Достаточность двухуровневой схемы разукрупнения C_t следует из анализа причин отказов, согласно которому хрупкое разрушение стальных строительных конструкций зарождается, как правило, от трещиноподобного дефекта сварного

соединения и развивается по сечению элемента с пониженной вязкостью материала при наличии значительных растягивающих напряжений. Наличие сварного соединения e_{ij} со свойственной ему структурной, механической и геометрической неоднородностью, является в данном случае необходимым условием хрупкого разрушения конструкции. Достаточным же условием разрушения является неблагоприятное, с точки зрения хладостойкости стали, состояние ее элементов (сварных узлов p_i).

Исходя из двухуровневой декомпозиции конструкции обеспечение сопротивления хрупкому разрушению следует осуществлять в два этапа. На первом этапе решается вопрос о прочности сварного соединения посредством выбора основного и сварочного материалов, а также назначения категорий ответственности сварных соединений, для которых предварительно рассчитываются показатели их качества по допустимой дефектности и механическим свойствам (рис. 1).

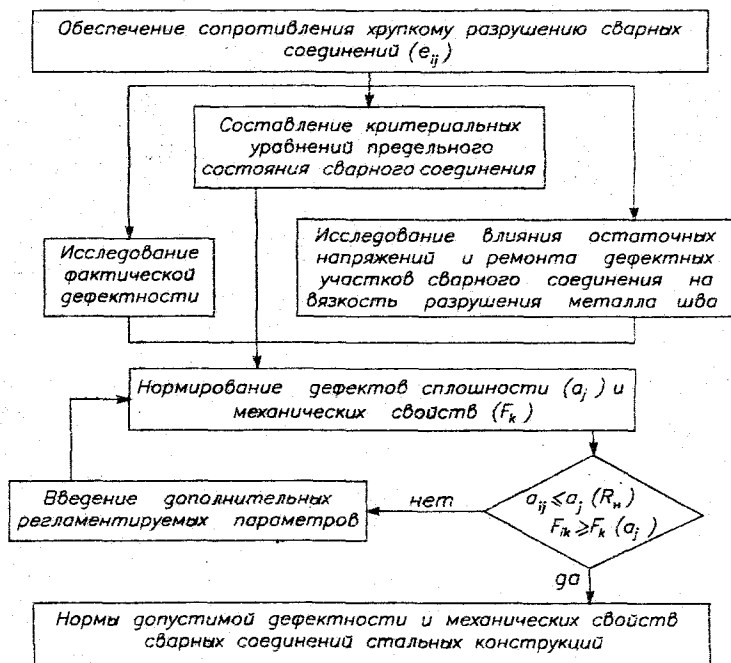


Рис. 1. Алгоритм обеспечения сопротивления хрупкому разрушению сварных соединений стальных конструкций (первый этап)

Принципиальным и новым моментом здесь является идея нормирования дефектов и механических свойств на основании анализа технологического процесса сварки в условиях его стабильного состояния. При традиционном же

подходе к нормированию показателей качества сварных соединений и выборочном приемоочном контроле наличия недопустимых дефектов, являющихся инициаторами хрупкого разрушения, не избежать

На втором этапе выполняется расчет на прочность с учетом хрупкого разрушения элементов конструкций в целом, который является поверочным и производится после того, как определены усилия, подобраны сечения и выявлены наиболее нагруженные элементы с учетом допустимых дефектов (рис. 2). В отличие от предыдущего этапа, здесь принимаются во внимание индивидуальные особенности изделия, режим и условия его эксплуатации, что позволяет проектировщику осуществлять поиск оптимальных конструктивно-технологических решений за счет варьирования исходными параметрами, например, напряженным состоянием узла, маркой стали, категорией ответственности сварных соединений и т.д.

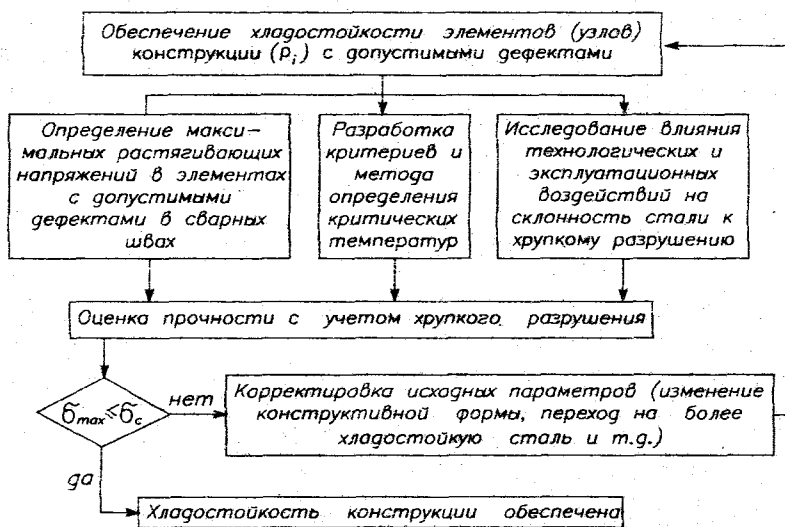


Рис. 2. Алгоритм обеспечения сопротивления хрупкому разрушению элементов конструкций с допустимыми дефектами в сварных швах (второй этап)

Для реализации предлагаемой концепции обеспечения хладостойкости стальных строительных конструкций определены следующие задачи:

1. Разработать общие принципы, методику и алгоритм расчетного обоснования нормативных требований к технологическим дефектам и характеристикам механических свойств сварных соединений.

2. Сформулировать определяющие соотношения предельного состояния сварного соединения с технологическими дефектами, учитывающие вероятностную природу их возникновения.

3. Разработать деформационные критерии и метод расчетной оценки критических температур хрупкости элементов металлоконструкций, позволяющий с единых теоретических позиций учитывать особенности их конструктивной формы, технологии изготовления и условий эксплуатации.

4. Исследовать структуру, количественные значения и определить вероятностные модели технологической дефектности сварных соединений в условиях стабильного технологического процесса.

5. Провести исследования влияния технологических дефектов, остаточных напряжений и ремонта дефектных участков на вязкость разрушения металла сварных соединений.

6. На примере стальных вертикальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов разработать рекомендации по нормированию показателей качества сварных соединений, выбору основного и сварочного материалов, обеспечивающих работоспособность элементов металлоконструкций при воздействии низких температур.

Вторая глава посвящена разработке критериальных уравнений предельного состояния сварного соединения и метода комплексного нормирования размеров дефектов и механических свойств по известным параметрам состояния технологического процесса сварки и заданной надежности изделия, которые определяют содержание алгоритма обеспечения хладостойкости сварных соединений стальных конструкций.

В основу метода положен классификатор сварных соединений по категориям ответственности, в зависимости от которых регламентируются требования к уровню их качества по показателям дефектности и механических свойств. Количественные значения этих показателей есть результат решения уравнений предельного соединения, в которых каждой категории сварного соединения соответствует свой тип (хрупкий, квазихрупкий или вязкий) разрушения. Возможность усталостного разрушения в работе не рассматривалась, так как сварные соединения, рассчитываемые на воздействия переменных нагрузок, отнесены к первой категории ответственности, для которых несущая способность лимитируется хрупким разрушением. Здесь следует отметить, что вопрос о назначении категорий ответственности не имеет однозначного решения, поэтому поиск приемлемого варианта классификации сварных соединений осуществлялся на основании метода экспертных оценок. В результате ранжирования ряда альтернатив составлена базовая классификационная таблица (табл. 1), которая была использована при разработке ГОСТ 23118-99 и СП 53-101-98.

При составлении критериальных уравнений предельного состояния соединения с дефектом использовался комплексный вероятностно-детерминистический подход в виде:

$$\begin{cases} P(a_c) \geq R_n; \\ \sigma(a_c) \leq \sigma_c, \end{cases} \quad (2)$$

где $P(a_c)$ – вероятность отсутствия в сварном соединении технологических дефектов больше критической величины a_c ; R_n – нормативное значение

надежности сварного соединения; $\sigma(a_c)$ – величина растягивающих напряжений, действующих в сварном соединении; σ_c – величина разрушающих напряжений. Работоспособность конструкции считается обеспеченной при выполнении обоих неравенств, при этом в качестве необходимого условия целесообразно принять первое выражение, так как в условиях реального производства соблюдение (2) экономически обосновано только для определенных значений $a_c \geq a_c^{\min}$. При $a_c < a_c^{\min}$ для достижения требуемого уровня качества необходимы существенные затраты (рис. 3), ввиду несоответствия нормативных требований возможностям технологического процесса. Неблагоприятным фактором в данном случае является увеличение объема ремонтных работ, что приводит к снижению трещиностойкости металла сварного соединения и повышает риск хрупкого разрушения.

Таблица 1

Классификация сварных соединений по категориям ответственности

Группы сварных соединений	Категории ответственности сварных соединений для различных групп конструкций по СНиП II-23-81*			
	1	2	3	4
Поперечные стыковые швы, воспринимающие растягивающие усилия	I	II	III	III
Продольные стыковые швы воспринимающие растягивающие усилия	II	III	III	III
Стыковые швы, воспринимающие сжимающие усилия	III	III	III	III
Угловые швы с величиной номинальных напряжений более $0,85 R_{wf} (R_{wz})$	I	II	III	III
Угловые швы с величиной номинальных напряжений не более $0,85 R_{wf} (R_{wz})$	II	III	III	III
Нерасчетные сварные швы	III	III	III	III

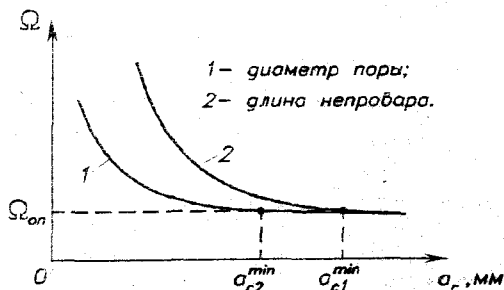


Рис. 3. Характер зависимостей величины затрат (Ω), от нормативных требований к a_c

Разработанная вероятностная модель надежности сварного соединения базируется на работах В.В. Болотина и опирается на пуассоновские свойства потока дефектов сварки. С целью развития базовой модели предложено разделять неконтролируемые, контролируемые и подвергнутые ремонту участки сварного соединения, при этом их взаимодействие принято соответствующим последовательной схеме соединения элементов, для которой надежность определяется по формуле:

$$P(a_c) = P_{nc} \cdot P_c \cdot P_{cr} \quad (3)$$

где P_{nc} , P_c , P_{cr} – вероятности не появления дефектов критического размера на каждом из вышеперечисленных участков, рассчитываемые по формулам:

$$P_{nc} = \exp \left[- \sum_{i=1}^n \int_{M_{nc}} \lambda_{nc}(a_{c,i}) \frac{dM}{M_0} \right], \quad (4)$$

$$P_{cr} = \exp \left[- \sum_{i=1}^n \int_{M_{cr}} \lambda_{cr}(a_{c,i}^*) \frac{dM}{M_0} \right], \quad (5)$$

$$P_c = \exp \left[- \sum_{i=1}^n \left[\int_{M_c} \lambda_c(a_{c,i}) \frac{dM}{M_0} - \int_{M_{cr}} \lambda_{cr}(a_{c,i}^*) \frac{dM}{M_0} \right] \right]. \quad (6)$$

Здесь λ_{nc} , λ_c , λ_{cr} – математические ожидания числа дефектов размером больше критической величины соответственно на неконтролируемом, контролируемом и отремонтированном участках сварного шва; M – мера длины шва, M_0 – эталонная мера длины шва, принятая равной 100мм; $a_{c,i}^*$ – критический размер дефекта на отремонтированном участке шва.

Регламентируя процедуру ремонтно-восстановительных работ, можно принять $P_{cr}=P_c$ и исправленные участки сварного шва включить в состав проконтролированных бездефектных. Тогда вероятность отсутствия на этих участках шва недопустимых дефектов будет связана, в основном, с достоверностью используемого метода контроля, которую можно выразить через условную вероятность обнаружения дефекта $P(D/a_c)$. Если объем контроля V представить в относительных единицах, то надежность сварного соединения в виде вероятности отсутствия в нем дефектов больше критической величины будет описана выражением вида

$$P(a_c) = \exp \left[- \sum_{i=1}^n \left[\frac{\lambda_{0,i}(1-V \cdot P(D/a_{c,i}))}{M_0} \int_{M_{a_{c,i}}}^{\infty} f(a_{c,i}) da dM \right] \right], \quad (7)$$

где λ_0 – интенсивность потока дефектов, $f(a_{c,i})$ – плотность распределения размеров дефектов i -го типа.

Выражение (7) отражает реальное состояние надежности сварных соединений строительных конструкций и позволяет оценить эффективность рекомендуемых способов ее повышения. Так, например, из (7) следует, что при $P(D/a_c) \rightarrow 0$ даже при сплошном контроле ($V=1,0$) надежность сварных соединений определяется состоянием технологического процесса сварки. При $P(D/a_c)$ и V , отличных от

нуля, $P(a_c)$ изменяется по экспоненциальному закону, для которого выборочный контроль в объеме до 50% не приводит к существенному повышению надежности сварного соединения, так как наиболее опасные технологические дефекты являются редкими событиями. В предельном случае, при $P(D/a_c)=1,0$ и $V=1,0$, $P(a_c)$ не зависит от λ_0 и $f(a)$.

Для составления уравнений предельного состояния из условия прочности все технологические дефекты металла шва разделены на две группы. К первой относятся объемные дефекты типа пор и шлаковых включений, ко второй – плоскостные дефекты типа непроваров, несплавлений, подрезов и трещин. Значительные различия в характере напряженного состояния и кинетике развития разрушения сварных соединений с дефектами первой и второй групп обуславливают необходимость использования различных подходов для описания их предельного состояния.

При оценке несущей способности сварных соединений удобно оперировать величиной номинальных напряжений. Поэтому, на основании работ С.И.Губкина, М.В.Сторожева и Н.А.Махутова, для сварных соединений с дефектами первой группы вначале была получена зависимость между номинальными напряжениями и интенсивностью упругопластических напряжений в зоне предразрушения:

$$\sigma_n^{\text{нetto}} = \frac{\sigma_i}{3K_t^{2m/(1+m)}} \left[\frac{3 - \mu_\sigma}{\sqrt{3 + \mu_\sigma^2}} + \Pi \right], \quad (8)$$

где σ_i – интенсивность напряжений, m – коэффициент деформационного упрочнения, K_t – коэффициент концентрации напряжений в упругой области, μ_σ – показатель Лоде, Π – показатель жесткости напряженного состояния.

Для определения критических напряжений вместо σ_i использована интенсивность упругопластических деформаций ε_i , так как нахождение σ_i в данном случае представляет значительные сложности. Если выразить σ_i через ε_i , то выражение (7) для предельного случая ($\varepsilon_i = \varepsilon_c$, $\sigma_n^{\text{нetto}} = \sigma_{cl}$) будет иметь вид

$$\sigma_{cl} = \frac{1}{3} \left[\frac{3 - \mu_\sigma}{\sqrt{3 + \mu_\sigma^2}} + \Pi \right] \sigma_t^{1-m} E^m \varepsilon_c^m, \quad (9)$$

где ε_c – величина предельной пластичности металла при заданном напряженно-деформированном состоянии.

Для сварных соединений с дефектами второй группы использован двухпараметрический критерий механики разрушения Е.М.Морозова, который был уточнен в части учета отличия напряженно-деформированного состояния в образце и элементе конструкции:

$$\sigma_{c2} = \frac{\eta_a \sigma_a}{\sqrt[4]{1 - (K_I^{cb} / K_{IC})^2}}, \quad (10)$$

где K_I^{cb} , K_{IC} – соответственно текущее и критическое значения коэффициента интенсивности напряжений для трещин нормального отрыва; η_a – коэффициент,

учитывающий отличие напряженно-деформированного состояния в образце и рассчитываемом элементе,

$$\eta_n = \frac{1}{3} \left[\frac{3 - \nu_\sigma}{\sqrt{3 + \nu_\sigma^2}} + \Pi \right] \cdot \left(\frac{\varepsilon_c^{из}}{\varepsilon_c^{об}} \right)^m \quad (11)$$

Здесь $\varepsilon_c^{об}$, $\varepsilon_c^{из}$ – предельные пластичности металла для стандартного образца и конструктивного элемента (изделия) соответственно:

Влияние остаточных напряжений (σ_{oc}) на величину σ_{c2} учитывается при определении коэффициента интенсивности напряжений

$$K_1^{cp} = (\sigma_n + \sigma_{oc}) \sqrt{\pi a} f_k, \quad (12)$$

где f_k – тарировочная функция, связанная с конечностью размеров элемента.

Особенности взаимодействия поля остаточных напряжений и номинальных напряжений от внешней нагрузки при расчете K_1^{cp} , а также влияние σ_{oc} на вязкость разрушения металла шва рассмотрены в пятой главе.

Экспериментальная проверка выражения (9) проводилась на двух типах образцов из сталей СтЗсп толщиной 10мм и 09Г2С толщиной 50мм. В первом случае испытывали цилиндрические образцы с кольцевым надрезом, посредством которого варьировалась концентрация напряжений от технологических дефектов. На данных образцах важно было оценить степень сходимости результатов при различных K_0 , поэтому вопросы точности моделирования НДС для рассматриваемого класса дефектов не рассматривались. Во втором же случае испытывали крупномасштабные образцы сварных стыковых соединений с реальной геометрией смещения кромок. Как показали результаты испытаний, среднее расхождение между экспериментальными и расчетными значениями разрушающих напряжений составляет 10%, а максимальное не превышает 25%. Обоснование возможности использования (10) для расчета сварных соединений здесь не приведено, так как это уже сделано в работах Г.С. Васильченко, А.Н. Васютина, Е.М. Баско, В.Е. Починка для аналогичных критериев.

В соответствии с рис. 1, обеспечение хладостойкости на уровне сварного соединения достигается за счет регламентации размеров дефектов и механических свойств материала при установившемся стабильном технологическом процессе сварки. При известных функциях распределения количества и размеров дефектов решение (7) относительно a_c не вызывает сложностей. Прочность в этом случае обеспечивается за счет расчетного обоснования нормативных требований к механическим свойствам металла сварного соединения. На основании уравнений (9), (10) и результатов исследований В.С. Гиренко получены аналитические зависимости для определения минимальных требований к механическим свойствам металла сварного соединения

$$KCV = \frac{(1 - \nu^2) \cdot (K_1^{cp})^2 \cdot \rho_3 / \rho}{2k \cdot E \left[1 - (\sigma_n / \eta_n \sigma_n)^4 \right]}, \quad (13)$$

$$\psi_k = 1 - \left\{ \exp \frac{\varepsilon_c}{\exp \left[\frac{\Pi - 1}{2\Pi_{кр}} \ell n \Delta + \frac{\Pi_{кр} - \Pi}{\Pi_{кр} - 1} \ell n \alpha \right]} \right\}^{-1}; \quad (14)$$

$$\delta_s = \frac{\psi_p + 0.03}{1 - \psi_p}; \quad (15)$$

$$d = \frac{t}{1 - (1 - \psi_k)^{0.482}}; \quad (16)$$

где KCV – ударная вязкость на образцах типа Шарпи; E – модуль упругости; ν – коэффициент Пуассона; ρ_s – эффективное значение радиуса в вершине концентратора, равное структурному параметру материала; k – безразмерный коэффициент пропорциональности, предложенный В.С. Гиренко; ψ_p – относительное равномерное сужение образца, зависящее от ψ_k ; d – диаметр оправки при изгибе образца на 180° .

Полученные зависимости позволяют расчетным путем для каждой категории сварного соединения определить нормативные требования к показателям их качества из условия хрупкого, квазихрупкого или вязкого типа разрушения. Обеспечение хладостойкости сварных соединений стальных строительных конструкций достигается в данном случае за счет назначения проектировщиком категории их ответственности.

Третья глава посвящена разработке метода расчетной оценки критических температур хрупкости элементов металлоконструкций, позволяющего с единых феноменологических позиций учитывать особенности конструктивной формы, технологии изготовления и условий их эксплуатации. Предложены новые деформационные критерии температурного интервала вязко-хрупкого перехода, раскрывающие структурно-кинетические особенности процессов пластического течения и разрушения строительных сталей.

Согласно современным представлениям, области вязкого, квазихрупкого и хрупкого состояния металла в конструкции разграничиваются первой (T_{k1}) и второй (T_{k2}) критическими температурами хрупкости, которые являются комплексными показателями механических свойств материала и используются в качестве базовых параметров при аппроксимации функции разрушающих напряжений. Проблема состоит в том, что на сегодняшний день нет согласованной точки зрения относительно критериев и метода определения этих температур. К тому же, традиционные представления о микромеханизмах хрупкого разрушения в большей мере ориентированы на описание разрушения в простейших условиях одноосного напряженного состояния. Отсутствие непротиворечивых представлений о микромеханизмах разрушения в условиях сложного напряженного состояния, а также математические трудности, связанные с расчетом локальных характеристик разрушения в условиях концентрации

напряжений, привели к тому, что в настоящее время не установлена взаимосвязь между критическими температурами хрупкости стали при одноосном и сложном напряженном состоянии. Для устранения этих недостатков разработан новый метод определения критических температур, основная идея которого состоит в возможности определения, при наличии диаграмм предельной пластичности стали и деформационных критериев первой (ϵ_{c1}) и второй (ϵ_{c2}) критических температур, температурного интервала вязко-хрупкого перехода для заданного показателя жесткости напряженного состояния (рис. 4). За диаграмму предельной пластичности стали принята зависимость степени интенсивности пластической деформации, накопленной материальной частицей на момент разрушения элемента конструкции, от показателя жесткости (Π) и вида напряженного состояния (μ_σ).

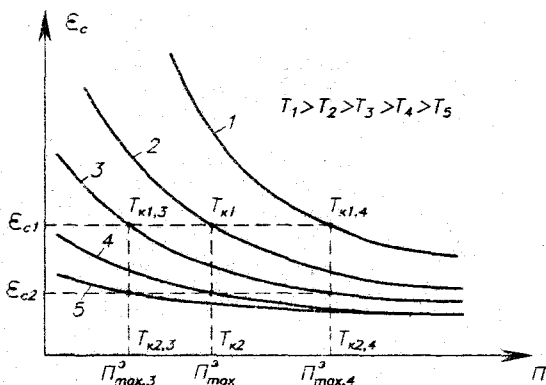


Рис. 4. Схема определения критических температур хрупкости стали при сложном напряженном состоянии
1-5 - зависимости $\epsilon_c(\Pi)$ при температурах T_1-T_5

Для реализации предложенной схемы сформулированы основные критериальные соотношения:

$$T = T_{k1}, \text{ при } \epsilon_c(\Pi_{\max}^3, \mu_\sigma, T) = \epsilon_{c1}, \quad (17)$$

$$T = T_{k2}, \text{ при } \epsilon_c(\Pi_{\max}^2, \mu_\sigma, T) = \epsilon_{c2}. \quad (18)$$

Решение (17) и (18) относительно T осуществляется на основе зависимостей Н.А.Махутова, которые справедливы для одноосного напряженного состояния

$$\psi_k^i = \psi_k \left[1 - \left(\frac{\sigma_T^i - \sigma_T}{S_x - \sigma_T} \right)^{n_w} \right], \quad (19)$$

$$\sigma_T^i = \sigma_T \cdot \exp \left[\beta_T \left(\frac{1}{\Gamma} - \frac{1}{\Gamma_0} \right) \right], \quad (20)$$

где ψ_k, ψ_k^1 – величины относительного сужения при температурах $T_0=293$ К и T соответственно; β_T, n_ψ – характеристики материала.

Использование (19) для определения критических температур хрупкости стали при сложном напряженном состоянии потребовало введения дополнительного условия

$$T_{k1(2)}(\epsilon_c, \Pi) \Big|_{\Pi=\Pi_1} = T_{k1(2)}(\epsilon_c, \Pi) \Big|_{\Pi=\Pi_{max}^2}, \quad (21)$$

которое позволило уточнить (рис. 5) критериальные соотношения (16) и (17):

$$\epsilon_c(\Pi_1, \mu_\sigma, T) = \epsilon_{f1}, \quad (22)$$

$$\epsilon_c(\Pi_1, \mu_\sigma, T) = \epsilon_{f2}. \quad (23)$$

где $\epsilon_{f1}, \epsilon_{f2}$ – приведенные деформационные критерии первой и второй критических температур хрупкости стали.

Решая совместно (19), (20), (22) и (23) относительно T , получены зависимости для T_{k1} и T_{k2} , которые имеют вид

$$T_{k1(2)} = \frac{T_0}{1 + \frac{T_0}{\beta_T} \ln \left[1 + \left(\frac{S_k}{\sigma_T} - 1 \right) \cdot \left(1 + \frac{1 - \exp \epsilon_{f1(2)}}{\psi_k \cdot \exp \epsilon_{f1(2)}} \right)^{\frac{1}{n_\psi}} \right]}, \quad (24)$$

где коэффициент n_ψ в первом приближении принимается равным 1,0 для расчета T_{k1} и 0,5 – для T_{k2} .

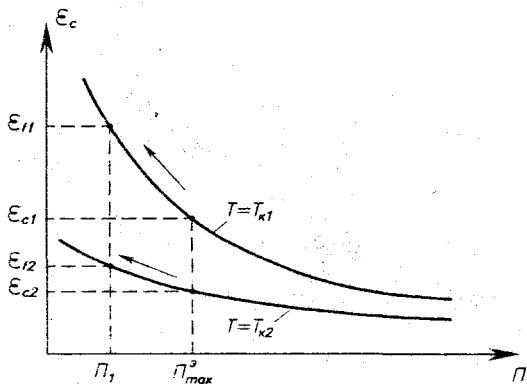


Рис. 5. Графическая иллюстрация условия (21)

Согласно рис. 5, для расчета ϵ_{f1} и ϵ_{f2} необходимо иметь сведения о $\epsilon_{c1}, \epsilon_{c2}$ и диаграмме предельной пластичности металла. Для определения ϵ_{c1} и ϵ_{c2} проанализированы результаты исследований Г.П. Карзова, В.А. Лихачева, В.Г. Малинина, В.Е. Панина, В.В. Рыбина, на основании которых принято допущение, что развитие разрушения на j -ом масштабном уровне (M_j) в состоянии

возникнуть только тогда, когда выполняются два требования: интегральная интенсивность пластической деформации достигнет критического значения сдвиговой устойчивости, характерного для данного масштабного уровня, и будет обеспечен силовой критерий раскрытия трещины. Так как начало процесса локализации связано с равномерной составляющей пластической деформации, предложено величину $\epsilon_p(M_j)$ принять за критическое значение степени сдвиговой устойчивости, соответствующей образованию зародышевой трещины j -го ранга на M_j масштабном уровне. В качестве критерия развития трещины целесообразно принять условие достижения максимальным главным напряжением σ_1 величины сопротивления нормального отрыва, характерного для данного масштабного уровня. При этом, чтобы трещина была неустойчива в отношении развития разрушения по всему сечению образца, достаточно потребовать выполнения условия $\sigma_1 \geq S_k(\epsilon_i^n)$. С учетом принятых допущений, а также результатов исследований Г.П. Карзова, Л.А. Копельмана, Б.З. Марголина, Ю.Я. Мешкова критерий квазихрупкого разрушения поликристаллического твердого тела при сложном напряженном состоянии можно записать как

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_i^n &\geq \epsilon_p(M_j); \\ \sigma_1 &\geq S_k(\epsilon_i^n), \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

где ϵ_i^n – текущая величина степени пластической деформации; $\epsilon_p(M_j)$ – величина равномерной составляющей предельной пластической деформации на j -ом масштабном уровне.

Принципиальное отличие критерия (25) от известных аналогов (Г.П. Карзов, Л.А. Копельман, Б.З. Марголин) состоит в том, что он отражает структурно-кинетический характер разрушения поликристаллического твердого тела, который представлен в виде смены масштабного уровня пластического течения M_j . Переход с одного масштабного уровня (M_{j-1}) на другой (M_j) связан с образованием новых трещин $\ell_{c,j} \gg \ell_{c,j-1}$, причем трещины j -го ранга появляются только после зарождения и стабилизации трещин $(j-1)$ -го ранга.

Из анализа (25) следует, что в качестве деформационных критериев верхней и нижней границ температурного интервала вязко-хрупкого перехода необходимо принять следующие условия:

$$\epsilon_{c1}(\Pi, \mu_\sigma, T) = \epsilon_p(M_j) \Big|_{M_j=M_3}; \quad (26)$$

$$\epsilon_{c2}(\Pi, \mu_\sigma, T) = \epsilon_p(M_j) \Big|_{M_j=M_2}. \quad (27)$$

Количественные значения ϵ_{c1} , ϵ_{c2} предлагается определять через стандартные характеристики механических свойств, используя для этого результаты исследований Н.А. Махутова

$$\epsilon_{c1} = \epsilon_n \left[1 - \psi_k \frac{1 - \sigma_T / \sigma_n}{1 + 1,4 \psi_k - \sigma_T / \sigma_n} \right]^{-1}, \quad (28)$$

$$\varepsilon_{c2} = \ell n \left[1 - 11,36 \cdot 10^{-2} \psi_k \frac{1 - \sigma_T / \sigma_B}{1 + 1,4 \psi_k - \sigma_T / \sigma_B} \right]^{-1} \quad (29)$$

Согласно рис. 5, переход от ε_{c1} и ε_{c2} к ε_{f1} и ε_{f2} осуществляется по диаграмме предельной пластичности металла, которая строится по результатам испытаний специальных образцов. Для определения $\varepsilon_c(\Pi, \mu_\sigma)$ расчетным методом получено уравнение предельной пластичности металла при сложном напряженном состоянии, которое раскрывает ее связь с внешними (Π, μ_σ) и внутренними ($\Delta, \Pi_{кр}$) параметрами состояния материала в конструкции

$$\varepsilon_c = \varepsilon_f \exp \left[\frac{\Pi - \Pi_1}{2\Pi_{кр}} \ell n \Delta + \frac{\Pi_{кр} - \Pi}{\Pi_{кр} - \Pi_1} \ell n \alpha \right], \quad (30)$$

Здесь ε_f — предельная пластичность при $\Pi=1, \mu_\sigma=1$; Δ — универсальная постоянная разрушения; $\Pi_{кр}$ — критическое значение показателя жесткости напряженного состояния; α — коэффициент, учитывающий влияние вида напряженного состояния.

Решая (30) относительно ε_f для случаев, оговоренных в (22) и (23), получим расчетную зависимость для определения приведенных деформационных критериев первой и второй критических температур хрупкости стали:

$$\varepsilon_{f1(2)} = \frac{\varepsilon_{c1(2)}}{\exp \left[\frac{\Pi - \Pi_1}{2\Pi_{кр}^{(1(2))}} \ell n \Delta + \frac{\Pi_{кр}^{(1(2))} - \Pi}{\Pi_{кр}^{(1(2))} - \Pi_1} \ell n \alpha \right]} \left(\frac{F}{F_0} \right)^{m_\psi} \quad (31)$$

Здесь F, F_0 — площади поперечного сечения рассчитываемого элемента и стандартного образца соответственно; m_ψ — характеристика материала, принимаемая по результатам исследования Н.А. Махутова; $\Pi_{кр}^{(1(2))}$ — критическое значение показателя жесткости напряженного состояния при $T=T_{к1(2)}$

Помимо температуры и концентрации напряжений, к числу наиболее вероятных причин хрупкого разрушения относят неблагоприятную структуру, низкую пластичность и вязкость материала, которые возникают в результате технологических и эксплуатационных воздействий на металл и не учитываются при проектировании строительных конструкций. В рамках развиваемого подхода учет влияния этих воздействий на склонность стали к хрупкому разрушению осуществляется через приведенный показатель жесткости напряженного состояния

$$\Pi_{кр}^{пр} = \Pi_1 + \frac{2\Pi_{кр} \ell n(\varepsilon_{oc}/\varepsilon_f)}{\ell n \Delta} + \frac{\Pi_{кр} - \Pi_{кр}^3}{\Pi_{кр} - \Pi_1} \ell n \alpha, \quad (32)$$

где ε_{oc} — величина остаточной пластичности металла.

На стадии постановки задачи было определено два расчетных случая:

1) проектировщик не располагает сведениями о влиянии внешних воздействий на склонность стали к хрупкому разрушению;

2) в распоряжении проектировщика имеются результаты экспериментальных исследований по влиянию внешних воздействий на смещения критических температур хрупкости стали, но они получены на образцах, которые отличаются от рассчитываемого элемента по показателю вида и жесткости напряженного состояния.

В первом случае для определения ϵ_{oc} используется зависимость А.А. Богатова

$$\epsilon_{oc} = \epsilon_c (1 - \omega_n)^{\frac{1}{a_{oc}}}, \quad (33)$$

где a_{oc} — коэффициент, характеризующий интенсивность пластического разрушения металла; ω_n — относительная мера накопленной поврежденности, изменяющаяся от 0 до 1.

Для определения величины ω_n предлагается воспользоваться имеющимися математическими моделями и методами ее расчета (работы А.А. Богатова, А.П. Гусенкова, Р.С. Зайнулина, В.П. Когаева), которые прошли многократную экспериментальную проверку и успешно используются на практике.

Во втором случае для определения ϵ_{oc} разработан алгоритм приведения смещений критических температур хрупкости, полученных на различных образцах, к эквивалентной степени деформации при одноосном напряженном состоянии и предложены расчетные зависимости:

$$\epsilon_{oc} = \epsilon_n \left[\frac{1}{1 - \psi_k^{nc} + \sum_{j=1}^n \Delta\psi_k^j} \right], \quad (34)$$

$$\Delta\psi_k^j = \psi_k^{nc} - \psi_{fl(2)} \left[1 - \frac{-1 + \exp \left[\beta_T \left(\frac{1}{T_{к1(2)} + \Delta T_{к1(2)}^j} - \frac{1}{T_0} \right) \right]}{\frac{S_k - 1}{\sigma_T}} \right]^{n_w} \right]^{-1}, \quad (35)$$

где $\Delta T_{к1(2)}^j$ — смещения первой (второй) критической температуры хрупкости металла от воздействия j -го фактора.

Учитывая объем базы данных по $\Delta T_{к1(2)}^j$, а также точность определения $\Delta T_{к1(2)}^j$ и n_w , при расчете $\Delta\psi_k^j$ следует использовать $\Delta T_{к1}^j$. В качестве примера учета влияния технологических воздействий на склонность стали к хрупкому разрушению приведен расчет смещения порога хладноломкости стали СтЗкп ($\Delta T_{к1}^{nn}$) после предварительного пластического деформирования (ϵ_{en}) на 2, 4, 10% при варьировании K , от 1,0 до 5,0. Полученные результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными В.М. Горичко, Ю.Я. Мешкова, П.Д. Одесского, а также собственными исследованиями автора и наглядно иллюстрируют возможности предлагаемого метода по дифференцированному учету

технологических и эксплуатационных воздействий на металл. В частности, из результатов расчета следует, что величина $\Delta T_{к1}^{nn}$, в зависимости K_t и $\epsilon_{пл}$, изменяется от 1 до 67°C , в то время как в методе ЦНИИПСКА $\Delta T_{к1}^{nn}=20^{\circ}\text{C}$, а в методе СНиП II-23-81* влияние деформационного старения на склонность стали к хрупкому разрушения вообще не принимается во внимание.

Проверка точности (24) проводилась сравнением расчетных и экспериментальных значений $T_{к1}$ и $T_{к2}$, для чего были обработаны результаты исследований Ю.Я. Мешкова и Т.Н. Сердитовой. Из анализа полученных данных следует, что наблюдаемое расхождение, в среднем, не превышает 5-7%, а максимальное - 11% (рис. 6). Это позволяет рекомендовать (24) для расчета элементов конструкций на прочность с учетом хрупкого разрушения и для анализа вариантов конструктивно-технологических решений при разработке типовых проектов стальных конструкций для северной строительноклиматической зоны.

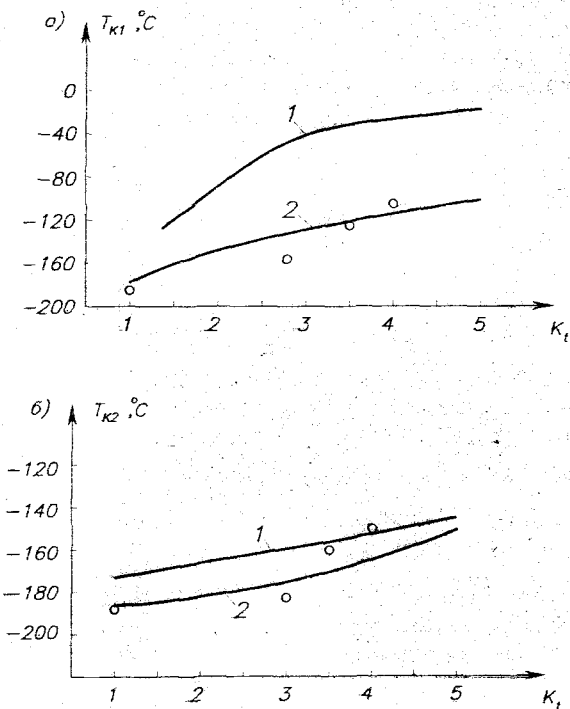


Рис. 6. Оценка точности расчета $T_{к1}$ (а) и $T_{к2}$ (б) для стали СтЗкп по методу ЦНИИПСКА (1) и предлагаемому методу (2)

В четвертой главе проведено исследование технологической дефектности сварных соединений, достоверности радиографического контроля и управляемости типовых процессов сварки на примере стальных вертикальных резервуаров (РВС) для нефти и нефтепродуктов.

Согласно рис. 1, для определения требований по допустимой дефектности необходимо исследовать структуру и определить параметры функций распределения количества и размеров технологических дефектов сварных соединений. При изучении дефектности многие специалисты за показатель "качества" процесса принимают среднее число дефектов на контрольном участке, не проводя дополнительных исследований по распределению данного параметра в пределах изучаемой выборки. Считаю подобный подход не совсем правильным, так как, во-первых, данный показатель сильно зависит от объема выборки, а во-вторых, он теряет математическую корректную связь с надежностью сварного соединения при нарушении пуассоновского характера потока дефектов. Поэтому исследования структуры и параметров дефектности сварных соединений проведены в комплексе с оценкой стабильности технологического процесса, которая показала, что в целом, типовой технологический процесс сварки рулонных заготовок РВС находится в управляемом состоянии. Это позволяет использовать его в качестве объекта для статистических исследований дефектности сварных соединений.

С целью повышения надежности сведений о дефектности сварных соединений производилась оценка достоверности радиографического контроля, для чего был изготовлен канавочный эталон конструкции ЦНИИПСК, который использовался при просветке образцов с дефектами. Просвеченные образцы подвергались вскрытию, после чего со снимков и с проявившихся на шлифе дефектов снимались их геометрические характеристики. В результате выполненных исследований установлено, что достоверность рентгенографического контроля для нетрещиноподобных дефектов достаточно велика и обычно идет в запас прочности. Статистически значимое отличие наблюдается лишь между длиной непровара, определенной по снимку и по результатам вскрытия, однако и оно не превышает 1 мм и практически не влияет на результаты расчетов свойств металла по выражению (13).

После оценки стабильности процесса сварки и достоверности радиографического контроля изучались состав и структура технологической дефектности сварных соединений. Полученная картина структуры и геометрических характеристик технологических дефектов, в целом, совпадает с общепринятыми представлениями (В.Н. Волченко, Г.П. Карзов, В.В. Москвичев, А.М. Лепихин). Преобладающим видом дефектов при сварке рулонных заготовок РВС являются поры. Их доля изменяется от 50 до 90 процентов от всех выявляемых дефектов. Далее следуют шлаковые включения, доля которых не превышает 30%. Непровары составляют порядка 5...10% от общей поврежденности сварных соединений, а подрезы (не удаленные после визуального контроля) – не более 3%. Как показали результаты обработки снимков, появление трещины для исследуемых марок сталей и толщин есть

событие исключительное, хотя и не невозможное. При соблюдении технологии сварки можно считать, что трещины в рассматриваемом изделии не возникают.

В результате обработки исходной информации было установлено (табл. 2), что среднестатистический диаметр поры составляет 0,64 мм, длина шлакового включения – 2,5 мм, глубина подреза – 1,2 мм, а типичная длина непровара – 26 мм. Протяженность газовых скоплений составляет 60...170 мм. Наиболее вероятное местоположение одиночных пор на глубине $\approx 20\%$ от толщины шва. Непровары, как правило, возникают в корне шва, которые при данной технологии сварки находятся на глубине 30...50% от толщины шва.

На основании проведенных исследований установлено, что наиболее вероятным событием является появление на контрольном участке одиночной поры – более 45% случаев. Появление двух одиночных пор зафиксировано в 23% случаев, трех и более – в трех процентах. Одиночные шлаковые включения встречаются значительно реже пор – приблизительно в 7% случаев. Отсюда это обусловлено погрешностями разбраковки снимка, поскольку не всегда возможно однозначно отличить след поры от шлака. Два и более шлаковых включения появляются на контрольном участке приблизительно в 2% случаев. Совместное появление пор и шлака зафиксировано приблизительно на 7% снимков.

Таблица 2

Размеры обнаруженных дефектов (диаметры пор, длины непроваров и включений, глубина подреза)

Вид дефекта	Среднее, мм	Наименьший размер, мм	Наибольший размер, мм	Стандарт, мм
Пора (А)	0,64	0,4	2,0	0,24
Включение (В)	2,5	0,4	12,5	2,4
Непровар (D)	26,5	3,0	140	26,1
Подрез (F)	1,2	0,25	2,6	0,7

Примечание: при длине непровара более 100 мм размер контрольного участка принимался равным 300 мм.

Особый интерес представляет совместное появление на контрольном участке трещиноподобных и сферических дефектов. Так, например, вероятность возникновения пор или шлака и непровара на одном участке (при условии, что он точно содержит какой-либо дефект) составляет приблизительно 5%. Одиночные непровары обнаруживаются на 3,5% дефектных участков, два и более непровара появляются менее чем на одном 1% снимков.

Для расчета надежности сварного соединения исходные данные по размерам выявленных дефектов аппроксимировались теоретическими распределениями. Статистическими критериями установлено, что распределение диаметров пор можно с достаточной точностью охарактеризовать двухпараметрическим законом Вейбула. Площади шлаковых включений описываются логарифмически нормальным распределением. Длина трещиноподобного дефекта типа непровар хорошо аппроксимируется экспоненциальным, а глубина логарифмически нормальным распределением.

В практическом плане, для составления норм допустимой дефектности, в качестве функции распределения вероятностей их размеров может быть использован двухпараметрический закон Вейбулла, частным видом которого является экспоненциальное, а в отдельных случаях и логарифмически нормальное распределение.

Пятая глава посвящена исследованию остаточных напряжений в элементах сварных металлоконструкций большой толщины (25...50мм) и комплексной оценке влияния остаточных напряжений, технологических дефектов и ремонта дефектных участков на вязкость разрушения металла сварного соединения.

Остаточные напряжения и ремонт дефектных участков сварных швов являются неблагоприятными последствиями технологического процесса изготовления, что ясно видно из анализа причин аварий сварных металлоконструкций. Поскольку на существующем уровне технологии производства избежать этих последствий не удастся, их необходимо учитывать при определении нормативных требований к показателям качества сварных соединений.

Принимая во внимание степень значимости остаточных напряжений, а также недостаточную изученность кинетики σ_{oc} в элементах металлоконструкций с многопроходными сварными швами большой толщины, в настоящей работе проведены исследования остаточных напряжений в бесфасоночном трубчатом узле морской стационарной платформы на всех технологических переделах. Узел был изготовлен на Бакинском заводе глубоководных оснований из сталей 09Г2С и 12ХГДАФ с толщиной стенки патрубков 20...25мм и основной трубы (обечайки) 50мм. Технология изготовления узла включала в себя операции правки, гибки, сварки и термической обработки, оказывающие существенное влияние на σ_{oc} .

Величину σ_{oc} определяли методом "отверстия" с помощью тензорезисторов КФСРЗ и измерителя деформаций ИДЦ-1. В результате проведенных исследований установлено, что в листовом металлопрокате толщиной 40...50мм (состояние поставки) уровень растягивающих остаточных напряжений достигает 80 МПа вдоль прокатки и 65 МПа поперек. Правка и гибка металлопроката на радиус (вальцовка) приводят к существенному изменению поля остаточных напряжений, величина которых достигает 300 МПа. Однако последующая калибровка уменьшает максимальную величину растягивающих σ_{oc} до 120...160 МПа.

Характер поля остаточных напряжений в сварных швах существенно отличается от поля остаточных напряжений в основном металле. Максимальными являются продольные остаточные напряжения, достигающие предела текучести металла шва. Уровень остаточных напряжений поперек шва также высок и составляет 0,5...0,7 σ_s .

Для снижения остаточных напряжений и частичного восстановления пластических свойств металла все трубчатые узлы МСП проходят термическую обработку. Как показали результаты исследований, высокотемпературный отпуск существенно, в 2...3 раза, снижает максимальный уровень остаточных напряжений в сварных соединениях. В зоне термического влияния угловых швов

крепления патрубков к основной трубе величина остаточных напряжений составляет 120...150 МПа.

При выполнении сварных соединений на монтажной площадке, а в ряде случаев и в заводских условиях, не всегда представляется возможным провести термическую обработку, поэтому для уменьшения скорости охлаждения и снижения σ_{oc} рекомендуют проводить предварительный подогрев свариваемых кромок. Для исследования влияния температуры предварительного подогрева на величину σ_{oc} были заарены полномасштабные образцы, имитирующие тавровое соединение элемента палубы МСП. Температура предварительного подогрева принималась равной: 20, 120, 200 и 300°C.

Как показали результаты исследования, рекомендуемая нормами температура предварительного подогрева $T_{п}=120...160^{\circ}\text{C}$ не оказывает существенного влияния на величину остаточных сварочных напряжений. Для снижения σ_{oc} более чем на 50% $T_{п}$ для сталей типа 12ХГДАФ, 10ХСНД, 14Г2ДАФ толщиной 40–50мм должна быть не ниже 300°C.

Исследование влияния технологических дефектов и остаточных напряжений на ударную вязкость металла сварного соединения осуществлялось расчетным путем с использованием формулы (13). При расчете KCV все типы внутренних несплошностей моделировались в виде эллиптической, а поверхностных – полуэллиптической трещины нормального отрыва. Границы варьируемых параметров назначались с учетом результатов, полученных в четвертой главе, а также действующих в строительстве нормативных документов.

Для учета эффекта релаксации σ_{oc} от действия внешней нагрузки использовались зависимости Н.А. Махутова и В.И. Макаренко, в которые была внесена поправка, учитывающая повышение предела текучести металла шва за счет жесткости напряженного состояния, создаваемого σ_{oc} . Для точек, расположенных в пределах зоны металла шва, нерелаксируемую часть остаточных напряжений следует рассчитывать по формуле

$$\sigma_{oc} = \sigma_{oc}^{\max} \left[0,71 - 0,75 \cdot \left(\frac{\alpha^m \sigma_n}{\sigma_T} \right)^2 \right], \quad (36)$$

а для точек, расположенных на линии сплавления и в перпендикулярном от оси шва направлении, по формуле

$$\sigma_{oc} = \sigma_{oc}^{\max} \left[1 - \left(\frac{X}{b_n} \right)^2 \right] \cdot \left[0,79 - 0,62 \cdot \left(\frac{\alpha^m \sigma_n}{\sigma_T} \right) \right]. \quad (37)$$

Здесь σ_{oc}^{\max} – максимальные остаточные напряжения в сварном шве; Y – координата рассматриваемой точки по оси с началом на линии сплавления и направлением, перпендикулярном сварному шву; $2b_n$ – ширина зоны растягивающих напряжений; α – численный коэффициент, учитывающий степень объемности напряженного состояния.

Влияние σ_{oc} на KCV анализировалось на примере сварных стыковых соединений из сталей СтЗсп, 09Г2С и 10ХСНД толщиной 12 и 40мм, для которых были приняты следующие допущения:

- при толщине шва до 25мм $\sigma_{x_{oc}} = \sigma_T$, $\sigma_{y_{oc}} = 0,2\sigma_T$, $\sigma_{z_{oc}} = 0$;
- при толщине шва более 25мм $\sigma_{x_{oc}} = \sigma_T$; $\sigma_{y_{oc}} = 0,8\sigma_T$; $\sigma_{z_{oc}} = 0$ - для поверхностных и $\sigma_{z_{oc}} = 0,2...0,5\sigma_T$ - для внутренних дефектов;
- направления главных площадок совпадают с системой координат, для которой $\sigma_1 = \sigma_{x_{oc}}$, $\sigma_2 = \sigma_{y_{oc}}$, $\sigma_3 = \sigma_{z_{oc}}$.



Рис. 7. Минимальные требования к ударной вязкости сварного соединения из стали С345 толщиной 40мм в зависимости от типа размера дефекта

Из результатов расчета следует, что при существующих в строительных нормах требованиях к ударной вязкости металла шва ($KCU=29M$ Дж/м² или $KCV=13,5$ МДж/м²) и сложившемся уровне производства сварочных работ неблагоприятное влияние σ_{oc} актуально при хрупком (рис. 7), а для

высокопрочных сталей и квазихрупком состоянии материала в конструкции. Причем существенное влияние на работоспособность сварного соединения из сталей повышенной и высокой прочности могут оказать поры и шлаковые включения, выходящие на поверхность.

При хрупком состоянии материала в конструкции снижение σ_{oc} до $0,5\sigma_T$ приводит к уменьшению нормативных требований к ударной вязкости металла сварных соединений на 20...25%, а до $\sigma_{oc}=0$ – на 37...42%. При вязком состоянии материала в конструкции влиянием остаточных сварочных напряжений можно пренебречь независимо от типа и размера дефекта. Технологические мероприятия, приводящие к снижению σ_{oc} менее чем на 20%, не имеют практического значения.

Негативное влияние исправления дефектных участков на надежность сварного соединения известно давно (работы В.А. Батманова, А.С. Волкова, В.И. Панова, и др.), однако исследований по количественной оценке снижения трещиностойкости сварного шва после проведения ремонтно-восстановительных работ практически не проводилось. В этой связи не совсем ясна мотивация нормативных ограничений на количество ремонтов одного и того же участка, его механические свойства, размеры и количество допустимых на данном участке дефектов. Для изучения этого вопроса проведены испытания на ударную вязкость (рис. 8), а также на растяжение и статический изгиб (рис. 9) заваренных и отремонтированных сварных соединений разной толщины и марки стали в диапазоне климатических температур. Обработка результатов показала, что на величину ударной вязкости значимо (на уровне 0,95) влияют линейные эффекты ремонта и температуры, а также квадратичный эффект ремонта. При этом влияние температуры близко к линейному, а количества ремонтов к экспоненциальному закону. Снижение степени влияния последнего начинает проявляться при количестве ремонтов более двух. Следует отметить увеличение степени влияния температуры на ударную вязкость с ростом толщины свариваемых деталей, что полностью согласуется с общеизвестными представлениями о роли масштабного фактора и косвенно подтверждает достоверность полученных результатов. На основании проведенных исследований установлено существование статистически значимого влияния количества ремонтов на ударную вязкость металла сварного соединения, которое удовлетворительно описывается уравнениями типа

$$KCV_6 = KCV_6^{+20} \left[60,5 + 30,5 \left(1 - \frac{T}{20} \right) - 25,6 \left(1 - \frac{R}{2} \right) + 14 \left(1 - \frac{R}{2} \right)^2 \right]; \quad (38)$$

$$KCV_{12} = KCV_{12}^{+20} \left[61,9 + 24,5 \left(1 - \frac{T}{20} \right) - 25,8 \left(1 - \frac{R}{2} \right) + 9,7 \left(1 - \frac{R}{2} \right)^2 \right], \quad (39)$$

где KCV_6 , KCV_{12} – ударная вязкость в Дж/см²; T – температура в градусах Цельсия; R – количество ремонтов.

При регламентации технологии ремонтно-восстановительных работ с использованием сварки необходимо учитывать, что два ремонта следует считать характерной точкой смены интенсивности процесса деградации механических

свойств. Применение дополнительных технологических мероприятий по повышению служебных свойств металла шва до нормативных требований позволяет увеличить количество ремонтов для сварных соединений третьей категории до трех.

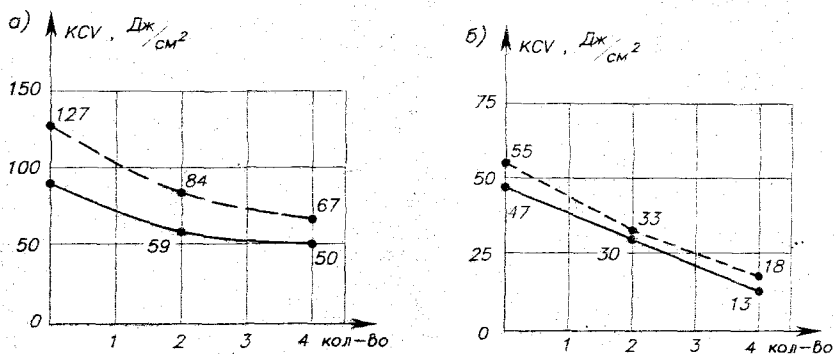


Рис. 8. Зависимость ударной вязкости металла шва при температуре +20°C (а) и -40°C (б) от количества ремонтов

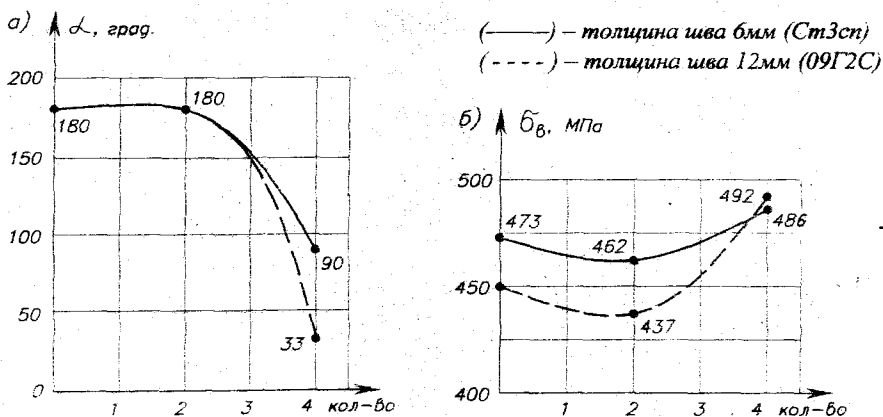


Рис. 9. Зависимости угла изгиба (а) и временного сопротивления (б) сварного соединения от количества ремонтов

Шестая глава посвящена реализации критериев и метода обеспечения сопротивления хрупкому разрушению строительных металлоконструкций на примере стальных вертикальных резервуаров (РВС), для которых критичным элементом является сварное соединение. Для повышения хладостойкости сварных соединений предложены новые нормативные требования по допустимой

дефектности и механическим свойствам, уточнена номенклатура основного и сварочного материалов. Показано, что при соблюдении разработанных рекомендаций сопротивление хрупкому разрушению элементов РВС достигается с высокой обеспеченностью.

В отличие от общестроительных металлоконструкций, вертикальные резервуары для нефти и нефтепродуктов являются потенциально более опасными с точки зрения хрупкого разрушения. Наиболее повреждаемыми для них являются сварные соединения нижних поясов стенки, на долю которых приходится около 70% причин ресурсных отказов. На примере наиболее востребованных в настоящее время вертикальных резервуаров объемом до 5000м³ показано, что существующие нормативные требования к материалам, технологическому процессу сварки и методам контроля рулонных заготовок, с одной стороны, не во всех случаях обеспечивают прочность сварных соединений, а с другой – необоснованно жестки в отношении малозначительных дефектов. Надежность сварных соединений нижних поясов стенки, рассчитанная по формуле (7), находится на уровне 0,45, чего явно недостаточно для безопасной эксплуатации конструкции.

На основании дисперсионного анализа надежности РВС установлено, что на величину $P(a_c)$ достаточно сильное влияние оказывают интенсивность потока дефектов и свойства материала. Как и следовало ожидать, надежность соединения падает с увеличением числа дефектов и повышается с ростом их критической длины. Увеличение объема неразрушающего контроля в два раза относительно нормативного не оказывает значимого влияния на надежность резервуара.

Таблица 3

Нормативные требования к механическим свойствам металла сварных соединений РВС

Наименование характеристики	Нормативное значение характеристики в зависимости от класса прочности стали по ГОСТ 27772-88			
	C235–C285	C315–C375	C390–C440	C590
	не менее (для диаметра оправки и твердости не более)			
Временное сопротивление, МПа	400	510	590	685
Предел текучести, МПа	285	375	440	590
Ударная вязкость, Дж/см ²	29	34	39	49
Относительное сужение, %	50	45	40	35
Относительное удлинение, %	21	18	16	12
Диаметр оправки при испытании на изгиб	$\frac{2t}{3t}$	$\frac{2,5t}{4t}$	$\frac{2,5t}{4t}$	$\frac{3t}{5t}$

Примечание: в числителе приведены требования к диаметру оправки при испытании компактных образцов, а в знаменателе – при испытании “широких” пластин.

Для повышения работоспособности сварных соединений, являющихся критичными элементами и лимитирующими хладостойкость конструкций РВС, разработан классификатор сварных соединений по категориям ответственности, обоснованы показатели допустимой дефектности и рассчитаны по формулам (13)–(16) минимальные требования к механическим свойствам металла шва из условия хрупкого разрушения (табл. 3). Для обеспечения требований табл. 3 уточнена номенклатура и область применения основного и сварочного материалов, используемых для изготовления конструкций РВС. На примере сварных соединений из сталей СтЗсп и 09Г2С показано, что ударная вязкость металла шва и зоны термического влияния сварных соединений, выполненных с использованием рекомендуемых сварочных материалов в 3...4 раза превышает требования табл. 3.

С учетом разработанных рекомендаций выполнен расчет на прочность с учетом хрупкого разрушения вертикального сварного шва нижнего пояса РВС-2000 с, который свидетельствует о высокой обеспеченности хладостойкости данной конструкции во всем диапазоне климатических температур.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Существующая нормативная база на проектирование, изготовление, ремонт и усиление сварных металлоконструкций, эксплуатируемых при воздействии низких температур, не имеет достаточного научного обоснования. Как следствие, при снижении температуры окружающей среды ниже -20°C в 2...3 раза увеличивается интенсивность потока отказов, в 3 и более раз снижаются показатели наработки конструкций, существенно увеличивается тяжесть экономических и экологических последствий от аварий. По причине неприспособленности сварных конструкций из малоуглеродистых и низколегированных сталей к эксплуатации в северной строительноклиматической зоне происходит около 20% от общего числа отказов.

2. Установлено, что хрупкое разрушение стальных строительных конструкций является сложным событием, которое зарождается от трещиноподобного дефекта сварного соединения и развивается по сечению элемента с пониженной вязкостью материала. Механизм протекания этих стадий существенно различается, поэтому для обеспечения хладостойкости конструкций использован системный подход, предусматривающий их декомпозицию на сварные соединения и узлы.

3. Для обеспечения сопротивления хрупкому разрушению на уровне сварного соединения разработан метод комплексного нормирования показателей его качества, в котором прочность металла шва достигается за счет регламентации механических свойств при известном уровне дефектности, сформировавшемся в условиях стабильного технологического процесса. Предложен метод классификации сварных соединений по категориям ответственности, учитывающий назначение и условия эксплуатации конструкции, характер и вид напряженного состояния, а также физико-химические свойства соединяемых элементов.

4. Разработаны критериальные соотношения предельного состояния сварного соединения с дефектом, являющиеся граничными условиями математической модели его надежности. Получены расчетные зависимости для определения нормативных значений показателей пластичности и ударной вязкости металла сварного соединения, в зависимости от класса прочности стали, уровня нагруженности, типа и размеров допустимых дефектов.

5. Предложены новые деформационные критерии температурного интервала вязко-хрупкого перехода, отражающие структурно-кинетические особенности процессов пластического течения и разрушения строительных сталей. Показано, что процесс охрупчивания металла следует рассматривать как исчерпание его релаксационной способности за счет самоорганизации внутренней структуры, а само явление вязко-хрупкого перехода – как смену масштабных уровней потери сдвиговой устойчивости.

6. В рамках деформационного подхода разработан метод определения критических температур хрупкости элементов металлоконструкций, позволяющий с единых феноменологических позиций дифференцированно учитывать особенности влияния напряженного состояния, технологии изготовления и условий эксплуатации конструкции на склонность стали к хрупкому разрушению. Для практического использования разработанного метода получено уравнение предельной пластичности металла при сложном напряженном состоянии, раскрывающее ее связь с внешними (показателем жесткости P , Лоде-Надаи μ_c) и внутренними (универсальной постоянной разрушения Δ , критической жесткостью $P_{кр}$) параметрами состояния материала в конструкции.

7. На основании статистического анализа результатов неразрушающего контроля сварных соединений рулонизируемых РВС установлено, что:

– при наличии у изготовителя металлоконструкций системы менеджмента качества типовые технологические процессы заводской сварки можно считать стабильными и статистически управляемыми. Это позволяет рекомендовать разработанный во второй главе метод нормирования показателей качества сварного соединения для практического применения;

– полученные данные о структуре и геометрических характеристиках технологических дефектов сварных соединений, в целом, совпадают с общепринятыми представлениями, что свидетельствует об их статистической устойчивости. Отличие состоит в том, что в условиях стабильного технологического процесса сварки среднестатистические размеры трещиноподобных дефектов, преимущественно по длине, оказались значительно меньше (в 5-6 раз), чем представлялось ранее.

8. Выполнен анализ структуры технологической дефектности сварных стыковых соединений, определены вероятностные модели и параметры функций распределения геометрических размеров и характеристик потока дефектов. Показано, что распределение дефектов в сварных соединениях представляет собой пуассоновские ансамбли, а в качестве модели распределения вероятностей

их размеров, для оценки норм допустимой дефектности, может быть использован двухпараметрический закон Вейбулла.

9. Проведены экспериментальные исследования остаточных напряжений в сварных узлах крупногабаритных конструкций, которые показали, что

– в сварных соединениях с многопроходными швами толщиной 25...50мм величина σ_{oc} в продольном направлении ($\sigma_{x_{oc}}$) достигает $\sigma_T^{M.M.}$, а в поперечном ($\sigma_{y_{oc}}$) – $0,7...0,8\sigma_T^{M.M.}$;

– предварительный подогрев свариваемых кромок до 120...160^oC снижает величину остаточных сварочных напряжений на 15...20%. Для снижения σ_{oc} более чем на 50% величина $T_{п.}$ в зависимости от толщины и класса прочности стали, должна составлять 200...450^oC;

– высокотемпературный отпуск узлов конструкций для снятия остаточных напряжений не всегда приводит к желаемому результату. В частности, в сварных соединениях бесфасоночных трубчатых улов МСП величина σ_{oc} , после термической обработки, достигает 120...150 МПа.

10. Выявлено, что существующие нормативные требования к ударной вязкости стали и сварных соединений не гарантируют сопротивление хрупкому разрушению элементов металлоконструкций, даже при отсутствии в них остаточных напряжений. Снижение σ_{oc} до $0,5\sigma_T$ приводит к уменьшению нормативных требований к ударной вязкости металла сварных соединений в области хрупкого разрушения на 20...25%, а до $\sigma_{oc}=0$ – на 37...42%. При вязком состоянии материала в конструкции влиянием остаточных сварочных напряжений можно пренебречь, независимо от типа и размера дефекта.

11. Установлено статистически значимое влияние количества ремонтов на ударную вязкость металла сварного соединения, которое удовлетворительно описывается уравнениями типа (38), (39). Два ремонта следует считать характерной точкой смены интенсивности процесса деградации механических свойств, что необходимо учитывать при регламентации технологии ремонтно-восстановительных работ с использованием сварки.

12. На примере типовых резервуаров объемом до 5 тыс.м³ показано, что существующий уровень проектирования и изготовления стальных конструкций не гарантирует их надежность в отношении сопротивления хрупкому разрушению. Для снижения риска хрупкого разрушения рассчитаны научно-обоснованные нормативные требования к показателям допустимой дефектности и механических свойств сварных соединений, уточнена номенклатура основного и сварочного материалов для изготовления конструкций РВС. При соблюдении разработанных рекомендаций сопротивление хрупкому разрушению стальных вертикальных резервуаров будет обеспечено.

Основные результаты по теме диссертации опубликованы в следующих работах.

1. Остаточные напряжения в сварных элементах морских стационарных платформ/ Р.Г. Губайдулин, С.Г. Иванов, А.К. Тиньгаев и др// Автоматическая сварка. – 1989. – №8. – С.39–41.

2. Тиньгаев А.К. Оценка статической прочности сварных соединений с V-образным концентратором// Металлические и пластмассовые конструкции: Тематический сборник научных трудов. – Челябинск: ЧГТУ, 1990.– С.37–41.
3. Влияние технологических воздействий на свойства металла сварных соединений сталей 09Г2СШ и 12ХГДАФ/ Н.А. Клыкков, Р.Г. Губайдулин, А.К. Тиньгаев, А.В. Пуйко// Сварочное производство.– 1990.–№ 1.– С.14–16.
4. Технология и технико-экономические показатели различных конструктивных решений ледостойких стационарных платформ/ Р.Г. Губайдулин, И.В. Сидоров, А.К. Тиньгаев и др.// Технология судостроения.–1990. – № 9. – С.50-52.
5. Влияние технологических и эксплуатационных факторов на несущую способность сварных соединений морских стационарных платформ/ Р.Г. Губайдулин; А.К. Тиньгаев, М.Р. Губайдулин, Е.В. Пшеничникова// Технология судостроения. – 1990. – № 9. – С.79–84.
6. Повышение ударной вязкости металла соединительных деталей магистральных трубопроводов/ В.И. Большаков, Р.Г. Губайдулин, А.К. Тиньгаев и др.// Металловедение и термическая обработка металлов.– 1992.– № 5.– С.8–10.
7. ВСН 39-3.3.1292.4.91. Конструкции стальные морских стационарных платформ. Правила производства и приемки работ/ Р.Г. Губайдулин, И.В. Сидоров, А.К. Тиньгаев и др.// Миннефтегазпром СССР. – М: ВНИИОЭНГ, 1991.– 67 с.
8. Оценка влияния смещения кромок в кольцевых стыковых соединениях на прочность конструкций морских стационарных платформ/ Н.А.Клыкков, Р.Г. Губайдулин, М.В. Шахматов, А.К. Тиньгаев и др.// Судостроение. – 1991. – № 8. – С.29–32.
9. Губайдулин Р.Г., Тиньгаев А.К. Расчет металлических конструкций и сварных соединений на прочность с учетом хрупкого разрушения: Учебное пособие.– Челябинск: ЧГТУ, 1992. – 38 с.
10. Губайдулин Р.Г., Тиньгаев А.К. Расчетная оценка несущей способности элементов морских стационарных платформ при квазихрупком и хрупком разрушении// Металлические конструкции: Научная информация Выпуск 1.– Киев: АКМЕК, 1993.– С.53–76.
11. Губайдулин Р.Г., Тиньгаев А.К. Метод расчета статической прочности морских стационарных платформ с учетом их сопротивления хрупкому разрушению// Известия вузов. Строительство. – 1994.– № 3. – С.8–12.
12. Тиньгаев А.К., Губайдулин Р.Г. Повышение несущей способности сварных соединений морских стационарных платформ// Вопросы сварочного производства: Тематический сборник научных трудов Челябинск: ЧГТУ.– 1994.– С.76-82.
13. Тиньгаев А.К., Губайдулин Р.Г. Исследование влияния технологических воздействий на коррозионную стойкость стали и сварных соединений морских стационарных платформ //Исследования по строительным конструкциям. Тематический сборник научных трудов ЧГТУ, Челябинск: ЧГТУ. – 1996.
14. Тиньгаев А.К., Губайдулин Р.Г. К вопросу о выборе марки стали для строительных металлоконструкций. Сообщение 1// Известия вузов. Строительство. – 1996.– № 7.– С.10–15.

15. Губайдулин Р.Г., Тиньгаев А.К. К вопросу о выборе марки стали для строительных металлоконструкций. Сообщение 2// Известия вузов. Строительство. – 1996. – № 9. – С.46–49.

16. Губайдулин Р.Г., Тиньгаев А.К. Реализация принципов системного подхода при обеспечении прочности и долговечности стальных строительных конструкций// Первые уральские академические чтения: Сборник докладов РААСН. – Челябинск: ЧГТУ, 1996. – С.38–40.

17. Тиньгаев А.К., Губайдулин Р.Г. Деформационный подход к оценке критических температур хрупкости узлов и элементов стальных конструкций// Известия вузов. Строительство. – 1997. – № 1–2. – С.10–16.

18. Тиньгаев А.К. Классификация сварных соединений строительных конструкций по категориям ответственности// Сварочное производство. – 1999. – № 1. – С.38–41.

19. Тиньгаев А.К., Губайдулин Р.Г. Система регламентации качества сварных соединений стальных строительных конструкций// Сварка Урала – в XXI век. 18-я научно-техническая конференция сварщиков Урала. Екатеринбург: УГТУ, 1999. – С.11–12.

20. К вопросу о нормировании дефектов сварных соединений/ Р.Г. Губайдулин, А.К. Тиньгаев, Е.И. Елсуков, Е.А. Пожидаев// Сварка Урала – в XXI век. 18-я научно-техническая конференция сварщиков Урала. Екатеринбург: УГТУ, 1999. – С.12–14.

21. Свод правил по проектированию и строительству. СП 53-101-98. Изготовление и контроль качества стальных строительных конструкций// В.Ф. Беляев, Р.Г. Губайдулин, А.К. Тиньгаев и др.// М.: Госстрой России, ГУП ЦПИ, 1999. – 29 с.

22. Тиньгаев А.К., Губайдулин Р.Г., Елсуков Е.И. Особенности вероятностного подхода при нормировании технологических дефектов сварных соединений. Материалы докладов конференции// Сварка–Контроль. Итоги XX века. 19-я научно-техническая конференция сварщиков Урала. Челябинск: ЦНТИ, 2000. – С.173–175.

23. Губайдулин Р.Г., Тиньгаев А.К., Пожидаев Е.А. Определение трещиностойкости сварных соединений малоуглеродистых и низколегированных сталей. Материалы докладов конференции// Сварка–Контроль. Итоги XX века. 19-я научно-техническая конференция сварщиков Урала. Челябинск: ЦНТИ, 2000. – С.151–153.

24. Тиньгаев А.К., Губайдулин Р.Г., Елсуков Е.И. Совершенствование нормативных требований к качеству сварных соединений стальных конструкций. Ч.1// Сварочное производство. – 2000. – № 11. – С.30–33.

25. Тиньгаев А.К., Губайдулин Р.Г., Елсуков Е.И.// Совершенствование нормативных требований к качеству сварных соединений стальных конструкций. Ч.2// Сварочное производство. – 2000. – № 12. – С.24–28.

26. Тиньгаев А.К., Губайдулин Р.Г., Елсуков Е.И. Совершенствование нормативных требований к качеству сварных соединений стальных конструкций. Ч.3// Сварочное производство. – 2001. – № 3. – С.18–24.

27. ГОСТ 23118-99. Межгосударственный стандарт. Конструкции стальные строительные. Общие технические условия/ В.Ф. Беляев, Р.Г. Губайдулин, А.К. Тиньгаев и др.// М.: Госстрой России, ГУП ЦПП, 2001.– 37 с.

28. Тиньгаев А.К., Пожидаев Е.А. Методика построения диаграмм предельной пластичности конструкционных сталей при различных схемах напряженного состояния// Заводская лаборатория. Диагностика материалов.– 2002.– № 5.– С.42–45.

29. Тиньгаев А.К. Механико-математическая модель предельной пластичности металла// Проблемы прочности материалов и сооружений на транспорте: Материалы V Международной конференции.– Череповец, 2002.– С.166–169.

30. Тиньгаев А.К. Уравнение предельной пластичности металла при сложном напряженном состоянии// Заводская лаборатория. Диагностика материалов.– 2002.– № 11.– С.37–42.

31. Тиньгаев А.К. Определение критических температур хрупкости стали при сложном напряженном состоянии// Проблемы и перспективы развития строительства в XXI веке. Материалы Международной научно-практической конференции.– Магнитогорск: МГТУ.– 2002.– С.28–30.

32. Тиньгаев А.К., Губайдулин Р.Г., Елсуков Е.И. Анализ надежности сварных соединений вертикальных резервуаров// Сборник научных трудов. Предотвращение аварий зданий и сооружений. Магнитогорск: МГТУ.– 2002.– С.28–34.

33. Тиньгаев А.К. Метод определения критических температур хрупкости элементов металлоконструкций// Заводская лаборатория. Диагностика материалов.– 2004.– №3.– С.46–51.

34. Тиньгаев А.К. Структурно-кинетический критерий разрушения ОЦК-металлов в области вязко-хрупкого перехода// Научно-технические проблемы прогнозирования надежности и долговечности конструкций и методы их решения: Труды V международной конференции.– СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2003.– С.508–511.

35. Тиньгаев А.К., Губайдулин Р.Г. Оценка влияния остаточных напряжений на нормативную величину ударной вязкости металла сварного соединения// Всероссийской научно-технической конференции посвященной 150-летию со дня рождения Н.Г.Славянова “Сварка и контроль 2004”: Сборник докладов. Т 2.– Пермь: ПГТУ, 2004.– С.116–118.

36. Tin'gaev A.K., Classification of welded joints engineering structures on the basis of responsibility categories// Welding International.– 1999.– № 13 (7).– С.582–584.

37. Tin'gaev A.K., R.G.Gubaidulin, E.I.Elsukov. Improvement of standard requirements on the quality of welded joints in steel structures. Part 2// Welding International.– 2001.– № 15 (5) – С.402–405.

38. Tin'gaev A.K., R.G.Gubaidulin, E.I.Elsukov. Improvement of standard requirements on the quality of welded joints in steel structures. Part 3// Welding International.– 2001.– № 15 (8) – С.656–661.

Тиньгаев Александр Кириллович

КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ И МЕТОД ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ХЛАДОСТОЙКОСТИ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ
С ДЕФЕКТАМИ СПЛОШНОСТИ В СВАРНЫХ ШВАХ

Специальность 05.23.01 – "Строительные конструкции,
здания и сооружения"

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Издательство Южно-Уральского государственного
университета

ИД № 00200 от 28.09.99. Подписано в печать 15.11.2004. Формат
60x84 1/16. Печать офсетная. Усл. печ. л. 2,09. Уч.-изд. л. 2,0.
Тираж 100 экз. Заказ 342/427.

УОП Издательства. 454080, г. Челябинск, пр.им.В.И.Ленина, 76.°