

05.03.06

882

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР
ЧЕЛЯБИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
имени Ленинского комсомола

На правах рукописи

УДК 621.791.052:539.4

ПУЙКО АЛЕКСЕЙ ВАСИЛЬЕВИЧ

РАЗРАБОТКА РАСЧЕТНЫХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ МЕТОДИК
ОЦЕНКИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОЛЬЦЕВЫХ СТЫКОВ
МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

Специальность 05.03.06 - Технология и машины
сварочного производства

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск, 1986

Работа выполнена в Челябинском политехническом институте имени Ленинского комсомола.

Научный руководитель - заслуженный деятель науки и техники РСФСР, доктор технических наук, профессор БАКУШИ О.А.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор ШРОН Р.З.; кандидат технических наук, старший научный сотрудник ПАШКОВ Ю.И.

Ведущее предприятие - Челябинский ордена Ленина трубопрокатный завод.

Защита диссертации состоится " 12 " ФЕВРАЛЯ 1986 г.

на заседании специализированного совета К 053.13.02 Челябинского политехнического института им. Ленинского комсомола по адресу: Челябинск, 454044, пр. В.И. Ленина, 76.

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

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЧПИ имени Ленинского комсомола.

Автореферат разослан 9 ЯНВАРЯ 1986 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ СОВЕТА,

доцент, канд. техн. наук

Г.В. Савельев
25.12.85
Г.В. САВЕЛЬЕВ

Савельев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. В Основных направлениях развития народного хозяйства СССР уделено большое внимание дальнейшему освоению газо- и нефтеносных месторождений в районах Крайнего Севера и Сибири и строительству широкоразветвленной сети магистральных трубопроводов с повышенной пропускной способностью и пониженной металлоемкостью.

В настоящее время при сооружении магистральных трубопроводов широкое применение находят трубные стали высокой прочности, обладающие повышенной чувствительностью к термомеханическому циклу сварки. Их сварные соединения подвергаются воздействию нагрузок в сложных температурно-скоростных условиях строительства и эксплуатации. Это выдвигает жесткие требования к работоспособности механически неоднородных сварных кольцевых стыков магистральных газо- и нефтепроводов. Существующие расчетные оценки прочности относятся к случаю вязкого разрушения сварных соединений трубопроводов, вопросы их хрупкой прочности освещены в недостаточной мере, в методических разработках не учитывается запас пластичности различных зон сварных соединений кольцевых стыков. При этом применяемые методы механических испытаний стандартных образцов не позволяют определить локальные механические свойства различных участков сварного соединения.

Все это выдвигает проблему разработки расчетных и экспериментальных методик оценки механических свойств кольцевых стыков магистральных трубопроводов в ряд актуальных.

Настоящая диссертация является составной частью комплексной работы, порученной кафедре "Оборудование и технология сварочного производства" Челябинского политехнического института имени Ленинского комсомола целевой программой по решению научно-технической проблемы О.72.01 на 1981-1985 годы (задание О2.03.Н), утвержденной постановлением Государственного комитета СССР по науке и технике и Госплана СССР от 12 декабря 1980 года № 472/248.

Цель исследования состояла в разработке расчетных и экспериментальных методик оценки механических свойств кольцевых стыков магистральных трубопроводов с учетом фактора неоднородности сварных соединений и запаса пластичности металлов их характерных зон.

Для достижения указанной цели необходимо было решить следующие задачи.

1. Современными экспериментальными методами изучить химическую, структурную и механическую неоднородность сварных соединений магистральных трубопроводов.

2. Разработать расчетно-экспериментальные методики оценки локальных механических свойств характерных зон сварных соединений и с их помощью исследовать топографию механической неоднородности.

3. Разработать расчетно-экспериментальную методику оценки склонности к хрупкому разрушению тонких мягких прослоек.

4. Исследовать напряженно-деформированное состояние сварных соединений и на его основе разработать алгоритм расчетной оценки несущей способности кольцевых стыков магистральных трубопроводов с учетом запаса пластичности их характерных зон.

Методы исследования. Поставленные в работе цель и задачи в теоретическом плане решены на основе инженерных методов теории пластичности с использованием феноменологической теории разрушения В.Л.Колмогорова. Напряженно-деформированное состояние моделей неоднородных сварных соединений магистральных трубопроводов исследовано численно методом конечных элементов (МКЭ) и экспериментально - методом муаровых полос. Деформированное состояние характерных зон и окрестностей концентраторов напряжений реальных сварных соединений определялось экспериментально методом малобазных сеток. Для исследования локальных механических свойств этих зон разработаны методики испытаний на изгиб и кручение образцов. Для оценки склонности металлов характерных зон сварного соединения к хрупким разрушениям применена методика ударного изгиба специального образца с надрезом Шарпи и осциллографированием процесса нагружения при помощи разработанных высокочастотного динамометра и широкополосных регистрирующих приборов. Методы исследования неоднородности включали микрорентгеноспектральный анализ, оптическую и электронную микроскопию, химическое травление и измерения микро- и макротвердости. Натурные испытания сварных соединений проводили с использованием бандажирования труб.

Научная новизна. I. Установлены основные особенности формирования напряженно-деформированного состояния и очага наибольшей повреждаемости механически неоднородного соединения. При вовлечении в пластическую деформацию зоны термомодеформационного влияния сварного соединения она наряду с мягкими участками может явиться очагом инициации разрушения вследствие исчерпания запаса пласти-

чности. 2. На основе методов теории пластичности с использованием феноменологической теории повреждаемости установлены количественные закономерности влияния напряженного состояния на запас пластичности сварных соединений при испытании на загиб, заключающиеся в снижении деформационной способности сварного шва при уменьшении угла скоса кромок α и относительного зазора в корне шва α вследствие повышения жесткости напряженного состояния. 3. Установлены закономерности изменения пластичности зоны термомеханического влияния, заключающиеся в ее снижении при увеличении предварительной деформации (осадки). 4. Численно с помощью МКЭ установлены особенности напряженно-деформированного состояния механически неоднородного образца с острым V-образным надрезом в мягкой трослойке при его изгибе, которые заключаются в наличии двух максимумов нормальных напряжений, возникающих вследствие действия геометрической (надреза) и механической (контактного упрочнения) неоднородностей, что приводит к более значительному ее охрупчиванию. 5. Разработана методика разделения ударной вязкости на составляющие, которая позволяет выделить из общей энергии разрушения затраты на устойчивое подрастание трещины.

Практическое значение и внедрение. Разработанные конструкции образцов позволяют определить механические свойства практически любой характерной зоны сварных соединений. Методика определения пластичности металла шва, защищенная авторским свидетельством, значительно упрощает технику построения диаграмм пластичности. Полученные аппроксимирующие зависимости сопротивления отрыву R_c и вязкости разрушения K_{Ic} от величины зерна дают возможность рассчитать сопротивляемость хрупкому разрушению характерных зон сварных соединений из низколегированной стали X-60 по результатам металлографических исследований. Расчетная методика оценки прочности сварных неоднородных соединений позволила оптимизировать технологию сварки с целью наиболее полного использования ресурсов механических свойств всех зон сварных соединений.

Результаты работы легли в основу "Рекомендаций по повышению работоспособности сварных соединений магистральных трубопроводов" П155-74 и "Рекомендаций по оценке качества сварных соединений, выполненных электроконтактной стыковой сваркой оплавлением".

Апробация работы. Диссертация заслушана и рекомендована к защите на научном семинаре кафедры "Оборудование и технология сва-

рочного производства" Челябинского политехнического института им. Ленинского комсомола.

Основные результаты работы доложены на ежегодных конференциях ЧПИ им. Ленинского комсомола (1977-1985 г.г.), на конференциях сварщиков Урала (в Перми, Кургане, Свердловске), на Всесоюзных семинарах и конференциях в Уфе (1980 г.), Москве (1983, 1984 г.г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 10 печатных работ, получено одно авторское свидетельство и одно положительное решение ВНИИТЭ на заявку.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, общих выводов и приложения. Она содержит 150 страниц машинописного текста, 140 рисунков и 6 таблиц. Список литературы включает 194 наименования.

Содержание работы

I. Состояние вопроса. Наиболее подробно в настоящее время изучен вопрос о влиянии механической неоднородности на несущую способность сварных соединений при различных видах и температурно-скоростных условиях нагружения. Разработке расчетных методов оценки прочности посвящены работы отечественных ученых А.Л.Немчинского, О.А.Бакиши, Р.В.Шрона, А.Н.Моношкова, Н.А.Клыкова, Ю.И.Анисимова, А.С.Богомоловой, Р.С.Зайнуллина, М.В.Шахматова, В.Н.Голикова, а также зарубежных авторов (Сато К., Тоеда М., Хоригава М. и др.), в которых показано, что механические свойства сварных соединений определяются относительными размерами и свойствами мягких прослоек, степенью механической неоднородности, формой и компактностью их поперечного сечения. Несмотря на обширные исследования в этом направлении, вопрос о влиянии механической неоднородности на результаты механических испытаний и совершенствования методик определения локальных механических свойств характерных зон сварных соединений изучен недостаточно.

Не менее важен вопрос и о влиянии деформационных свойств на несущую способность механически неоднородных соединений. В этом направлении известны только отдельные работы отечественных ученых (О.А.Бакиши, Б.Г.Кульневич, Т.В.Кульневич и др.) для частных условий нагружения. Однако результаты этих работ не могут быть непосредственно распространены на другие виды деформирования и более общие случаи нагружения. Вопрос о методиках определения пластичности и ее прогнозирования в зависимости от соотношения главных

напряжений в настоящее время требует более тщательного изучения в связи с внедрением в практику строительства магистральных трубопроводов высокопроизводительной стыковой сварки оплавлением.

2. Неоднородность сварных соединений. Многообразие применяемых способов сварки и их режимов, сварочных материалов и свариваемых металлов при строительстве магистральных трубопроводов неизбежно приводит к появлению в зоне кольцевого стыка неоднородностей: химической, структурной и механической.

При стыковой сварке оплавлением стали X-60 химическая неоднородность, прежде всего, проявляется в виде так называемой светлой полосы – обезуглероженной зоны стыка, ширина которой в значительной мере определяется величиной сварочного тока, припуском на оплавление и осадку. Для типовых режимов сварки трубопроводов диаметром 1420 мм характерна ширина обезуглероженной зоны 0,5–1 мм при толщине стенки труб 20 мм. Обезуглероживание происходит до уровня 0,07–0,10% С. Степень неоднородности распределения марганца выражена значительно слабее и еще меньше – кремния. В зоне стыка снижение содержания марганца составляет 10–20% по сравнению с основным металлом, а кремния – увеличение на 5–10%.

Существенные изменения происходят и в структуре металла, связанные с воздействием на него термического цикла сварки. При ручной дуговой сварке труб из стали X-60 с избыточным тепловложением происходит существенный рост зерна аустенита. Зона с крупным зерном при ручной дуговой сварке не превышает 0,5–1,5 мм.

При стыковой сварке оплавлением вследствие значительного времени разогрева кромок свариваемых труб, зона крупного зерна значительно больше в размерах и достигает 3–5 мм. Балл зерна аустенита – 1...2. Вследствие обеднения зоны стыка углеродом преобладающей структурой в нем является феррит с примесью перлита. По мере удаления от этой зоны количество перлита в структуре увеличивается, а феррита – уменьшается.

Химическая и структурная неоднородности сварных соединений приводят к различию механических свойств их отдельных зон, т.е. механической неоднородности в виде чередующихся мягких и твердых прослоек. Абсолютные размеры этих прослоек существенно зависят от режимов сварки.

Проведено исследование влияния термообработки из межкритического интервала температур $A_{01}-A_{03}$ и по циклу нормализации. Приме-

нительно к сварным соединениям из стали X-60 выполненным стыковой сваркой оплавлением, установлено, что термообработка приводит к существенному снижению степени всех видов неоднородностей, но не позволяет их ликвидировать полностью. При этом обезуглероженная зона полностью не исчезает.

После термообработки из межкритического интервала температур степень механической неоднородности составляет $K_T = \frac{\sigma_T^{sm}}{\sigma_T} = 1,25$ (где σ_T^m и σ_T^{sm} - соответственно пределы текучести мягкой прослойки и основного металла), а после нормализации $K_T = 1,1$.

3. Разработка методики и исследования механических свойства металлов характерных зон сварных соединений. В настоящей работе в качестве одного из основных методов предлагается испытание на кручение образца специальной конструкции (рис.1). Образец представляет собой трубчатую конструкцию с кольцевой выточкой в исследуемой зоне. Для исключения влияния концентрации напряжений в выточке на результаты испытаний необходимо соблюдать условие $t \leq 2R$ (где t - толщина стенки в рабочем сечении, R - радиус надреза). Глубина выточки определяется из условия локализации пластического течения только в исследуемой зоне. Это обеспечивается при соблюдении следующего соотношения:

$$W_{к.р.} = \frac{W_{к.з.}}{K_T}, \quad (I)$$

где $W_{к.р.}$ и $W_{к.з.}$ - соответственно полярные моменты сопротивления нетто и брутто-сечений образца, K_T - коэффициент механической неоднородности.

Проведенные исследования показали удовлетворительную сходимость результатов определения прочностных свойств металлов, получаемых при кручении образца предлагаемой конструкции, с характеристиками прочности, определенными стандартными испытаниями на растяжение и методом измерения твердости.

Установлено, что прочностные свойства металлов характерных зон сварных соединений линейно возрастают с увеличением их твердости. При этом их отношение $\frac{\sigma_z}{\sigma_T}$ (σ_z и σ_T - соответственно временные сопротивления разрыву и пределы текучести металлов исследуемых зон), снижается. Это связано с увеличением содержания перлитно-бейнитной смеси в структуре.

Для оценки и прогнозирования пластичности металлов характерных зон сварного соединения применена феноменологическая теория разрушения В.И. Колмогорова, устанавливающая функциональную связь

пределной пластичности $\lambda_{пр}$ с жесткостью напряженного состояния $\Pi = \frac{\sigma_0}{T_i}$ (где σ_0 - гидростатическое напряжение в точке, T_i - интенсивность напряжений):

$$\lambda_{пр} = f(\Pi). \quad (2)$$

Графическое изображение зависимости (2) называют диаграммой пластичности. Для ее аппроксимации в работе применяли экспоненциальную зависимость вида:

$$\lambda_{пр} = \lambda_k \exp(A\Pi), \quad (3)$$

где λ_k - предельная пластичность металла при кручении, A - аппроксимирующий коэффициент. Преимущество зависимости (3) состоит в том, что она достаточно хорошо согласуется с экспериментальными результатами и может быть построена по результатам лишь двух испытаний (в частности, кручение и изгиб). При кручении образца предлагаемой конструкции $\Pi=0$. Для исключения влияния механической неоднородности на результаты испытаний на изгиб предложена конструкция образца, приведенная на рис. 2. При изгибе такого образца показатель жесткости напряженного состояния $\Pi=1$.

Для построения диаграмм пластичности металла V-образного шва механически неоднородных соединений предложена методика испытания по двум схемам нагружения: корнем внутрь и корнем наружу, при которых реализуются два значения показателя жесткости напряженного состояния. Это позволило при минимальных затратах построить диаграмму пластичности металла шва.

В работе исследовано влияние схемы нагружения и геометрии мягкого V-образного шва на его пластичность. Установлено, что пластичность металла шва снижается с уменьшением угла скоса кромок α и относительного зазора в корне шва α . Это связано с увеличением жесткости напряженного состояния.

В работе на основе линейного закона суммирования повреждаемости предложена расчетная оценка пластичности зоны термомеханического влияния сварных соединений, выполненных стыковой сваркой оплавлением. При стыковой сварке оплавлением металл этой зоны подвергается горячей пластической деформации и в нем происходит накопление микродефектов, которые снижают его запас пластичности при последующих механических испытаниях. Получена зависимость, связывающая степень предварительной пластической деформации λ_i с пластичностью $\lambda_{пр}$.

тичностью металла при его испытании (на изгиб) $\lambda_{и}$, в виде:

$$\lambda_{и} = \lambda_{к} \frac{HV_0}{HV} \left[1 - \frac{\lambda_{к}}{\lambda_{к} \exp(A\Pi_{ос})} \right] \exp(A\Pi_{и}), \quad (4)$$

где $\Pi_{ос}$ и $\Pi_{и}$ - соответственно показатели жесткости напряженного состояния при осадке и изгибе, HV_0 и HV - соответственно твердости основного металла и зоны термодиффузионного влияния. Такой подход позволяет с единых позиций оценить пластичность для каждой характерной зоны сварного соединения, целенаправленно проводить выбор режимов сварки с целью наиболее полного использования механических свойств металлов, прогнозировать пластические свойства для произвольных условий нагружения.

4. Напряженно-деформированное состояние кольцевых мягких прослоек. В настоящей работе напряженно-деформированное состояние этих прослоек при осевом растяжении (сжатии) исследовано методами конечных элементов (МКЭ) и муаровых полос. Последним изучалось положение поверхности раздела пластического течения в кольцевой прослойке, которое предопределяет расположение очага максимальных нормальных напряжений. Показано, что известная зависимость И.Я.Тарновского достаточно точно позволяет определить величину радиуса поверхности раздела течения в зависимости от коэффициентов толщины стенки трубы $\gamma = \frac{z_{\epsilon}}{z_{н}}$ и относительной толщины мягкой кольцевой прослойки $\alpha = \frac{h}{z_{н} - z_{\epsilon}}$ (где $z_{н}$ и z_{ϵ} - соответственно наружный и внутренний радиусы трубы, h - толщина мягкой прослойки). Установлено, что с увеличением параметра γ деформированное состояние мягкой прослойки приближается к плоскому. Это позволяет рекомендовать для оценки несущей способности таких сварных соединений расчетные зависимости, полученные для случая плоской деформации. Однако при малых значениях относительной толщины мягкой прослойки α в пластическую деформацию могут вовлекаться прилегающие к ней участки зоны термического влияния и основной металл. Это обуславливает особенности напряженно-деформированного состояния в тонких мягких прослойках. Как показали исследования методами муаровых полос и конечных элементов касательные напряжения τ_{xy} достигают своего предельного значения τ_s - предела текучести на сдвиг - только в окрестностях угловых точек прослойки. Они практически равны нулю в ее срединной части, что приводит к образованию обширной области с распределением нормальных напряжений σ_x и σ_y близким к равномерному. В этой зоне они достигают максимальных значений, что вызывает развитие жесткого напряженного состояния в

больших объемах. В свою очередь зона термического влияния основного металла находится в условиях напряженного состояния близкого к линейному, за исключением областей, прилегающих к угловым точкам мягкой прослойки.

В настоящей работе предложен алгоритм численного расчета прочности сварных соединений с тонкой мягкой прослойкой при вовлечении в пластическую деформацию прилегающих к ней зон. Он позволяет связать предельные деформации характерных зон сварного соединения с его прочностью. Результаты расчета показали, что при вовлечении в пластическую деформацию основного металла в приконтактных областях, предельное состояние мягкой прослойки может не реализовываться, а очаг разрушения - инициироваться в зоне термического влияния. Они позволили сделать важный вывод о том, что при разработке технологии сварки необходимо уделять большое внимание не только выбору сварочных материалов, но и особенностям структурных изменений, происходящих в зоне термического влияния, которые могут привести к снижению пластичности.

5. Оценка склонности металлов характерных зон сварных соединений к хрупкому разрушению. В настоящей работе предложена конструкция образца для определения ударной вязкости металла исследуемой зоны, изображенная на рис.2. Она исключает влияние контактного упрочнения на показатели ударной вязкости (положительное решение на завяку).

Инструментализация ударных испытаний позволяет определить не только общие энергетические затраты на разрушение образца, но и дифференцировать их на удельную работу зарождения трещины KC_3 и ее распространения KC_p . В настоящей работе предложена усовершенствованная методика разделения ударной вязкости на составляющие. В общем случае эта методика позволяет определить более достоверно удельную работу зарождения трещины KC_3 , выделить как самостоятельную характеристику, удельную работу ее устойчивого роста $KC_{ур}$, а также удельную работу распространения трещины KC_p . Проведенные исследования влияния глубины надреза на составляющие ударной вязкости механически неоднородных образцов, выполненных стыковой сваркой оплавлением, показали, что с увеличением глубины надреза наиболее существенно снижается удельная работа зарождения трещины KC_3 , а работа ее распространения не изменяется.

На практике мягкие прослойки в сварном соединении могут располагаться под углом к линии действия нагрузки. Установлено, что

для образцов сварных соединений, выполненных стыковой сваркой оплавлением, ударная вязкость слабо зависит от угла наклона мягкой прослойки. Это явление связано с тем, что трещина распространяется по зоне термомодеформационного влияния. Ударная вязкость этой зоны значительно зависит от структурных изменений в ней и степени предварительной деформации. С увеличением предварительной деформации ударная вязкость снижается.

Поскольку сварные соединения магистральных трубопроводов на стадии строительства подвергаются действию нагрузок в широком диапазоне низких температур, то задача определения их критических температур является также важной. В работе установлено, что уменьшение относительной толщины мягкой прослойки α приводит к смещению этих температур в область более высоких значений, это связано с увеличением запаса упругой энергии и жесткости напряженного состояния в образце по мере уменьшения α . Исследования МКЭ напряженно-деформированного состояния механически неоднородных образцов с острым V-образным надрезом Шарпи показали, что в мягкой прослойке отмечается наличие двух максимумов напряжений: первый - от концентрации напряжений вследствие геометрической неоднородности в виде надреза, второй - вследствие действия контактного упрочнения. Наличие обширной зоны с высокими нормальными напряжениями приводит к увеличению запаса упругой энергии в образце и способствует охрупчиванию материала тонкой мягкой прослойки. Это позволяет сделать вывод о том, что сварные соединения магистральных трубопроводов, выполненные стыковой сваркой оплавлением, при реальных условиях строительства и эксплуатации находятся в охрупченном состоянии, что предопределяет их повышенную чувствительность к различным дефектам. Однако, в условиях, когда дефекты сварки отсутствуют, сварные соединения, как показали испытания на ударное растяжение в диапазоне температур от 87 до 293 К, обладают высокой энергоемкостью и разрушаются по основному металлу.

Для оценки трещиностойкости таких сварных соединений в настоящей работе определены критические значения коэффициента интенсивности напряжений K_{Ic} для металла светлой полоски. Оно составляет $31,6 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$. Кроме того, для оценки сопротивляемости элементов конструкций хрупкому и квазихрупкому разрушению все более широкое применение находит сопротивление отрыву R_G . Эта харак-

теристика определена по результатам осциллографирования процессов ударного изгиба образцов и численного исследования методом конечных элементов. Она составляет для металла светлой полосы 750–800 МПа. Для стали X-60 уточнена связь, установленная Л.А.Копельяком, между характеристиками трещиностойкости K_{Ic} и R_{ϵ} и параметром структуры материала – диаметром его зерна:

$$R_{\epsilon} = 300 + 100 d^{-1/2} \quad [\text{МПа}]$$

$$K_{Ic} = 12,6 + 4,2 d^{-1/2} \quad [\text{МПа} \cdot \text{м}^{1/2}].$$

Это позволяет определить сопротивляемость сварных соединений хрупкому разрушению по результатам лабораторных металлографических исследований, что значительно сокращает затраты времени и средств.

6. Экспериментальная проверка несущей способности механически неоднородных соединений при двухосном нагружении. Сварные соединения магистральных трубопроводов в процессе эксплуатации подвергаются двухосному растяжению. При этом соотношение осевых σ_z и окружных σ_{θ} нормальных напряжений $m = \frac{\sigma_z}{\sigma_{\theta}}$ может быть больше единицы. Это вызывает поперечные разрывы трубопровода. В настоящей работе проведена экспериментальная проверка несущей способности механически неоднородных кольцевых швов трубопроводов в условиях двухосного растяжения.

Исследования проводили на модельных трубчатых образцах с сваренной композитной прослойкой и натурных трубах диаметром 720 мм. Модельные образцы нагружали внутренним давлением и осевой силой. В натурных образцах соотношение напряжений m искусственно увеличивали бандажированием труб, которые нагружали внутренним давлением.

Экспериментально подтверждено наличие эффекта контактного упрочнения материала кольцевой композитной прослойки при соотношении нормальных напряжений $m > 1$. Установлено, что в случае двухосного растяжения возможно достижение равнопрочности сварных соединений с мягкой композитной прослойкой основному металлу. Перенос места разрушения на основной металл существенно затрудняется вследствие его повышенной устойчивости пластическому деформированию. При достаточно больших значениях относительной толщины композитной прослойки κ разрушение происходит по последней. При $\kappa < \kappa_{\epsilon}$ разрушение происходило как по прослойке, так и по основному металлу при величине средних нормальных напряжений σ_z .

соответствующей временному сопротивлению разрыву основного металла.

Испытания бандажированных труб с кольцевым композитным швом, выполненным по реальной технологии, показали высокую работоспособность таких сварных соединений в условиях двухосного растяжения. Применение бандажирования, как метода изменения соотношения нормальных напряжений, позволило провести испытания кольцевых композитных швов при $m > 1$. Установлено, что наиболее эффективно бандаж вступает в работу в пластической стадии деформирования стенки трубы. Сварные соединения труб, выполненные по указанной технологии, обеспечивают их равнопрочность основному металлу и могут быть применены при сооружении трубопроводов из низколегированных сталей.

Основные выводы

1. Для всех сварных соединений монтажных стыков трубопроводов характерно наличие развитых неоднородностей: химической, структурной и механической. Существенное влияние на несущую способность этих соединений оказывает структурная и механическая неоднородности в зоне стыка, зависящие в значительной мере от способов сварки, технологии выполнения сварных соединений.

2. Разработанные конструкции образцов позволяют определить локальные механические свойства характерных зон сварных соединений на серийном оборудовании.

3. Применение диаграмм пластичности дает возможность с единых позиций проанализировать деформационную способность металла характерных зон сварных соединений с учетом происходящих в них структурных изменений.

4. Применение феноменологической теории разрушения совместно с теоретическим анализом напряженно-деформированного состояния зоны стыка сварных соединений, выполненных стыковой сваркой оплавлением, позволило разработать методику расчетной оценки пластичности зоны термомеханического влияния в зависимости от степени предварительной деформации и структурных изменений в ней.

5. Анализ напряженно-деформированного состояния V-образного шва, выполненный на основе деформационной теории пластичности, показал значительную зависимость жесткости напряженного

состояния от геометрии разделки кромок и относительного зазора в корне шва α . Увеличение последних приводит к снижению жесткости напряженного состояния и увеличению пластичности мягкого шва.

6. Исследование повреждаемости сварных соединений, проведенные методами конечных элементов и муаровых полос показали, что при вовлечении в пластическую деформацию прилегающих к мягкой прослойке твердых участков зоны термомодеформационного влияния в последних может инициироваться очаг разрушения вследствие исчерпания пластичности металла.

7. Применяемые при испытании на ударный изгиб конструкции образцов по ГОСТу 6996-66 не позволяют определить локальные вязкостные свойства вследствие взаимодействия отдельных зон механически неоднородных сварных соединений. Для их оценки рекомендуется образец, разработанный в настоящей работе и защищенный авторским свидетельством.

8. Для оценки склонности сварных соединений с тонкими мягкими прослойками к хрупкому разрушению в виду их малой энергоемкости целесообразно использовать силовые критерии трещиностойкости-вязкости разрушения K_{IC} и сопротивление отрыву R_S .

9. Испытания модельных и натуральных образцов в условиях двухосного растяжения показали высокую работоспособность кольцевых и стыковых соединений трубопроводов и удовлетворительное соответствие расчетной оценки экспериментальным результатам.

10. Результаты работы внедрены на предприятиях Миннефтегазстроя СССР, о чем свидетельствуют акты внедрения, приложенные к работе.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Рекомендации по повышению работоспособности сварных соединений магистральных трубопроводов. - М.: ВНИИСТ, 1974. - 22с.
2. Работоспособность сварных соединений с композитными мягкими швами при статическом и ударном растяжении в условиях низких температур./О.А.Бакши, Ю.И.Анисимов, В.Н.Голиков, Р.С.Зайнуллин, А.В.Пуйко, А.С.Рахманов. - В кн.: Работоспособность машин и конструкций, ч.1 - Якутск: Изд. Якутского филиала СО АН СССР, 1974, с.160-179.

3. Несущая способность кольцевых композитных сварных соединений труб большого диаметра. /О.А.Бакши, Ю.И.Анисимов, А.В.Пуйко и др. - Сварочное производство, 1977, № 6, с.12-14.
4. Работоспособность сварных соединений с кольцевой композитной прослойкой в условиях двухосного растяжения /О.А.Бакши, А.В.Пуйко, В.Н.Голиков - др. - В кн.: Теория и практика сварочного производства, Вып. I. - Свердловск: УПИ, 1977, с.42-46.
5. Методики определения предельной пластичности наплавленного металла шва. /Ю.И.Анисимов, А.В.Пуйко, В.Н.Голиков. - Тез. докл. научно-технической конференции сварщиков зоны Урала. - Курган, 1982, с.98-99.
6. Исследование предельных деформаций наплавленного металла V-образного шва при изгибе /Ю.И.Анисимов, А.В.Пуйко, В.Н.Голиков и др. - Тез. докл. научн. технической конференции сварщиков зоны Урала. - Курган, 1982, с.45-47.
7. А.С. № 976343 (СССР). Способ определения пластичности материала сварного шва. /О.А.Бакши, Ю.И.Анисимов, А.В.Пуйко и др. - Опубл. Б.И. № 43, 23.II.83.
8. Улучшение свойств поперечных швов трубопроводов из стали X-60. /А.В.Пуйко, И.П.Блинкова, В.А.Зубарева. - Тез. докл. 15 зональной конференции сварщиков Урала. - Свердловск, 1983, с.70-71.
9. Влияние угла наклона светлой полоски на показатели ударной вязкости. /Ю.И.Анисимов, А.В.Пуйко, В.А.Зубарева и др. - В кн.: Внедрение современных методов контроля структуры и свойств металлопродукции. - М.: ЦНИИ ЧЕРМЕТ, 1984, с.35 (Тез. докл. Всесоюзн. конференции).
10. Исследование неоднородности сварных соединений, выполненных контактной стыковой сваркой оплавлением. /А.В.Пуйко, В.А.Зубарева, И.П.Блинкова и др. - В кн.: Вопросы сварочного производства. - Челябинск: ЧПИ, 1983, с.84-87.
11. Определение характеристик трещиностойкости углеродистых сталей упрочненных плазменной струей. /С.С.Самотугин, Л.К.Лещинский, И.И.Пирч, Ю.И.Анисимов, А.В.Пуйко. - Заводская лаборатория, 1985, № 7, с.69-72.
12. Образец для определения ударной вязкости материалов. /Ю.И.Анисимов, А.В.Пуйко, О.А.Бакши, А.С.Рахманов (положительное решение по заявке № 3887368/25-28).

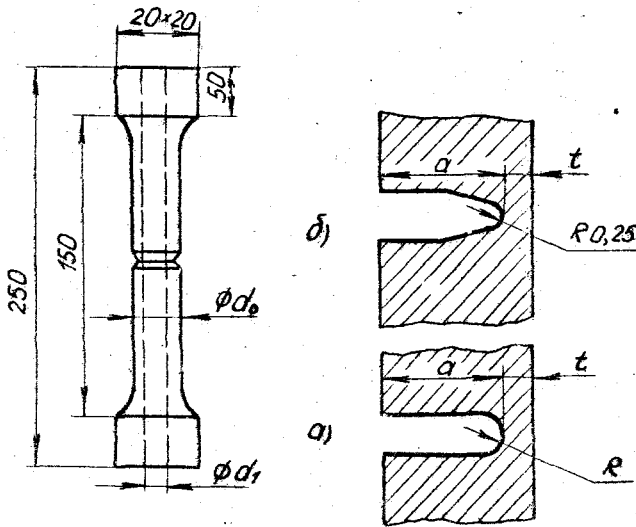


Рис. 1. Конструкция образца для испытания на кручение

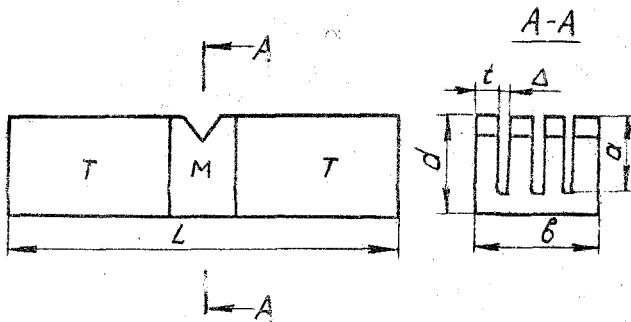


Рис. 2. Конструкция образца для испытаний на изгиб