

05.23.01  
Т 421

Челябинский государственный технический университет

На правах рукописи

ТИНЬГАЕВ АЛЕКСАНДР КИРИЛЛОВИЧ

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ  
НА СОПРОТИВЛЕНИЕ ХРУПКОМУ РАЗРУШЕНИЮ СВАРНЫХ  
КОНСТРУКЦИЙ МОРСКИХ СТАЦИОНАРНЫХ ПЛАТФОРМ

Специальность 05.23.01 -  
"Строительные конструкции, здания и сооружения"

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т  
диссертации на соискания ученой степени  
кандидата технических наук

Челябинск, 1993

Работа выполнена на кафедре "Оборудование и технология сварочного производства" Челябинского государственного технического университета.

Научный руководитель - доктор технических наук  
профессор КЛЫКОВ Н. А.

Официальные оппоненты: доктор технических наук  
профессор ОЛЬКОВ Я. И.,

кандидат технических наук  
доцент ЕРЕМИН К. И.

Будущая организация - Челябинский завод металлоконструкций  
им. С. Орджоникидзе.

Защита диссертации состоится 29 июня 1993 г., в 11 часов, на заседании специализированного совета К053.13.05 при Челябинском государственном техническом университете по адресу: 454080, г. Челябинск, проспект им. В. И. Ленина, 76, ЧТУ, конференц - зал.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке университета.

Ваши отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных гербовой печатью, просим выслать в секретариат ученого совета университета по указанному адресу.

Автореферат разослан "28" мая 1993 г.

Ученый секретарь  
специализированного совета  
кандидат технических наук  
доцент

 Г. В. ТРЕГУЛОВ

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Истощение наиболее доступных и богатых месторождений нефти и газа на суше, трудности их добычи в отдаленных и неосвоенных районах вызвали необходимость освоения природных ресурсов континентального шельфа. Одним из главных направлений увеличения морской добычи углеводородного сырья является освоение северных, арктических, а также глубоководных акваторий (150..300 м) незамерзающих морей. Решение этих задач связано с созданием крупногабаритных высоконагруженных сооружений, для которых проблема обеспечения сопротивлению хрупкому разрушению имеет важное значение.

Анализ аварий металлических конструкций с хрупким разрушением их элементов свидетельствует, что значительная часть причин аварий (до 40 %) в той или иной мере обусловлена последствиями технологического воздействия на металл. Однако несмотря на это обстоятельство в расчетных методах оценки сопротивления хрупкому разрушению сварных конструкций МСП недостаточно полно учитываются технологические факторы, что может привести к расхождению расчетных и действительных показателей несущей способности.

Оценка влияния технологических операций на характеристики сопротивления хрупкому разрушению является особо актуальной для сооружений МСП в связи с использованием в элементах конструкции толстолистового проката (до 110 мм), сложными условиями эксплуатации и повышенными требованиями к их надежности.

Работа выполнялась по заказам ЦНИИпроектстальконструкции им. Н. П. Мельникова, ВНИИморнефтегаза и Бакинского завода стационарных глубоководных оснований в рамках целевой научно-технической программы Госстроя СССР О. П. 007 "Создание и внедрение технологических процессов и технических средств для поиска, разведки и промышленного освоения нефтяных и газовых месторождений континентального шельфа".

Целью настоящей работы являлись оценка влияния технологических факторов на склонность стали к хрупкому разрушению и совершенствование методики учета их при расчете конструкций МСП на прочность в условиях агрессивной среды.

Научная новизна работы состоит:

- в установлении зависимостей изменения характеристик сопротивления хрупкому разрушению и механических свойств толстолистового

вой стали марок 09Г2С-Ш и 12ХГДАФ от технологических воздействий на металл;

- в определении уровня и характера распределения остаточных напряжений в сварных соединениях и элементах МСП на различных стадиях ее изготовления;

- в установлении корреляционной зависимости между относительным сужением в устье надреза и удельной работой зарождения трещины при ударном испытании образцов типа Шарпи;

- в уточнении методики учета эксплуатационно-технологических факторов при расчете конструкций МСП на прочность с учетом хрупкого разрушения.

Практическая ценность работы заключается в усовершенствованной методике расчета конструкций МСП на прочность в области квазихрупких (хрупких) разрушений, которая позволяет более полно и дифференцированно учесть конструктивно-технологические и эксплуатационные особенности сварных соединений и элементов сооружения, а также сформулировать требования к их качеству.

Внедрение результатов. Результаты исследования использовались при составлении:

- ведомственных строительных норм "Конструкции стальные морских стационарных платформ. Правила производства и приемки работ" ВСН 39-3.3.1292.4-91. Миннефтегазпром СССР. -М.: ВНИИОЭНГ, 1991. - 65 с.

- технические условия на изготовление опорных частей МСП для Пельтун-Астохского, Луньского и "Чайво-1" месторождений на северо-восточном шельфе о.Сахалин (ЦНИИпроектстальконструкция, ВНИПИ-морнефтегаз).

- методики определения допустимых величин дефектов сварных соединений МСП при их статическом нагружении в области квазихрупких разрушений (ЦНИИпроектстальконструкция, ППО "Шельфпроектстрой").

- учебного пособия "Расчет металлических конструкций и сварных соединений на прочность с учетом хрупкого разрушения".

Агробация работы. Диссертация заслушена и рекомендована к защите на научном семинаре кафедры "Металлические, деревянные и пластмассовые конструкции" Челябинского государственного технического университета.

Основные положения и результаты работы представлялись:

- научно-технической конференции молодых специалистов и уче-

ных В/О Союзметаллостройниипроект "Повышение эффективности и совершенствование проектирования, исследования, изготовления и монтажа металлоконструкций"(Магнитогорск, октябрь 1987 г.);

- четвертой Украинской республиканской научно-технической конференции по металлическим конструкциям "Развитие, совершенствование и реконструкция специальных сварных стальных конструкций зданий и сооружений" (Симферополь, Черноморск, октябрь 1988 г.);

- региональной научно-практической конференции "Надежность и реконструкция-88"(Волгоград, 1988 г.);

- научно-технической конференции Севастопольского филиала РДЭНТП УССР "Морские сооружения континентального шельфа" (Севастополь, ноябрь 1989 г.);

- шестой научно-технической конференции "Проблемы создания новой техники для освоения шельфа"(Горький, декабрь 1989 г.);

- Международной конференции "Сварные конструкции" (Киев, сентябрь 1990 г.);

- Всесоюзной научно-технической конференции "Испытания строительных металлических конструкций в условиях действующих предприятий" (Магнитогорск, октябрь 1991 г.);

- пятой Украинской научно-технической конференции по металлическим конструкциям "Усиление и реконструкция производственных зданий и сооружений построенных в металле" (Киев, май 1992 г.);

- ежегодным научно-техническим конференциям профессорско-преподавательского состава Челябинского политехнического института (1987-1989 гг.).

Публикации. По теме диссертации опубликованы 17 работ и одно учебное пособие.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, выводов, списка литературы и приложения. Содержание работы изложено на 104 страницах машинописного текста 27 таблицах и 66 рисунках. Список литературы содержит 120 наименований.

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе дан обзор по вопросу влияния технологических операций на склонность стали к хрупкому разрушению и методам расчетной оценки сопротивления хрупкому разрушению металлических конструкций. Изучение отечественного и зарубежного опытов проек-

тирования конструкций МСП показало, что в настоящее время существуют два подхода к проблеме предотвращения хрупких разрушений: обеспечение вязкой работы материала за счет выбора марки стали и расчетное определение максимально допустимых напряжений в области квазихрупких разрушений.

Первое направление реализовано в основном в зарубежных нормах на проектирование МСП, в основу которых положено представление о невозможности устранения опасности возникновения хрупкого разрушения. Исходя из принятой предпосылки, формулируются требования к ударной вязкости материала, обеспечивающие сопротивление распространению начавшегося разрушения. С увеличением толщины и прочности металла реализация принципа вязкой работы материала в конструкции связана с существенными материальными затратами. Это объясняется тем, что требования к ударной вязкости возрастают пропорционально толщине и прочности материала.

Расчетные методы оценки сопротивления хрупкому разрушению отражены в основном в отечественной нормативной литературе и основываются на классической и энергетической теориях хрупкого разрушения, что позволяет оценить несущую способность элементов и соединений на стадии зарождения и развития трещины. Анализ расчетных методов оценки сопротивления хрупкому разрушению конструкций МСП показал, что в существующих методах недостаточно полно учитываются эксплуатационно-технологические факторы, которые являются основными причинами отказов стальных конструкций с хрупким разрушением их элементов.

Проблеме влияния технологических операций на склонность стали к хрупкому разрушению посвящены работы В. А. Винокурова, В. С. Гиренко, Г. В. Жемчужникова, Л. А. Копельмана, Н. А. Махутова, Г. А. Николаева, С. В. Серенсена, Х. Кихары, А. А. Уэльса и др. Анализ работ наглядно свидетельствует о влиянии последствий технологических воздействий на металл на характеристики сопротивления хрупкому разрушению. Однако следует отметить, что большая часть исследований проводилась в 50...60 гг. на образцах из малоуглеродистых и частично низколегированных марок сталей толщиной не более 30 мм. Критериями оценки сопротивления хрупкому разрушению служили результаты испытаний образцов Менаже, которые отражают только качественный характер явления хладноломкости стали, что не позволяет использовать полученные ранее результаты в расчетных методах оценки прочности конструкций МСП.

По результатам изучения состояния вопроса определены задачи исследования:

- установить закономерности изменения характеристик механических свойств ( $\sigma_s, \sigma_r, \delta_s, \psi$ ) толстолистовой стали для конструкций МСП в результате технологических воздействий на металл;
- оценить влияние основных технологических операций изготовления конструкций МСП на сопротивление хрупкому разрушению сталей 09Г2С-Ш и 12ХГДАФ;
- исследовать кинетику остаточных напряжений в элементах МСП с угловыми и стыковыми швами;
- разработать основные положения методики учета влияния эксплуатационно-технологических факторов при расчете конструкций МСП на прочность с учетом хрупкого разрушения.

Вторая глава посвящена уточнению нормативных методов оценки сопротивления хрупкому разрушению сварных конструкций МСП. При совершенствовании метода расчета на стадии зарождения трещины в качестве базового принят метод, разработанный в ЦНИИпроектстальконструкции, в котором используется линейная аппроксимация разрушающих напряжений от температуры при квазихрупком состоянии материала в конструкции. Для использования данного метода применительно к конструкциям МСП необходимо уточнить характеристики смещения критических температур хрупкости от технологических воздействий и учесть влияние коррозионной среды.

На основании работ Ю. С. Вольберга, А. С. Корякова, И. И. Кошина, Д. С. Фоменко автором настоящей работы предложено учитывать влияние коррозионной среды посредством коэффициента  $\beta_{KH}$  и характеристик смещения критических температур хрупкости  $\Delta T_{KH}^{KOP}$ ,  $\Delta T_{K2}^{KOP}$ .

Коэффициент  $\beta_{KH}$  отражает снижение несущей способности элемента вследствие изменения геометрических параметров сечения от общей и местной коррозии материала:

$$\beta_{KH} = \left(1 - \frac{\Delta_k}{t}\right) \left[1 - \left(\frac{l_n}{t} \cdot \frac{A_n}{A}\right)\right], \quad (1)$$

где  $\Delta_k$  - величина коррозионного износа;  $t$  - исходная толщина элемента;  $l_n$  - средняя глубина питтингов или язв;  $A_n$  - суммарная площадь питтингов или язв на поверхности;  $A$  - площадь рассматриваемой поверхности (не менее 0,25 м<sup>2</sup>).

Характеристики  $\Delta T_{KH}^{KOP}$ ,  $\Delta T_{K2}^{KOP}$  учитывают изменения свойств материала от воздействия коррозионной среды при определении рас-

четных критических температур хрупкости элемента:

$$T_{K1}^K = T_{K1} + \Delta T_{K1}^C + \Delta T_{K1}^T + \Delta T_{K1}^A + \Delta T_{K1}^{KDP}; \quad (2)$$

$$T_{K2}^K = T_{K2} + \Delta T_{K2}^C + \Delta T_{K2}^T + \Delta T_{K2}^A + \Delta T_{K2}^{KDP}. \quad (3)$$

Здесь  $\Delta T_{K1}^C$ ,  $\Delta T_{K1}^T$ ,  $\Delta T_{K1}^A$  - смещения первой и второй критических температур хрупкости стали, обусловленные воздействием сварочных процессов, технологическими операциями холодного пластического деформирования и динамических нагрузок.

Из анализа основного уравнения, определяющего величину разрушающих напряжений в методе ЦНИИпроектстальконструкции, установлено, что использование при построении аппроксимационной зависимости  $\sigma_{p1}(T)$  значение предела текучести стали, соответствующее температуре  $T_{K2}^K$ , повышает точность определения разрушающих напряжений по сравнению с базовым методом. С учетом сказанного основное уравнение для определения разрушающих напряжений примет вид

$$\sigma_{p1} = \left[ (\sigma_B - \sigma_{T2}) \frac{T_{min}^3 - T_{K2}^K}{T_{K1}^K - T_{K2}^K} + \sigma_{T2} \right] \beta_{K1} \quad (4)$$

где  $\sigma_B$  - временное сопротивление стали при температуре 293°K (20°С);  $\sigma_{T2}$  - предел текучести стали при температуре  $T_{K2}^K$ ;  $T_{min}^3$  - минимальная температура эксплуатации конструкции.

При описании предельного напряженного состояния на стадии зарождения трещины использован двухпараметрический критерий механики разрушения. В связи с тем, что в сварных соединениях МСП имеются концентраторы напряжений, отличающиеся по своей геометрии от трещины, но подобные ей по характеру асимптотики поля напряжений в устье надреза (непровары, подрезы, смещения кромок и т. д. при  $\rho \rightarrow 0$ ), при определении разрушающих напряжений необходимо учитывать особенность их поля напряжений.

В работах О. А. Бакши, К. М. Гумерова, Н. Л. Зайцева, Н. А. Махутова, С. И. Ярославцева решены основные теоретические вопросы по определению особенности поля напряжений в устье V-образного концентратора, которые, по мнению авторов, могут являться базой для разработки инженерных методов расчета. Основываясь на двухпараметрическом критерии механики разрушения и учитывая результаты работ названных авторов, величина разрушающих напряжений на ста-



дии развития трещины предлагается определять по формуле

$$\sigma_{P2} = \sigma_B \left[ 1 - \left( \frac{K_{ad} + K_{oal}}{K_{xc}^e} \right)^{1/\alpha} \right] \quad (5)$$

в которой  $K_{ad}$  - коэффициент интенсивности напряжений для элемента с V-образным концентратором от внешней нагрузки;  $K_{oal}$  - коэффициент интенсивности напряжений для элемента с V-образным концентратором от остаточных напряжений;  $K_{xc}^e$  - расчетная трещиностойкость стали для элемента с V-образным концентратором, учитывающая свойства материала и условия эксплуатации;  $\alpha$  - показатель особенности поля напряжений в вершине V-образного концентратора, изменяющийся от 0,5 для трещины до 0 для гладкого образца.

Сварным соединениям свойственно наличие в них остаточных напряжений, что затрудняет определение показателей несущей способности. Для определения коэффициента интенсивности напряжений от остаточных напряжений получена зависимость  $K_{oal}$  от  $K_o$  с точностью до 5% в запас прочности:

$$K_{oal} = K_o (\sigma/\sigma_B)^{0.45} \quad (6)$$

где  $K_o$  - коэффициент интенсивности напряжений от остаточных напряжений для элемента с трещиной, определяемый по имеющимся в литературе зависимостям.

Для оценки точности определения разрушающих напряжений по уточненной методике проведены испытания сварных стыковых соединений из стали 09Г2С-Ш толщиной 50 мм с различными технологическими дефектами, а также использованы результаты работ А. Н. Васютина и С. И. Ярославцева. Расхождение расчетных и фактических показателей несущей способности не превышает 10...15%, что, на наш взгляд, вполне допустимо для инженерного метода расчета.

В третьей главе приведены результаты исследования влияния технологических операций на показатели склонности стали к крупному разрушению, характеристики механических и коррозионных свойств. Объектом исследования являлись образцы из стали марок 09Г2С-Ш и 12ХГДАФ толщиной 40...50 мм. В качестве основных технологических операций, оказывающих наиболее существенное влияние на характеристики механических свойств, рассмотрены следующие операции: правка, вальцовка, сварка, калибровка и термическая обработка (высокотемпературный отпуск). Дополнительно исследовано влияние операции термического упрочнения (закалка + отпуск) стали в готовом изделии.

При испытаниях на растяжение образцов типа III (ГОСТ 1497-84) установлено, что операции пластического деформирования в холодном состоянии повышают предел текучести стали 09Г2С-Ш на 16...18%, а стали 12ХГДАФ на 5...7%. Эти же операции снижают относительное удлинение на 10...15% для обеих марок сталей.

Свойства металла шва существенно отличаются от соответствующих характеристик металла в исходном состоянии:  $\sigma_T$  металла шва из стали 09Г2С-Ш в 1,6, а из стали 12ХГДАФ в 2,0 раза больше, чем у металла в исходном состоянии; значения  $\sigma_B$  соответственно в 1,2 и 1,4 раза больше.

Высокотемпературный отпуск не влияет на свойства металла шва, в то время как термическое упрочнение готового изделия положительно воздействует на структуру и свойства сварного соединения и основного металла. Прочностные свойства металла обечайки повысились до уровня свойств металла шва, в корне шва образовалась более равновесная структура, несколько измельчилось зерно в зоне перегрева - соединение стало равнопрочным. Аналогичные результаты получены при испытании крупномасштабных образцов, вырезанных из основного металла, металла обечайки и сварных соединений элементов МСП.

Оценка склонности стали к хрупкому разрушению осуществлялась на образцах типа II (ГОСТ 9454-78) и типа XI (ГОСТ 6696-66) в диапазоне температур +20...-80°C. Для более точного представления о влиянии технологических операций на характеристики сопротивления хрупкому разрушению общая величина удельной работы разрушения KCV делилась на удельную работу зарождения  $a_3$  и развития  $a_p$  трещины. Разделение ударной вязкости на составляющие осуществлялось по методу Бахши-Кукина с использованием осциллографирования процесса ударного изгиба образца.

По результатам испытаний строили температурные зависимости KCV, B,  $a_3$ ,  $a_p$ ,  $K_{IC}$  и определяли критические температуры хрупкости стали как в плоскости листа, так и по толщине. Для определения характеристики трещиностойкости стали  $K_{IC}$  использовали зависимость  $K_{IC}(a_3)$ , полученную в работе О. И. Кольченко:

$$K_{IC} = 0,5 \sqrt{\frac{E}{1-\nu^2}} a_3 \quad (7)$$

Здесь E - модуль упругости материала;  $\nu$  - коэффициент Пуассона.

Наиболее существенное влияние на снижение хладостойкости стали оказывают: для стали 09Г2С-Ш операции холодного пластического деформирования, а для стали 12ХГДАФ - сварка. При гибке листа на радиус  $12,5 t < R < 25 t$  у 09Г2С-Ш наблюдается существенная анизотропия характеристик вязкости материала (2,5...5 раз). Критическая температура хладоломкости стали  $T_{\text{хл}}$  смещается в область положительных температур: для металла в плоскости листа на 27...30°C и более чем на 30°C для металла по толщине.

Основной металл стали 12ХГДАФ в трубных элементах обладает более высокими по сравнению со сталью 09Г2С-Ш показателями сопротивления хрупкому разрушению. Однако используемые сварочные материалы и режимы сварки не обеспечивают требуемых характеристик вязкости (трещиностойкости) металла шва.

При анализе результатов ударных испытаний образцов типа Шарпи установлена зависимость между относительным сужением в устье надреза  $\psi$  и удельной работой зарождения трещины с коэффициентом корреляции 0,91:

$$a_3 - 35,6 (1 - \psi^2) \ln(1 - \psi)^{-1} \sigma_r \rho_0 + 4,24 \cdot 10^{-2}, \quad (8)$$

где  $\rho_0$  - эффективный радиус, принят равным 0,25 мм.

Использование выражения (8) позволяет без дополнительного оснащения испытательного оборудования определить характеристики трещиностойкости стали ( $a_3, a_p, K_{Ic}$ ), что существенно упрощает проведение экспериментальных исследований.

С целью учета влияния технологических воздействий на скорость коррозии проведены электрохимические и гравиметрические испытания по ГОСТ 9.905-85 ЕСЗКС. В качестве коррозионной среды использованы 3%-ный раствор NaCl (синтетическая морская вода) и вода Каспийского моря. По результатам исследований установлено, что стали 09Г2С-Ш, 12ХГДАФ и их сварные соединения находятся в активном состоянии при воздействии агрессивной среды. Область пассивного состояния отсутствует. Средняя скорость общей (равномерной) коррозии стали 09Г2С-Ш составляет 0,032...0,038 мм/год, стали 12ХГДАФ - 0,025...0,03 мм/год для образцов с фрезерованной поверхностью. Для образцов с необработанной поверхностью (лист после прокатки) средняя скорость общей коррозии возросла в 1,7...1,8 раза.

Вальцовка листа в холодном состоянии способствует увеличению скорости коррозии на 30...35% для обеих марок сталей. Последую-

шее термическое упрочнение металла обечайки привело к снижению величины средней скорости коррозии в 2,5...3 раза.

По результатам экспериментальных исследований, представленных в третьей главе, установлены закономерности изменения характеристик механических и коррозионных свойств, а также смещений критических температур хрупкости стали в результате технологических воздействий на металл (табл. 1). Для учета влияния коррозионной среды и динамических нагрузок при эксплуатации конструкции использованы работы Баско Е. М., Беляева Б. Ф., Вольберга Ю. А. (табл. 1, 2).

Таблица 1  
Смещения критических температур хрупкости стали от эксплуатационно-технологических факторов, ° К

Критическая температура	Факторы воздействия					термоупрочнение
	гибка в холодном остоянии на радиус		сварка	переменные во времени нагрузки		
	R>25t	12,5t<R<25t		циклические	ударные	
$\Delta T_{H1}$	20	30	30	20	20	-20
$\Delta T_{H2}$	30	40	40	30	40	-30

Таблица 2  
Смещения критических температур хрупкости стали от воздействия коррозионной среды, ° К

Критическая температура	Сталь		
	малоуглеродистая	низколегированная	
		340 МПа	410 МПа
$\Delta T_{H1}$	10	20	30
$\Delta T_{H2}$	20	30	45

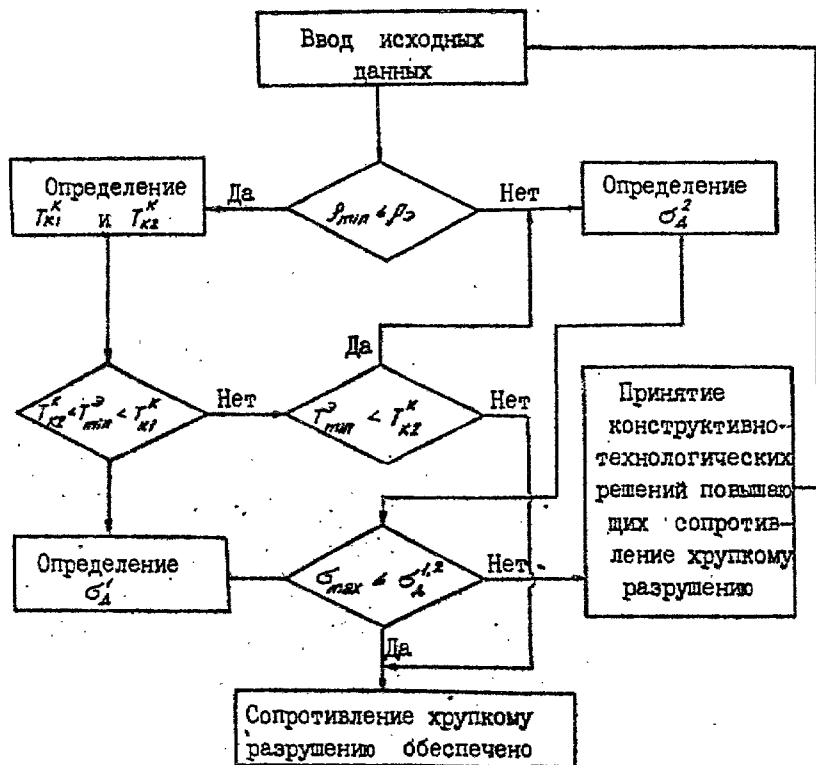
Четвертая глава посвящена определению остаточных напряжений в сварных соединениях и элементах МСП на различных стадиях изготовления. В процессе прохождения металлопрокатом технологических операций пластического деформирования (правка, вальцовка, калибровка) и термического нагрева (сварка, термообработка) в узлах и элементах МСП возникают остаточные напряжения, влияющие на прочность конструкции. Для определения величины и характера распределения остаточных напряжений исследованы наиболее характерные узлы и соединения МСП. Замеры остаточных напряжений производили после каждой технологической операции в 8...20 характерных точках в зависимости от неоднородности поля остаточных напряжений. Величину остаточных напряжений определяли методом "отверстия" с использованием розеток тензорезисторов типа КТ5РЗ и измерителя деформации ИДЦ-1.

В результате исследований установлено, что в металле обечайки до калибровки максимальная величина остаточных напряжений наблюдается в тангенциальном направлении и достигает 300 МПа. Последующая калибровка готовых обечаек снижает максимальный уровень остаточных напряжений в основном металле до 100...160 МПа.

Характер распределения остаточных напряжений в сварном шве существенно отличается от поля остаточных напряжений в основном металле. Максимальный уровень остаточных напряжений отмечен в кольцевых сварных соединениях труб. В заводских стыках их величина достигает 310...400 МПа, а в монтажных - 450...520 МПа. В стенках поясных труб и раскосов максимальные остаточные напряжения вне зоны термического влияния составляют 120...160 МПа. Высокотемпературный отпуск снижает максимальный уровень остаточных напряжений в 2...3 раза. Однако говорить о их полном отсутствии не приходится, так как в зоне термического влияния угловых швов крепления патрубков к поясной трубе величина остаточных напряжений составляет 100...150 МПа.

Результаты исследования остаточных напряжений в сварных соединениях и элементах МСП свидетельствуют о их высоком уровне, что в свою очередь обязывает учитывать их при расчетах конструкций МСП на прочность с учетом хрупкого разрушения.

В пятой главе описаны общие требования к проектированию конструкций МСП и разработан алгоритм определения допустимых напряжений ( $\sigma_2$ ) при расчете на прочность с учетом хрупкого разрушения (см. рисунок). В качестве иллюстрации практического при-



Блок-схема расчета по предлагаемому методу

менения разработанного алгоритма приведены примеры расчета сварных узлов конструкции МСП на стадии зарождения и развития трещины.

### Основные выводы

1. В существующих методах расчета на прочность МСП влияние факторов, обусловленных технологией изготовления, и коррозионной среды, учитывается недостаточно полно.

2. Технологические воздействия на заготовки и детали элементов МСП изменяют характеристики механических и коррозионных свойств исследуемых марок сталей, в частности:

- пластическое деформирование металла в холодном состоянии (правка, вальцовка, калибровка) повысило  $\sigma_r$  для стали 09Г2С-Ш на 16...18% и на 5...7% для 12ХГДАФ. Те же операции снижают  $\delta_5$  на 10...15% и на 30...35% увеличивают среднюю скорость общей коррозии для обеих марок сталей;

- для сварных соединений из стали 09Г2С-Ш величина  $\sigma_r$  металла шва в 1,6, а  $\sigma_b$  в 1,2 раза больше, чем у металла в исходном состоянии, для 12ХГДАФ - соответственно в 2,0 и 1,4 раза;

- термическое упрочнение готового изделия является эффективным средством комплексного повышения служебных (механических и коррозионных) свойств основного металла и сварных соединений. Предел текучести и прочности металла обечайки после термоупрочнения повысились на 20...40% , а скорость общей коррозии снизилась в 2,5...3 раза.

3. В результате исследований установлено:

- технологические операции изготовления существенно влияют на характеристики сопротивления хрупкому разрушению;

- сильным охрупчивающим фактором для стали 09Г2С-Ш является гибка в холодном состоянии, а для 12ХГДАФ - сварка. Критическая температура порога хладноломкости сместилась от этих операций в область положительных температур соответственно на 30°С и 40°С.

- в результате термического упрочнения металла обечайки существенно повысилась хладостойкость стали. Трещиностойкость металла при +20°С составляет 217...233 МПа м. Снижение температуры испытаний до -60°С практически не влияет (не более 10%) на величину  $K_{IC}$  металла обечайки, подвергнутого термическому упрочнению.

- в области квазихрупких разрушений, между величиной относи-

тельного сужения в устье надреза образца типа Шарпи и удельной работой зарождения трещины имеется корреляционная зависимость, позволяющая существенно упростить определение характеристик трещиностойкости материала.

4. При технологическом воздействии на металл (правка, вальцовка, сварка и т. д.) в элементах МСП возникают остаточные напряжения, достигающие предела текучести материала. Остаточные напряжения, вызванные этими операциями, существенно влияют на показатели несущей способности в области хрупких (квазихрупких) разрушений.

5. Высокотемпературный отпуск не снимает полностью остаточных напряжений. В зоне термического влияния угловых швов трубчатых узлов их величина достигает 100...150 МПа. В соответствии с п. 4 настоящих выводов необходимо учитывать остаточные напряжения при расчете элементов МСП.

6. На основании обобщения современных достижений в области расчетной оценки сопротивления хрупкому разрушению и результатов наших исследований разработаны основные положения методики дифференцированного учета технологических факторов и коррозионной среды при расчете конструкций МСП на прочность.

7. С учетом зависимостей (4), (5) разработан алгоритм оценки несущей способности элементов МСП на стадии зарождения и развития трещины, позволяющий определить требования к форме и качеству сварных соединений.

8. Результаты исследования использовались при составлении:

- ведомственных строительных норм "Конструкции стальные морских стационарных платформ. Правила производства и приемки работ" ВСН 39-3.3.1292.4-91. Миннефтегазпром СССР. - М.: ВНИИОЭНГ, 1991. - 65 с;

- технических условий на изготовление опорных частей МСП для Пельтун-Астохского, Луньского и "Чайво-1" месторождений на северо-восточном шельфе о. Сахалин;

- методики определения допустимых величин дефектов сварных соединений МСП при статическом нагружении в области квазихрупких разрушений.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах.

1. Тиньгаев А. К. Влияние технологических операций на механические свойства толстолистовой стали марок 09Г2С-Ш, 12ХГДАФ и их



сварных соединений //Повышение эффективности и совершенствование проектирования, исследования, изготовления и монтажа металлоконструкций: Тез. докл. науч.-техн. конф. - Магнитогорск: МГМИ, 1987. - С. 23-25.

2. Исследование влияния технологических факторов на критические температуры хрупкости материала конструкций морских стационарных платформ // Развитие, совершенствование и реконструкция специальных сварных конструкций зданий и сооружений: Тез. докл. четвертой Украинской республиканской науч.-техн. конф. - Киев: РДНТЭЦ, 1988. - С. 22-23.

3. Губайдулин Р. Р., Тиньгаев А. К., Пшеничникова Е. В. Влияние технологических воздействий на статическую прочность сварных соединений морских стационарных платформ // Тез. докл. Международной конф. по сварным конструкциям. - Киев: ИЭС им. Патона, 1990. - С. 33.

4. Зависимость свойств металла сварных соединений сталей 09Г2С-Ш и 12ХГДАФ от технологических воздействий /Н. А. Клыкков, Р. Г. Губайдулин, А. К. Тиньгаев и др. //Сварочное производство. - 1990. - №1. - С. 14-16.

5. Влияние технологических и конструктивных факторов на несущую способность сварных соединений морских стационарных платформ /Р. Г. Губайдулин, А. Т. Тиньгаев, М. Р. Губайдулина и др. //Технология судостроения. -1990. - №9. - С. 79-84.

6. Технология изготовления ледостойких стационарных платформ и их технико-экономические показатели /Р. Г. Губайдулин, И. В. Сидоров, А. К. Тиньгаев и др. //Технология судостроения. - 1990. - №9. - С. 50-52.

7. Губайдулин Р. Г., Иванов С. Г., Тиньгаев А. К. Исследование влияния технологических операций на остаточные напряжения в металле и сварных швах морских стационарных платформ // Исследования по строительной механике и строительным конструкциям. - Челябинск: ЧПИ, 1987. - С. 57-60.

8. 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.

9. Клыкков Н. А., Губайдулин Р. Г., Тиньгаев А. К. Об оценке несущей способности строительных металлических конструкций в области квазихрупкого разрушения //Прочность, надежность и долговечность строительных конструкций. - Магнитогорск: МГМИ, 1990. - С. 94-101.

10. Тиньгаев А. К. Оценка статистической прочности сварных соединений с Y-образным концентратором // Металлические и пластмассовые конструкции. - Челябинск: ЧТУ, 1990. - С. 37-41.

11. Тиньгаев А. К., Губайдулин Р. Г., Пшеничникова Е. В. К вопросу об оценке статической прочности элементов МСП с учетом хрупкого разрушения // Металлические конструкции. - Челябинск: ЧТУ, 1991. - С. 37-41.

12. ВСН 39-3.З.1292.4-91. Конструкции стальные морских стационарных платформ. Правила производства и приемки работ. - М.: ВНИОЭНГ, 1991. - 65 с.

13. Тиньгаев А. К., Губайдулин Р. Г. К вопросу о нормировании поверхностных дефектов сварных соединений и элементов стальных конструкций при статическом нагружении // Испытания строительных металлических конструкций в условиях действующих предприятий: Тез. докл. Всесоюзной конф. - Магнитогорск: МГМИ, 1991. - С. 25-27.

14. Оценка влияния смещения кромок в кольцевых стыковых соединениях на прочность конструкций морских стационарных платформ. /Н. А. Клыкков, Р. Г. Губайдулин, М. В. Шахматов и др. // Судостроение. - 1991. - №8. - С. 29-32.

15. Повышение ударной вязкости металла соединительных деталей магистральных трубопроводов /В. И. Большаков, Л. Н. Дейченко, А. Г. Щербаков и др. // Металловедение и термическая обработка металлов. - 1992. - №5. - С. 8-10.

16. Губайдулин Р. Г., Тиньгаев А. К. Расчетная оценка статической прочности стальных конструкций морских стационарных платформ с учетом сопротивления хрупкому разрушению // Усиление и реконструкция производственных зданий и сооружений, построенных в металле: Тез. докл. пятой Украинской науч.-техн. конф. - Киев: КИСИ, 1992. - С. 87-88.

17. Губайдулин Р. Г., Тиньгаев А. К. Расчет металлических конструкций и сварных соединений на прочность с учетом хрупкого разрушения: Учебное пособие. - Челябинск: ЧТУ, 1992. - 38 с.

18. Тиньгаев А. К. К вопросу о расчетной оценке статической прочности конструкций морских стационарных платформ с учетом их сопротивления хрупкому разрушению // Вопросы сварочного производства. - Челябинск: ЧТУ, 1992. - С. 37-54.

Техн. редактор А.В.Миних

Издательство при Челябинском  
государственном техническом университете

---

Подписано в печати 20.05.93. Формат 60X90 1/16. Печ. л. I.  
Уч.-изд. л. I. Тираж 100 экз. Заказ 121/279.

---

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