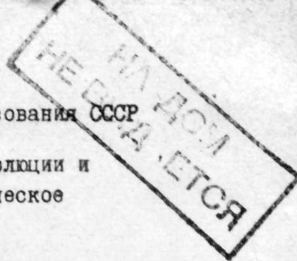


М 387613
Министерство высшего и среднего специального образования СССР

Московское ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и
ордена Трудового Красного Знамени высшее техническое
училище имени Н.Э. Баумана



На правах рукописи

ИВАНОВА Нина Владимировна

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РУЛОНИРОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ
СВАРКИ НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ
РУЛОНИРУЕМЫХ РЕЗЕРВУАРОВ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Специальность 05.04.05 - Технология и машины
сварочного производства

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 1982 г.

Работа выполнена во Всесоюзном научно-исследовательском институте по монтажным и специальным строительным работам.

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор
ВИНСКУРОВ В.А.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Стеклов О.И.
Кандидат технических наук, с.н.с.
Кравченко В.Г.

Ведущее предприятие ЦНИИСТальконструкция

Защита диссертации состоится " _____ " _____ 198 г.
на заседании специализированного Совета К053.15.03 по технологии
и машинам сварочного производства Московского ордена Ленина, орде-
на Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени выс-
шего технического училища им. Н.Э.Баумана по адресу: 107005, Моск-
ва, 2-я Бауманская ул., 5.

Ваши отзывы на автореферат в 2 экземплярах, заверенные пе-
чатью, просим выслать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МВТУ им.
Н.Э.Баумана.

Автореферат разослан " _____ " _____ 198 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
специализированного Совета
докт. техн. наук

Л-86901

Подп. к печати 25/XII 1981

Заказ № 1653 Типография

M324613



1387613

Иванова Н. В. Исследование в

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В основных направлениях экономического и социального развития СССР на 1981-1985 годы, принятых на XXVI съезде КПСС, указывается на необходимость ускоренного роста нефтедобывающей и нефтеперерабатывающей промышленности Сибири. На северо-западе Сибири к 1985 году добыча нефти, включая газовый конденсат, будет доведена до 385-395 млн. тонн. Это обуславливает потребность этих районов в сооружении резервуарных парков для хранения нефти и нефтепродуктов. В связи с этим в Сибири предполагается строительство вертикальных цилиндрических резервуаров объемом 20 и 50 тыс. м³ индустриальным методом, широко применяемым в отечественном резервуаростроении.

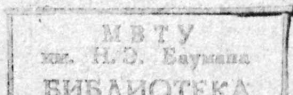
Резервуары вместимостью 20 и 50 тыс. м³, сооружаемые методом рулонирования в европейской части нашей страны, изготавливают из строительных низколегированных сталей 09Г2С и 16Г2АФ. Эти стали также нашли применение при изготовлении конструкции "северного исполнения". При работе в условиях низких климатических температур (вплоть до минус 65°С) появляется возможность хрупкого разрушения рулонизируемых резервуаров из сталей 09Г2С и 16Г2АФ, изготовленных по принятой технологии.

Цель работы состоит в повышении работоспособности сварных конструкций рулонизируемых резервуаров из низколегированных сталей 09Г2С и 16Г2АФ в условиях низких температур.

Методы исследования включали:

- испытания стандартных образцов с надрезами в различных зонах сварных соединений на ударный изгиб с осциллографированием;
- статические испытания по схеме четырехточечного изгиба призматических остронадрезанных образцов натуральной толщины, проводимые с непрерывной регистрацией на двухкоординатном самописце усилия и прогиба путем тензометрирования, и методом ступенчатого нагружения;
- механические испытания на растяжение и кручение сплошных и трубчатых образцов;
- металлографические исследования.

Изучение напряженно-деформированного состояния образцов натуральной толщины с глубоким надрезом проводили по результатам решения упруго-пластической задачи методом конечных элементов на ЭВМ "ICL -4-50" для бруса, нагруженного чистым изгибом в условиях



плоской деформации.

Научная новизна состоит в применении критерия "раскрытие трещины" и положений механики разрушения для выяснения закономерностей деформации надрезанных образцов при испытании на изгиб, что позволило дать достоверную оценку влияния предварительной пластической деформации при рулонировании и последующем старении на сопротивляемость резервуарных сталей зарождению разрушения.

На основе решений упруго-пластических задач методом конечных элементов для надрезанных брусков, нагруженных чистым изгибом, проводимых с учетом реального упрочнения материала, установлены закономерности развития упруго-пластических деформаций и напряжений у дна острого концентратора при плоской деформации, выразившиеся в подтверждении соотношения между коэффициентами концентраций $\alpha_T = \sqrt{\alpha_\sigma \cdot \alpha_\varepsilon}$, предложенного Нейбером.

Практическая ценность. Предложена методика искусственного создания пластических деформаций, возникающих при изготовлении резервуаров, для оценки влияния рулонирования и последующего старения на сопротивляемость резервуарных сталей зарождению разрушения.

Разработан метод количественной оценки сопротивляемости зарождению разрушения низколегированных сталей и их сварных соединений с помощью критического коэффициента интенсивности деформаций V_c , который был применен для определения сопротивляемости зарождению разрушения сварных соединений сталей 09Г2С и 16Г2АФ, выполненных по различным технологическим вариантам сварки.

На основании проведенных исследований рекомендованы режимы и изменения в технологии автоматической сварки под флюсом полотнищ рулонизируемых резервуаров из сталей 09Г2С и 16Г2АФ, работающих в условиях низких климатических температур (вплоть до минус 65°C.)

Апробация работы. Выпущены "Методические указания по определению коэффициента интенсивности деформаций V_c путем статических испытаний на "згиб" и "Рекомендации по выбору энергетических параметров режимов сварки полотнищ рулонизируемых резервуаров, работающих при низких климатических температурах".

Основные положения работы докладывались на научном семинаре кафедры "Машины и автоматизация сварочных процессов" МВТУ им. Н.Э.Баумана, заседании секции экономики и сварочных работ научно-технического Совета ВНИИмонтажспецстроя, а также на Всесоюзной научно-технической конференции "Повышение эффективности и качества сборочно-сварочных работ в химическом и нефтяном машиностроении"

в г. Волгограде.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов и 5 приложений. Выполнена на 205 машинописных страницах, содержит 80 рисунков, 16 таблиц и 168 наименований литературных источников.

Глава I. Для хранения нефти и нефтепродуктов в Сибири предполагается строительство вертикальных цилиндрических резервуаров объемом 20 и 50 тыс.м³ индустриальным методом, предложенным советским ученым Г.В. Раевским. Сооружение резервуаров методом рулонирования в районах Сибири позволит по сравнению с листовой сборкой увеличить производительность сварки и монтажа, свести к минимуму отрицательное влияние сварки при пониженных температурах за счет значительного увеличения доли сварочных работ в заводских условиях.

Изготовление резервуаров для работы при низких климатических температурах вплоть до минус 65°C предполагается из низколегированных сталей 09Г2С и 16Г2АФ. В настоящее время из стали 16Г2АФ сооружают резервуары объемом 30 и 50 тыс.м³ для европейской части нашей страны. Из стали 09Г2С построены резервуары объемом 20 тыс. м³, эксплуатируемые при температурах до минус 50°C. Конструкции резервуаров разработаны в ЦНИИПроектстальконструкция Госстроя СССР.

Анализ разрушений резервуаров для хранения нефтепродуктов показал, что их причинами могут явиться: низкие температуры эксплуатации, трещиноподобные дефекты, увеличение скорости деформирования металла, большая степень объемности напряженного состояния у дна концентраторов напряжений в сечениях нижних поясов корпусов резервуаров, проявление масштабного фактора в виде металлургического и геометрического эффектов, и больших запасов упругой энергии, охрупчивание металла в процессе изготовления конструкций вследствие: а) структурных превращений и роста зерна в зоне термического влияния при сварке; б) деформационного старения сталей, вызванного технологическими пластическими деформациями и пребыванием металла в диапазоне температур 200°... 300°C.

При изготовлении рулонизируемых резервуаров в процессе выполнения технологических операций может произойти локальное охрупчивание металла в результате термомеханического цикла сварки и деформационного старения, вызванного пластическими деформациями при рулонировании и термическим воздействием от сварки монтажных сое-

динений.

В работах В.С. Серенсена, Г.В. Жемчуникова, В.С. Гиренко показано, что одной из причин возникновения хрупких трещин в металлоконструкциях является охрупчивание металла в зоне концентратора напряжений в результате предварительной пластической деформации и последующего старения. Пластические деформации при рулонировании и, особенно, их локализация в зонах возможных поверхностных трещиноподобных дефектов с последующим старением от теплового воздействия сварки монтажных соединений могут привести к исчерпанию деформационной способности металла, что уменьшит сопротивляемость сталей 09Г2С и 16Г2АФ хрупкому разрушению при низких температурах эксплуатации.

При наличии зон с измененными свойствами, формирующимися под влиянием технологии изготовления резервуаров методом рулонирования, и концентраторов напряжений работоспособность конструкций будет определяться не свойствами основного металла, а свойствами этих зон.

Методы оценки сопротивляемости металла хрупкому разрушению при наличии концентраторов напряжений условно могут быть подразделены на две большие группы: 1) методы, позволяющие оценивать сопротивляемость металла зарождению и инициированию разрушения при наличии концентраторов напряжений; 2) методы определения сопротивляемости металла распространению трещины.

Критериями хладостойкости металла при создании резервуаров большой вместимости со значительным запасом потенциальной упругой энергии должны быть, в первую очередь, критерии сопротивляемости зарождению разрушения, которые подразделяются на силовые, энергетические и деформационные.

Для определения склонности к локальному охрупчиванию строительных низколегированных сталей под влиянием технологии изготовления резервуаров показательными являются критерии разрушения, реагирующие на местное исчерпание пластичности в зонах возможных дефектов. Применение методов, основанных на использовании критериев механики разрушения, позволяет определять локальную сопротивляемость металла разрушению в зонах концентраторов напряжений в виде трещин. Профессором В.А. Винокуровым предложен подход к оценке свойств пластичных материалов, который базируется на определении средней разрушающей деформации $\varepsilon_{срр}$ в ослабленном концентратором сечения и критического коэффициента интенсивности деформации

ций V_c для оценки локальных свойств металла в зоне концентратора с конкретным радиусом в вершине ζ :

$$V_c = \varepsilon_{\max} \cdot \sqrt{\zeta} = \varepsilon_{\text{срр}} \cdot \alpha_\varepsilon \cdot \sqrt{\zeta};$$

где $\varepsilon_{\max}$ - максимальная разрушающая деформация у дна концентратора; α_ε - коэффициент концентрации деформаций.

Сопротивляемость металла распространению разрушения может быть определена при испытании малых и крупных образцов. Для качественной оценки сопротивляемости металла развитию разрушения применяются методы испытания малых образцов, которые более просты и экономичны.

Из приведенного в диссертации обзора состояния вопроса следует, что положительный опыт строительства резервуаров объемом 20 и 50 тыс. м³ в европейской части страны не может служить полным основанием его достаточности для районов Сибири с расчетной температурой минус 65°C без дополнительных исследований влияния технологии изготовления на изменение свойств металла. В связи с этим в диссертационной работе были поставлены следующие задачи:

1. Разработать метод количественной оценки сопротивляемости сталей 09Г2С, 16Г2АФ и их сварных соединений зарождению разрушения, в частности с помощью критического коэффициента интенсивности деформаций.

2. Разработать методику искусственного создания пластической деформации и старения металла, возникающих при изготовлении рулонизуемых резервуаров.

3. Исследовать влияние деформационного старения сталей 09Г2С и 16Г2АФ, вызванного пластическими деформациями при рулонировании и термическим воздействием сварки монтажных соединений, на сопротивляемость зарождению разрушения.

4. Исследовать влияние отпуска на восстановление пластических свойств состаренного металла.

5. Разработать технологию автоматической сварки под флюсом рулонизуемых полотен резервуаров из сталей 09Г2С и 16Г2АФ, обеспечивающую более высокую сопротивляемость зоны термического влияния разрушению при низких температурах эксплуатации.

Глава 2. Для количественной оценки сопротивляемости строительных сталей и их сварных соединений зарождению разрушения был разработан расчетно-экспериментальный метод определения V_c путем статических испытаний призматических образцов натуральной толщины с глубоким надрезом (рис. I) на изгиб. Метод состоит в экспе-

риментальном нахождении уровня $\varepsilon_{ср}$ в ослабленном концентратором сечении и определении коэффициента концентрации деформаций α_ε в пластической стадии нагружения из решения упруго-пластической задачи методом конечных элементов (МКЭ).

В сварных конструкциях резервуаров возможным очагом разрушения могут явиться поверхностные трещиноподобные дефекты, расположенные на нижнем поясе корпуса. В связи с этим на образцы для испытаний наносили поверхностный надрез с радиусом в вершине $\rho = 0,1$ мм. Условие плоской деформации у дна надреза достигалось в результате применения образцов с отношением ширины B к высоте нетто-сечения H равным 2,5. Размеры образцов (рис. 1) в мм приведены в табл. I.

Таблица I

Объем резервуара, тыс.м ³	Марка стали	δ - толщина листа нижнего пояса резервуара	t_n	B	H	L	L'	L_n
20	09Г2С	14	5,5	22	8,5	100	120	30
30 и 50	16Г2АФ	16	6,5	22	9,5	100	120	30

Для испытания образцов было спроектировано и изготовлено приспособление, позволившее проводить испытания на изгиб при отрицательных температурах и регистрировать в процессе испытания нагрузку и прогиб образца. Конструкция приспособления обеспечивала максимальное уменьшение трения на нагружающих элементах.

Уровень $\varepsilon_{ср}$ в надрезанном сечении определяли на основании экспериментальной зависимости $\varepsilon_{ср} = 1,3 \cdot \varepsilon_b$, установленной в работе Ю.Г. Уткина, путем измерения деформаций ε_b на характерной базе $\bar{\rho}_0 = 1$ мм (рис. 1), расположенной на тыльной стороне образца напротив дна надреза. Пропорциональные зависимости между пластическими деформациями ε_b , остаточным прогибом f и углом поворота половин образца θ после разгрузки, полученные методом ступенчатого нагружения, позволили находить $\varepsilon_{ср}$ путем непосредственной регистрации прогиба образца f .

При нахождении $\varepsilon_{ср}$ для определения момента зарождения трещины от надреза применяли метод, при котором образцы нагружали до определенных точек на диаграмме " ρ - f ", разгружали и выгибали из приспособления испытательной машины. Для обозначения границ

трещины образцы нагревали до возникновения цветов побежалости (300 ... 350°C), а затем вновь нагружали до разрушения. Было показано, что в образцах из сталей 09Г2С и 16Г2АФ момент зарождения трещины от надреза соответствует моменту достижения нагрузкой максимального значения на диаграмме испытания.

Распределение упруго-пластических деформаций и напряжений в образцах с надрезом получали из решения упруго-пластической задачи для надрезанного бруса, нагруженного чистым моментом в условиях плоской деформации, с применением МКЭ по программе, разработанной к.т.н. А.С. Куркиным. Форму бруса и отношение радиуса его надреза к высоте нетто-сечения H задавали в полном соответствии с соотношением размеров в образцах для испытаний. Для решения задачи, проводимого с учетом упрочнения материала в соответствии с экспериментально полученной для каждой марки стали диаграммой $\sigma_i = \{\epsilon_{lin}\}$, применяли теорию течения.

Сопоставление теоретически и экспериментально полученных зависимостей $\epsilon_{впл}$ от изгибающего момента показало их хорошее совпадение в случае стали 16Г2АФ. Для стали 09Г2С наблюдалось расхождение между расчетной и экспериментальной диаграммами $\epsilon_{впл} - \frac{M}{M_b}$. Это можно объяснить следующим. Для стали 09Г2С при использовании энергетического критерия пластичности, который положен в основу теории течения, следовало бы для зоны пластичности на тыльной стороне образца, где условия близки к одноосному сжатию, принимать $\sigma_i = \sigma_{11} = 360$ МПа (что и делалось фактически). Для зоны пластичности у надреза, где происходит преимущественный сдвиг, следовало бы принимать $\sigma_i = \sqrt{3}\tau_t = 302$ МПа, а не 360 МПа (табл. 2) или же все решение задачи проводить по теории наибольшего касательного напряжения, так как эта теория лучше отражает поведение стали 09Г2С (табл. 2). Поведение же стали 16Г2АФ в зонах пластичности образца соответствует энергетической теории (табл. 2).

Таблица 2

Марка стали	Энергетическая теория		Теория наибольшего касательного напряжения	
	$\sigma_i = \sigma_{11}$ при одноосном растяжении (МПа)	$\sigma_i = \sqrt{3}\tau_t$ при чистом сдвиге (МПа)	$\tau_{max} = 0,5\sigma_{11}$ при одноосном растяжении (МПа)	$\tau_{max} = \tau_t$ при чистом сдвиге (МПа)
09Г2С	360	302	180	175
16Г2АФ	490	495	245	286

Из результатов решения задачи следует, что в пластической области по мере роста нагрузки коэффициент концентрации напряжений α_σ уменьшается, а α_ϵ увеличивается. Концентрация деформаций возрастает до весьма значительных $\epsilon_{ср.}$, соответствующих образованию пластического шарнира. Среднее геометрическое из произведения коэффициентов концентраций практически остается величиной постоянной вплоть до разрушения. Таким образом, соотношение $\alpha_\sigma = \sqrt{\alpha_\epsilon \epsilon}$, предложенное Нейбером для антиплоской деформации, выполняется достаточно хорошо для острых концентраторов при плоской деформации.

Глава 3 посвящена разработке методик исследования сопротивляемости разрушению строительных низколегированных сталей и их сварных соединений.

Для исследования влияния рулонирования и последующего старения на сопротивляемость сталей 09Г2С и 16Г2АФ зарождению разрушения была разработана методика искусственного создания пластических деформаций, возникающих при изготовлении резервуаров, в образцах натуральной толщины с глубоким надрезом (рис. 1). В дне надреза образцов создавали такое же деформированное состояние, что и в зонах поверхностных трещиноподобных дефектов, расположенных вдоль образующей цилиндрической части резервуара. Уровень пластических деформаций у дна дефектов определяли на полунатурных образцах (рис. 2) с поверхностным надрезом глубиной 2 мм.

Анализ условий деформирования металла нижних листов полотна стенки позволил имитировать процесс деформирования при рулонировании путем вальцовки полунатурных образцов (рис. 2), а затем распрямления их до проектного радиуса резервуара при нагружении по схеме чистого изгиба. Радиус вальцовки R_b определяли расчетным путем исходя из условия, что пластические деформации изгиба в сечении полунатурного образца, влияющие на склонность стали к старению, равны по величине деформациям, возникающим при сворачивании полотна в рулон.

В процессе рулонирования кромки поверхностных дефектов типа трещин испытывают дополнительное перемещение за счет концентрации пластических деформаций у их дна. Мерой пластических деформаций является перемещение кромок в дне дефекта, которое определяли для оценки уровня пластических деформаций, возникающих при изготовлении резервуаров. Вместо измерения перемещений кромок в дне надреза при изгибе образцов, что связано с большими техническими труднос-

тиями, измеряли перемещение кромок на поверхности образцов, предполагая, что они связаны между собой линейной зависимостью. Определение перемещений кромок на поверхности образцов производили с помощью измерения приращений баз $\delta = I \dots I,5$ мм (рис. 1б и 2б).

По эпюрам приращений баз полунатурных образцов, полученных после моделирования процессов рулонирования и при условии, что центр поворота надрезанного сечения расположен посередине полного сечения образца, определяли перемещения кромок у дна надреза $\Delta_{н1,2}$, которые были названы условными. Их значения приведены в табл. 3.

Таблица 3

Объем резервуара, м ³	Марка стали	δ , мм	Условные перемещения кромок у дна надреза, мм	
			при сворачивании полотна в рулон, $\Delta_{н1}$	при разворачивании рулона на стенке на монтаже, $\Delta_{н2}$
20000	09Г2С	I4	0,062I	0,0475
50000	I6Г2АФ	I6	0,0448	0,035I

Эти перемещения были воспроизведены у дна глубокого надреза в образцах натуральной толщины при их чистом изгибе в приспособлении. Образцы изгибали сначала на раскрытие надреза, воспроизводя $\Delta_{н1}$, а затем на закрытие надреза, создавая $\Delta_{н2}$. Перемещения кромок на поверхности образцов натуральной толщины определяли исходя из условия расположения центра поворота сечения на расстоянии 0,4 H от вершины надреза (рис. 1б). Методом ступенчатого нагружения было установлено, что между перемещениями кромок Δ и пластическим прогибом образца f существует линейная зависимость, что позволило создавать в образцах перемещения $\Delta_{н1,2}$ путем регистрации прогиба f .

Старение образцов после двухкратного изгиба проводили при 250°C, отпуск - при 600°C. Образцы после старения и отпуска испытывали на статический изгиб с целью определения $\varepsilon_{ср}$.

Для разработки технологии сварки полотнищ резервуаров, эксплуатируемых при низких температурах, исследовали свойства сварных соединений, выполненных по следующим технологическим вариантам.

Сварные соединения стали 09Г2С, выполненные автоматической

двухдуговой сваркой под флюсом, без разделки кромок, по одному проходу с каждой стороны соединения на погонной энергии $q/v = 3400$ кДж/м (заводская технология сварки полотнищ на станах).

Сварные соединения стали 16Г2АФ, выполненные:

1) без разделки кромок

а) автоматической двухдуговой сваркой под флюсом, по одному проходу с каждой стороны соединения на погонной энергии $q/v = 3700$ кДж/м (заводская технология сварки полотнищ на станах);

б) однопроводной односторонней сваркой под флюсом с дополнительным присадочным металлом с тепловложением $q/v = 5000$ кДж/м (технология сварки полотнищ, разработанная во ВНИИМСС);

2) с V-образной разделкой кромок автоматической сваркой под флюсом за три прохода, погонная энергия каждого слоя $q/v = 2700$ кДж/м.

Для надежного определения работоспособности конструкций предложена методика, предусматривающая оценку сопротивляемости разрушению сварных соединений в два этапа. На первом этапе с помощью испытаний стандартных образцов на ударный изгиб с осциллографированием качественно оценивали сопротивляемость различных участков зоны термического влияния (ЗТВ) разрушению с целью определения зон максимального охрупчивания. На втором этапе проводили количественную оценку сопротивляемости сварных соединений зарождению разрушения с помощью V_c , исходя из предположения о наличии дефекта в наиболее слабой зоне, выявленной по результатам испытаний на ударный изгиб. Образцы для испытаний на статический изгиб (рис. 1) вырезали из сварных пластин, усиления швов зачищали. Пластины под сварку и их размеры выбирали согласно рекомендациям МИС применительно к оценке склонности металла ЗТВ к хрупкому разрушению.

Глава 4. Сопротивляемость сталей 09Г2С и 16Г2АФ разрушению оценивали по результатам испытаний стандартных образцов с U- и V-образными надрезами на ударный изгиб с осциллографированием и по результатам статических испытаний образцов натуральной толщины на изгиб.

Оценка склонности к хрупкому разрушению сталей 09Г2С и 16Г2АФ показала, что температура эксплуатации минус 70°C находится выше критических температур хрупкости этих сталей, определенных по уровню ударной вязкости $KCU = 3$ кДж/см² ($0,3$ МДж/м²).

Испытания на ударный изгиб путем осциллографирования процесса в координатах "усилие-время" с целью разложения ударной вязкости на ее составляющие Q_1 и Q_2 были проведены в ВНИИМ им. И.П. Бардина к.т.н. Пируским М.В.

Анализ условий инициирования и развития трещины в стандартных образцах при ударном изгибе показал, что при понижении температуры испытания происходит резкое снижение σ_p для этих сталей. Определение сопротивляемости зарождению разрушения в условиях статического нагружения показало, что зарождение разрушения в исследуемых сталях — энергоемкий процесс во всем диапазоне температур испытания. В связи с этим работоспособность резервуарных конструкций при температуре эксплуатации минус 65°C в значительной степени определяется пластическими свойствами металла на стадии зарождения разрушения.

Результаты испытаний на статический изгиб показали, что деформационное старение, вызванное пластическими деформациями при рулонировании и тепловым воздействием сварки монтажных соединений, снижает сопротивляемость сталей 09Г2С и 16Г2АФ зарождению разрушения, особенно значительно при температурах испытания ниже минус 40°C. Анализ изломов образцов показал, что снижение $\epsilon_{срр}$ в состаренных образцах происходит, главным образом, за счет уменьшения деформационной способности металла в зоне надреза. При $t_{исп} = +20^\circ\text{C}$ образцы из стали 09Г2С разрушаются путем среза, а состаренные образцы из этой же стали разрушаются путем отрыва. Отпуск при 600°C полностью восстанавливает свойства состаренного металла до уровня основного во всем диапазоне температур испытаний.

Была проведена оценка сопротивляемости разрушению сварных соединений сталей 09Г2С и 16Г2АФ, выполненных по различным технологическим вариантам. Результаты испытаний стандартных образцов с надрезами, расположенными в характерных участках ЗТВ, на ударный изгиб показали, что в сварных соединениях сталей 09Г2С и 16Г2АФ, выполненных по заводской технологии, наиболее охрупченными участками являются соответственно участок неполной перекристаллизации и участок перегрева. Методом осциллографирования установлено, что сопротивляемость металла развитию разрушения в ЗТВ стали 09Г2С находится на уровне σ_p основного металла и выше при отрицательных температурах испытаний. Понижение $\sigma_{нчз}$ участка перегрева стали 16Г2АФ связано с уменьшением сопротивляемости металла этого участка как зарождению, так и распространению трещины.

Степень охрупчивания стали 16Г2АФ на участке перегрева зависит от теплового режима сварки. С увеличением количества подводимого тепла снижается сопротивляемость хрупкому разрушению (табл. 4), что связано со значительным укрупнением исходных зерен аусте-

нита при нагреве.

Анализ результатов испытаний на статический изгиб показал, что на участке неполной перекристаллизации в сварном соединении стали 09Г2С наблюдается некоторое снижение критерия V_c , по сравнению с V_c основного металла, однако уровень пластичности металла ЗТВ стали 09Г2С остается достаточно высоким. Понижение пластичности металла этого участка связано с образованием неравновесной структуры в результате частичной перекристаллизации при нагреве. Сопротивляемость зарождению разрушения металла участка перегрева в сварном соединении стали 16Г2АФ, выполненном двухдуговой сваркой, резко падает с понижением температуры испытания от минус 40°C. Сварные соединения этой стали, выполненные с тепло-вложениями 2700 и 5000 кДж/м имеют высокую, почти на уровне основного металла, сопротивляемость зарождению разрушения при температуре испытания минус 70°C (табл. 4).

Таблица 4^{*)}

Показатели сопротивляе- мости разру- шению при $t_{исп} = -70^\circ\text{C}$	Сталь марки 16Г2АФ			
	основ- ной металл	сварные соединения, выполненные с q/v (кДж/м)		
		2700 в 3 прохода	3700 в 2 прохода	5000 в I проход
$\sigma_p, \frac{\text{МДж}}{\text{м}^2}$	0,05	0,086	0,03	0,01
$V_c, \text{мм}^{1/2}$	0,067	0,046	0,02	0,058

Таким образом, результаты испытаний (табл. 4) показали, что сварное соединение стали 16Г2АФ, выполненное с V-образной разделкой кромок в три прохода имеет при температуре испытания минус 70°C благоприятный комплекс показателей, характеризующих сопротивляемость хрупкому разрушению.

На основании проведенных исследований была разработана технология и рекомендованы режимы сварки полотнищ рулонизируемых резервуаров из сталей 09Г2С и 16Г2АФ, обеспечивающие высокую сопротивляемость металла ЗТВ разрушению при низких температурах эксплуатации.

*) Испытывали по три образца на точку.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Анализ разрушений резервуаров и условий их изготовления методом рулонирования позволил выявить возможные неблагоприятные факторы, влияющие на сопротивляемость разрушению сварных конструкций рулонизируемых резервуаров из сталей 09Г2С и 16Г2АФ при низких температурах эксплуатации: наличие трещиноподобных дефектов, локальное охрупчивание металла в результате термомеханического цикла сварки и старения, вызванного пластическими деформациями при рулонировании и термическим воздействием сварки монтажных соединений.

2. Для оценки в зонах возможных трещиноподобных дефектов свойств металла, формирующихся под влиянием технологии изготовления, разработан метод определения коэффициента интенсивности деформаций V_c , который состоит в экспериментальном нахождении уровня средней разрушающей деформации ε_{cr} в сечении с концентратором путем статических испытаний призматических образцов натуральной толщины на изгиб и определения коэффициента концентрации деформаций K_ε в пластической стадии нагружения из решения упруго-пластической задачи методом конечных элементов.

3. Для определения уровня средней разрушающей деформации ε_{cr} в ослабленном сечении путем статических испытаний на изгиб призматических глубоконадрезанных образцов с непрерывной регистрацией нагрузки и прогиба разработано приспособление и предложена методика, основанная на экспериментально установленной линейной зависимости между пластическими деформациями на тыльной стороне образца напротив дна надреза и остаточным прогибом. Показано, что в образцах из сталей 09Г2С и 16Г2АФ момент зарождения разрушения от надреза, как правило, соответствует моменту достижения нагрузки максимального значения на диаграмме испытания.

4. Анализ напряженно-деформированного состояния надрезанного бруса при чистом изгибе в условиях плоской деформации, выполненный по результатам решения упруго-пластической задачи методом конечных элементов с учетом упрочнения материала, показал, что в пластической области с ростом нагрузки коэффициент концентрации напряжений K_σ уменьшается в 2,65 раза при изменении M от 0,25 Мт до 2 Мт, коэффициент концентрации деформаций увеличивается в 2,85 раза в том же диапазоне изменения M , а соотношение между

коэффициентами концентрации $\alpha_r = \sqrt{d_0/d_i}$, предложенное Нейбером, выполняется достаточно хорошо вплоть до разрушения.

5. На основе использования критерия "раскрытие трещины" и положений механики разрушения о закономерностях деформаций образцов при испытании на раскрытие трещины разработана методика искусственного создания пластических деформаций, возникающих в процессе изготовления резервуаров, позволившая на образцах натуральной толщины с глубоким надрезом исследовать влияние рупонирования и последующего старения на сопротивляемость сталей зарождению разрушения. Установлено, что сопротивляемость сталей 09Г2С и 16Г2АФ зарождению разрушения в состаренном состоянии уменьшается вследствие изменения свойств металла в зоне концентратора, особенно значительно при температурах испытаний ниже минус 40°C.

6. Отпуск при 600°C полностью восстанавливает пластические свойства сталей 09Г2С и 16Г2АФ в состаренном состоянии до уровня основного металла и может рассматриваться как возможное средство значительного повышения сопротивляемости зарождению крупного разрушения в конструкциях рупонируемых резервуаров из сталей 09Г2С и 16Г2АФ, эксплуатируемых ниже минус 40°C.

7. Методом осциллографирования при ударном изгибе выявлено недопустимое охрупчивание металла участка перегрева стали 16Г2АФ при температурах испытания ниже минус 40°C вследствие значительного роста исходных зерен аустенита, вызванного тепловложением при сварке 3700 кДж/м и более.

Автоматическая двухдуговая сварка под флюсом ($q/v = 3700$ кДж/м) в два прохода полотниц из стали 16Г2АФ может быть рекомендована для резервуаров, эксплуатируемых только до минус 40°C.

8. С помощью предложенных и реализованных методов исследования дана оценка различных технологических вариантов сварки и показано, что удовлетворительные свойства при температурах от минус 40°C до минус 70°C имеют сварные соединения:

а) стали 09Г2С, выполненные автоматической двухдуговой сваркой под флюсом с общим тепловложением $q/v = 3400$ кДж/м в два прохода;

б) стали 16Г2АФ с V-образной разделкой кромок, выполненные автоматической сваркой под флюсом в три прохода с тепловложением от каждого прохода $q/v = 2700$ кДж/м.

9. Выпущены "Методические указания по определению коэффициента интенсивности деформаций V_ϵ путем статических испытаний на

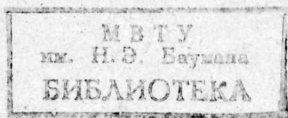
изгиб" и "Рекомендации по выбору энергетических параметров режимов сварки полотнищ рудонируемых резервуаров, эксплуатируемых при низких климатических температурах".

Основное содержание диссертации отражено в работах:

1. Винокуров В.А., Некрасова И.Г., Иванова Н.В. Моделирование условий рудонирования при изготовлении полотнищ вертикальных цилиндрических резервуаров. - В сб.: Исследование методов сварки, процессы монтажа резервуаров. - М.: ВНИИМСС, 1978, с.75-80.

2. Иванова Н.В., Винокуров В.А. Влияние рудонирования на сопротивляемость стали хрупкому разрушению. - В сб.: Исследование методов сварки, процессы монтажа резервуаров. - М.: ВНИИМСС, 1980, с.53-63.

3. Иванова Н.В., Дикун В.Н., Винокуров В.А. Оценка работоспособности сварных соединений низколегированных сталей. Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции "Повышение эффективности и качества сборочно-сварочных работ в химическом и нефтяном машиностроении". - М.: ЦИТИХИМНЕФТЕМАШ, 1961, с.36-37.



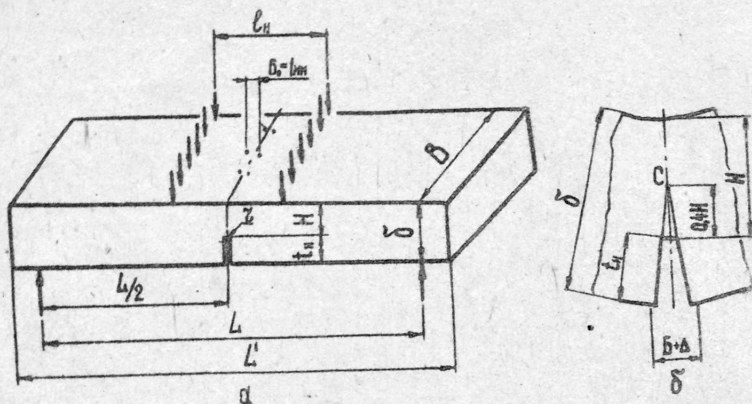


Рис.1. Образцы для испытаний и схема их нагружения (а), расположение центра поворота сечения (б).

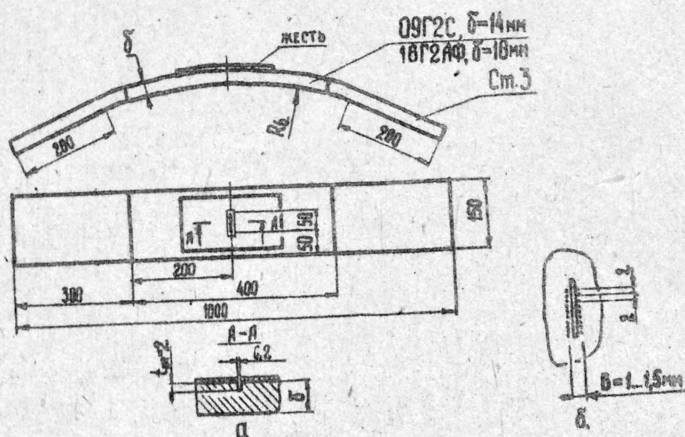


Рис.2. Эскиз полунатурного образца после вальцовки (а) и схема нанесения баз (б).