

5.23.15  
К906

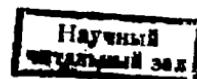
На правах рукописи

Кульевич Вера Борисовна

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ФАКТОРА ВРЕМЕНИ  
НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТЫКОВЫХ СВАРНЫХ  
СОЕДИНЕНИЙ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

Специальность 05.03.06 — "Технология и машины  
сварочного производства"

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук



Челябинск, 1999

Работа выполнена в Южно-Уральском государственном университете.

Научный руководитель — член-корр. РАЕН, доктор технических наук, профессор М.В. ШАХМАТОВ.

Научный консультант — кандидат технических наук, доцент Ю.И. АНИСИМОВ.

Официальные оппоненты. доктор технических наук Лукин В.А. — заместитель генерального директора Уральского НИИ трубной промышленности (г. Челябинск);

кандидат технических наук Распопов А.А. — генеральный директор ООО "Уралспецпроект" (г. Челябинск).

Ведущее предприятие — АО "Трубодеталь" (г. Челябинск).

Зашита состоится " \_\_\_\_ " 1999 г., в \_\_\_\_ ч,

на заседании диссертационного совета Д 053.13.08 в Южно-Уральском государственном университете по адресу:

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

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЮУрГУ.

Автореферат разослан " \_\_\_\_ " 1999 г.

Ученый секретарь совета  
доктор технических наук, профессор



Б.В. Ерофеев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.** Сварка является наиболее эффективным способом сооружения магистральных трубопроводов, качество сварочно-монтажных работ в значительной мере определяет надежность всего трубопровода. Выход из строя трубопровода может привести к большим экономическим потерям, катастрофическим экологическим последствиям и человеческим жертвам. Среди многочисленных причин аварий одной из основных является несовершенство существующих нормативных указаний по проектированию трубопроводов и расчету их на прочность.

Трубопроводные системы и конструкции находят широкое применение во всех областях народного хозяйства, в том числе и в системах магистрального трубопроводного транспорта газа, нефти и нефтепродуктов. Высокая степень ответственности трубопроводов, повышенная их металлоемкость и эксплуатация в чрезвычайно сложных условиях обуславливают исключительно острую необходимость решения проблем обеспечения надежности и безопасности. В настоящее время в стране эксплуатируется значительное число "старых" нефтепроводов (свыше 50 % имеет срок службы порядка 20 лет и более). В связи с этим, большое значение приобретает проблема надежности и работоспособности трубопроводов при длительных сроках эксплуатации.

Наибольшая вероятность отказов трубопроводов падает на основной металл и сварные соединения, выполняемые на стадии строительно-монтажных работ. При этом трубопроводы постоянно в течение всего срока его службы во всех его частях испытывают значительные внутренние напряжения, близкие к нормативным характеристикам прочности металла. В этих условиях даже незначительное отклонение реальных силовых факторов от расчетных приводит трубопроводную систему в предельное состояние, сопряженное с возникновением отказов. В настоящее время методы расчета служебных свойств трубопроводов сводятся к оценке прочности основного металла и сварных соединений по временному сопротивлению, не учитывают их запас пластичности и изменение механических свойств от продолжительности эксплуатации.

В связи с этим, для обеспечения надежности, регламентируемой прочности и безопасности магистральных трубопроводов, исключительно важное и актуальное значение приобретают расчетные и экспериментальные методики прогнозирования изменения механических свойств сварных соединений и металла трубы от времени их эксплуатации.

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ.** Разработка расчетных и экспериментальных методик оценки влияния фактора времени на механические свойства сварных соединений магистральных трубопроводов.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать расчетные и экспериментальные методики оценки механических свойств характерных зон сварных соединений и с их помощью исследовать изменение свойств во времени.
2. Разработать расчетную методику оценки изменения пластических свойств сварных соединений и сталей с течением времени.
3. Исследовать прочностные и пластические свойства сварных стыков реальных магистральных трубопроводов, эксплуатирующихся 10 и более лет.
4. Исследовать прочностные и пластические свойства сварных соединений, изготовленных из трубных сталей, после искусственного старения.
5. Выработать рекомендации по определению истинного сопротивления разрушению при достаточно больших ( $>70\%$ ) степенях деформации, что характерно для пластичных образцов или образцов малых размеров.

О . . . . . В О И Т Р . ОТЫ Работа выполнялась применительно к основному металлу и сварным соединениям низколегированных трубных сталей, выполненных ручной дуговой, контактно-стыковой сваркой и сваркой под слоем флюса. Реализация теоретических задач начиналась с выбора расчетной схемы, принятия ее с обоснованием соответствующих допущений, с последующим анализом полученных решений и экспериментальной проверкой, привлечением данных других исследователей и применением электронно-вычислительных машин. С целью исследования локальных механических свойств характерных зон сварных соединений с помощью микрообразцов была усовершенствована методика, предложенная Л.А. Копельманом. Для моделирования механического поведения сварных соединений труб при длительных сроках эксплуатации в условиях действия постоянного давления разработано специальное малогабаритное изоляционное устройство. Для оценки склонности металлов характерных зон сварного соединения к хрупким разрушениям применена методика ударного изгиба образца с V-образным надрезом (Шарпи) с осциллографированием процесса нагружения при помощи высокочастотного динамометра и широкополосных регистрирующих приборов.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА РАБОТЫ. По итогам проведенных исследований получены новые научные результаты, заключающиеся в следующем:

1. В целом длительная эксплуатация на базе 25...30 лет снижает запас пластичности и зависящее от него истинное сопротивление разрушению, приводя металлы сварного соединения в хрупкое состояние. Как следствие, в различных зонах сварного соединения наблюдается различная склонность металла к старению при длительной эксплуатации

2. Разработана расчетная методика для оценки пластических свойств металла характерных зон сварного соединения, позволяющая по данным маловременных испытаний прогнозировать его механические характеристики после определенного срока эксплуатации.

3. Разработана методика для определения истинного сопротивления разрушению достоверная при достаточно больших ( $>70\%$ ) степенях деформации, что характерно для пластичных образцов или образцов малых размеров. Расчетная методика в отличие от других известных в настоящее время позволяет более точно определять значение истинных разрушающих напряжений.

**ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ.** На основе углубленных исследований изменения исходных свойств сварных соединений и основного металла труб при длительной эксплуатации был разработан современный метод диагностирования остаточного ресурса прочности трубопроводных систем, эксплуатирующихся в условиях Уренгойского газоконденсаторного месторождения. Для практической реализации данного метода разработана Инструкция И-ЗР-02 по диагностированию остаточного ресурса прочности и трещиностойкости газопроводов в Уренгойском регионе.

**АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ.** Диссертация заслушана и рекомендована к защите на научном семинаре кафедры "Оборудование и технологии сварочного производства" Южно-Уральского государственного университета.

Основные результаты работы доложены на Всесоюзном научно-техническом семинаре "Применение математических методов и САПР в сварке" (Санкт-Петербург 1991), НТ конференции "Живучесть и безопасность конструкций и технических систем" (Красноярск 1991), НТ конференции "Современные проблемы сварочной науки и техники, Сварка - 95" (Пермь, 1995), I Международной специализированной выставке "Машиностроение и промышленность" (Челябинск, 1997), НТ конференции "Актуальные проблемы преподавания в современных технических университетах" (Уфа, 1997), II Международной специализированной выставке "Машиностроение прогрессивные технологии" (Челябинск, 1998), 18 конференции сварщиков Урала "Сварка Урала - в XXI век" (Екатеринбург 1999).

**ПУБЛИКАЦИИ.** Основное содержание диссертации отражено в 11 статьях.

**ОБЪЕМ РАБОТЫ.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов и приложения. Она изложена на 104 страницах машинописного текста, включает 64 рисунка и 9 таблиц. Список литературы содержит 184 наименования. В приложение к диссертации вынесены "Инструкция по диагностированию остаточного ресурса прочности и трещиностойкости газопроводов в Уренгойском ре-

гионе" И-ЗР-02, акты внедрения результатов работы, программа для оценки пластических свойств (относительного удлинения) на ЭВМ, статистические расчеты для оценки и определения уравнений регрессии ударной вязкости металла характерных зон сварных соединений.

Автор искренне благодарен научному руководителю члену-корреспонденту РАН, профессору, доктору технических наук М.В. Шахматову и научному консультанту доценту, кандидату технических наук Ю.И. Анисимову за помощь в постановке и проведении настоящей работы.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В введении показана актуальность выбранной темы диссертационной работы, сформулированы цель и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены и проанализированы работы, посвященные вопросам эксплуатации магистральных трубопроводов и методам оценки влияния времени эксплуатации на механические свойства материалов под действием нагрузки с течением времени. Вопросы надежной и рациональной эксплуатации материалов и их сварных соединений становятся все более важными. Однако, как правило, прогнозирование их свойств на длительные сроки службы проводится без учета изменения характеристик материала в процессе эксплуатации и не позволяет оценить степень исчерпания его предельной долговечности на том или ином временном этапе. Механическая прочность является одним из важнейших свойств как металла, так и сварных соединений, определяющим в конечном итоге работоспособность реальных конструкций. Однако под действием даже статической нагрузки механические свойства сварных соединений с течением времени могут значительно меняться, металл подвергается старению, что подтверждает ряд исследований. Успехи в развитии оценки свойств металла связаны с трудами российских ученых Я.Б. Фридмана, С.Н. Журкова, Ю.Н. Работникова, В.Р. Регеля, В.В. Болотина, В.И. Бетехтина, В.М. Гребника, В.И. Веттегрена, И.И. Гольденблата, Л.С. Мороза, О.М. Иванцова, А.А. Илюшина, Ю.Я. Мешкова, С.С. Шураковой, Б.И. Завойчинского, Р.С. Зайнуллина, К.М. Ямалеева, А.Г. Гумерова, Г.Х. Мурзарханов, Ю.И. Пашкова, Г.А. Ланчакова, А.И. Степаненко, О.А. Бакши, М.В. Шахматова и других, а также работы ряда зарубежных авторов (Д. Стоффера, А. Страуса, Т. Томаса, В. Бина и других). Несмотря на обширные исследования в этом направлении большинство работ посвящено прогнозированию механических свойств основного металла, вопрос о влиянии фактора времени на механические свойства сварных соединений практически не рассматривается. Так как сварной шов является неоднородным по своему составу, а сварное соединение

ние в целом тем более неоднородно, то можно предположить, что именно оно будет подвержено наибольшему эффекту старения металла.

К настоящему времени предложено значительное количество методов определения длительной прочности, позволяющих достаточно просто осуществлять экстраполяцию кратковременных диаграмм долговечности сталей и сварных соединений на более длительные сроки (этими вопросами занимались ученые Т.М. Хажинский, В.И. Ковпак, В.С. Иванова, А.Л. Арашкуни, Р.А. Арутюнян, В.Э. Фрайфельд, А.А. Ильюшин, М.Г. Лошах, И.И. Гольденблат, В.Л. Бажанов, Ф. Гарофало и другие). К сожалению, данные подходы не могут быть использованы для оценки свойств сварных соединений трубных сталей, так как характеристика длительная прочность подразумевает под собой испытания и работу при высоких температурах, а магистральные трубопроводы в большинстве своем работают скорее при температурах ниже нуля градусов.

В процессе длительной (10...30 лет) эксплуатации газо- и нефтепроводов происходит старение металла труб и сварных соединений, которое обусловлено накоплением необратимых микропластических деформаций, деформационным старением и наводораживанием, поэтому расчетные модели, основанные на предположении о неизменности свойств во времени будут непригодны.

Вторая глава посвящается предлагаемой математической модели влияния долговременной повреждаемости на механические свойства сварных соединений. Основные допущения, положенные в основу модели заключаются в следующем:

1. Среднее значения деформаций случайны и статистически независимы, с развитием последних накапливаются повреждения.

2. Физическая база пластических деформаций — источники дислокаций и их группы. Каждый источник работает независимо и характеризуется критическим напряжением срабатывания. Интенсивность срабатывания пропорциональна числу источников и мере поврежденности.

3. Материал изменяет свои свойства вследствие накопления неупругих и пластических деформаций и поврежденности.

4. Мерой поврежденности принимается относительная накопленная деформация  $\omega$ ,

$$\omega = \frac{\epsilon}{\epsilon_s}, \quad (1)$$

где  $\epsilon$  и  $\epsilon_s$  — накопленная и предельная деформации.

5. В пространстве (вероятность — время) вводится локальное время системы (совокупности фрагментов)

$$t = \theta_4. \quad (2)$$

6. Принимается эффект перемешивания статистически случайных микрочаек повреждений разного уровня и стадий деформирования.

7. В пространстве  $(\rho(t) - t)$  процесс принимается стационарным и гауссовским.

8. Для математико-статистического анализа принимаем, что деформируемый объем металла представляет собой совокупность хаотически ориентированных фрагментов — идеальных областей кристаллической решетки, проходящих жизненный цикл. Последний понимается как эволюция фрагмента в масштабе локального времени от упруго, пластического состояния до финишной стадии разрыхления и появления несплошностей различного вида. Последняя стадия отвечает выходу материала из строя, при этом показатель поврежденности  $\omega=1$ .

Процесс накопления повреждений связан с пластической деформацией, протекающей по трем стадиям разного уровня. При вязком и квазивязком разрушении процессы повреждаемости металла происходят на субмикро-, микро- и макроуровнях соответственно.

Микродеформации фрагментов, как показывают экспериментальные данные, являются стохастически независимыми: они разделены либо пространственно (происходит в разных местах объема металла), либо во времени (повторный сколок возможен спустя некоторое время, когда информация не зависит от времени). Математически это положение можно выразить в виде

$$\frac{d\omega}{dt} = a(t) \cdot \omega + b(t) \cdot r(t), \quad (3)$$

где  $r(t)$  — случайный процесс с функцией  $b(t)$ ,  $a(t)$  — число фрагментов, характеризующее среднюю скорость процесса.

Если ввести локальное время

$$t = \int \frac{a_0 dt}{a(t)}, \quad (4)$$

то получим уравнение стационарного, нормального процесса

$$\frac{d\omega}{dt} = a_0 \cdot \omega + \bar{\sigma}(t) \cdot r(t). \quad (5)$$

при начальном условии  $\omega(t_0) = \omega_0$ ,

получим решение уравнения (4), (5)

$$\omega(t) = \omega_0 \cdot e^{-a_0(t-t_0)} + \int_{t_0}^t e^{-a_0(t-s)} \cdot \bar{\sigma}(s) ds. \quad (7)$$

Отсюда получим среднее значение поврежденности

$$\langle \omega(t) \rangle = \frac{b}{a_0} + \left[ \omega_0 - \frac{b}{a_0} \right] \cdot e^{-a_0(t-t_0)}. \quad (8)$$

где  $\omega_0$  — поврежденность в начальный момент времени;  $t_0$  — начальное время;  $t$  — конечное время;  $a_0, b$  — экспериментальные коэффициенты

Зная значение поврежденности в начальный момент времени и через какой-либо промежуток времени, можно определить коэффициенты уравнения (8), и затем спрогнозировать значение поврежденности через интересующий нас промежуток времени. Для облегчения расчетов была разработана программа, позволяющая производить расчет на персональном компьютере типа IBM PC. Для статистического анализа экспериментальных данных, ввиду незначительного количества образцов, подвергающихся испытаниям, применен метод статистической обработки данных известный под названием "бутстреп". Данный метод позволяет получить законы распределения статистических оценок даже в случаях ограниченной статистической информации и решать статистические задачи, базирующиеся на знании законов распределения. Эти возможности особенно полезны при обработке результатов испытаний, характеризующихся высокой трудосмостью и длительностью, а именно к таким испытаниям и следует отнести оценку изменения свойств сварных соединений с течением времени.

Третья глава посвящена разработке и усовершенствованию методических вопросов экспериментального исследования напряженно-деформированного состояния образцов при статическом и ударной нагрузке.

Существующие методы испытаний стандартных образцов не всегда позволяют достоверно определить механические свойства металла характерных зон сварного соединения, особенно если размеры этих зон незначительной протяженности.

В качестве основных методов исследования влияния времени эксплуатации на механические свойствастыковых сварных соединений выбраны испытания на растяжение и ударный изгиб.

Испытания предлагаются проводить с помощью образцов трех видов

1. Микрообразцы (испытания на растяжение). Известно, что сварные соединения в агрегатном состоянии являются механически неоднородными и имеют различные прочностные и пластические показатели и, следовательно, различную работоспособность. Разрушение металла сварного соединения при эксплуатации начинается с микроучастков и затем распространяется по той или иной зоне. Однако размеры отдельных зон сварных соединений часто не позволяют вырезать образец  $\varnothing 5$  мм. В этих случаях используется методика микромеханических испытаний. За основу была принята методика, предложенная Л.А. Копельманом. Из сварных соединений реальных трубопроводов, эксплуатировавшихся в течение 30 лет, были изготовлены микрообразцы. Конструкция микрообразца позволяет определить механические свойства практически любой зоны сварного

соединения. Для удобства проведения испытаний разработана установка и приспособления для испытания микрообразцов на растяжение, позволяющие надежно центрировать образец, а также плавно нагружать его с постоянной скоростью, избегая динамических нагрузок.

Испытания на статическое растяжение сварных образцов являются наиболее распространенным методом определения комплекса механических свойств. ГОСТ 6996 предусматривает нахождение прочностных и пластических характеристик: предела текучести, временного сопротивления, относительного сужения. В научно-исследовательской практике находит применение и истинное сопротивление разрушению —  $S_e$ .

Однако влияние формы шейки, искажающее одностороннее растяжение, существенно повышает величину так называемого истинного напряжения, по сравнению с величиной сопротивления металла деформированию и при том тем выше, чем больше местное сужение в шейке.

С целью наиболее точного определения истинного сопротивления разрушению, разработана расчетная методика. Усилие деформирования образца с шейкой предлагается определять по формуле

$$P_0 = S_0 \cdot K_p, \quad (9)$$

где  $S_0$  — истинное напряжение деформирования шейки;

$K_p$  — поправочный коэффициент,

$$K_p = k^2 \cdot \left( 1 + \frac{1-k}{\sqrt{k}} f(k) \right); \quad (10)$$

$$f(k) = \frac{0,16 \cdot (1 + 4,2k)}{\sqrt{k} \cdot (2 - k) + \sqrt{k \cdot (2 - k)^2 + 0,32 \cdot (1 + 4,2k) \cdot (1 - k^2)}}; \quad (11)$$

$$k = \sqrt{l - \psi}, \quad (12)$$

$\psi$  — относительное сужение образца.

Первые решения задачи о напряженном состоянии растянутого цилиндрического образца были получены Н.Н. Давиденковым, Н.И. Спиридоновой, И.П. Бриджменом. В дальнейшем эта проблема изучалась Н.А. Шапошиковым, О.Д. Хлопотовым, В.М. Сегалом, С.С. Одигтом, Ю.Г. Вяженицевым и другими с разных позиций на основе закономерностей деформационного состояния, изученных экспериментально. В большинстве работ, кроме В. Чена и А. Ницельмана, не учитывается деформационное упрочнение, эффект и зоны разгрузки в жестких частях образца с шейкой. Данная расчетная методика, в отличие от других известных, в настоящее время позволяет не завышать значение истинных разрушающих напряжений и достоверно определить истинное сопротивление разру-

шению при весьма больших ( $\psi > 70\%$ ) степенях деформации, что характерно для пластичных образцов или образцов малых размеров.

2. Цилиндрические образцы (испытания на растяжение) специальной конструкции. Образцы выполняются с проточкой Ø 4 мм, которая является рабочей частью образца и представляет собой базу деформирования исследуемого мегалла. Длина проточки выбирается такой, чтобы она была меньше ширины шва.

Для моделирования поведения сварных соединений труб при длительных сроках эксплуатации в условиях действия постоянного давления разработано специальное малогабаритное натяжное устройство. Оно позволяет в лабораторных условиях осуществлять нагружение постоянно действующей растягивающей силой, соизмеримой с нагрузкой в действующем трубопроводе, малоразмерного образца с необходимой временной базой испытаний, исчисляемой годами. Информация о нагрузке в образце регистрируется измерителем деформаций типа ИДЦ-1. По величине деформаций тензодатчиков подсчитывается номинальное, среднее напряжение в образцах. Уровень номинальных растягивающих напряжений в процессе выдержки принимался равным 0,8 σ<sub>t</sub> основного металла.

3. Стандартные плоские образцы с концентратором (испытания на ударный изгиб). Испытания проводились на образцах, как вырезанных из реальных трубопроводов, проработавших в течение 30 лет, так и выдержаных под постоянной растягивающей нагрузкой в течение длительного времени.

Образцы выполнялись согласно рекомендациям ГОСТ 9454 по геометрии и форме надреза. Учитывая особенности и возможности по уровню нагрузки натяжного устройства, были выбраны плоские образцы с размерами поперечного прямоугольного сечения: шириной 10 мм и толщиной 5 мм с концентратором V-образного типа (Шарпи). Надрез наносили посередине шва и границе сплавления основного металла и сварного шва для случая дуговой сварки, для электроконтактных образцов — по светлой полоске. Для возможности загрузки в малогабаритное натяжное устройство, образцы изготавливали с круглыми головками, которые после снятия нагрузки отрезали.

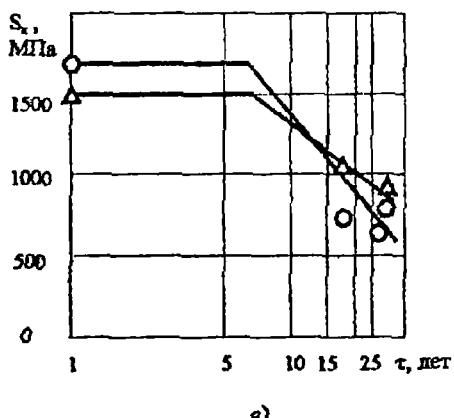
Для исследования ударной вязкости сварного соединения предлагается использовать методику разделения ударной вязкости на составляющие. Данная методика позволяет выделить из общей работы разрушения энергетические затраты на стадии зарождения и устойчивого роста трещины, которые могут применяться как самостоятельные характеристики при выборе материалов.

Изучение механических свойств сварных соединений при длительной выдержке под нагрузкой проводили для основных способов сварки, применяемых при сварке стыков труб межпромысловых коллекторов газодобывающих комплексов ПО "Уренгойгаздобыча" — ручной дуговой, контактно-стыковой элек-

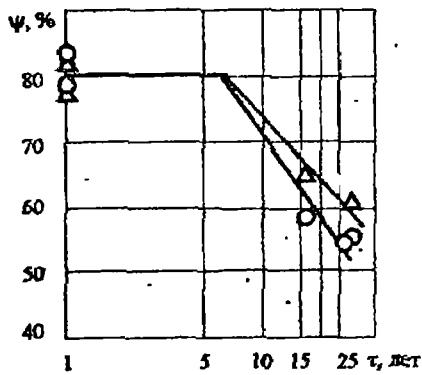
трической оплавлением и сварки под слоем флюса. В качестве характерных зон сварных соединений выбирались участки наиболее опасные в плане эксплуатационной надежности, имеющие повышенную концентрацию деформаций и напряжений или ухудшенную металлографическую структуру. Для ручной дуговой сварки оценивались свойства в зоне (границе) сплавления и металле шва, для электроискровой — светлой полоски стыка.

В четвертой главе рассматриваются результаты испытаний образцов, вырезанных из реальных стыков магистральных трубопроводов эксплуатирующихся в течение 30 лет на растяжение (микрообразцы) и ударный изгиб.

Установлено, что механические свойства характерных зон сварного соединения значительно изменяются с течением времени, в частности пластические свойства и ударная вязкость падают, а прочностные значительно не изменяются. В зависимости от времени изменение свойств происходит неравномерно, примерно до 8...10 лет они остаются практически постоянными и лишь при больших сроках происходят заметные изменения (рис. 1). Анализ статистических данных о разрушениях магистральных трубопроводов показывает, что практически в этот же период наблюдается всплеск частоты отказов и разрушений трубопроводов. В связи с этим необходимо сказать, что такое совпадение по годам всплеска отказов и перелома в зависимостях свойств от времени является не случайным и указывает на смену закономерностей в доминирующем механизме замедленного микроразрушения от вязкого при малых временах к хрупкому при больших.



a)



b)

Рис. 1. Механические свойства основного и наплавленного металла при разных сроках эксплуатации:

○ — основной металл; Δ — металл шва

Как показывают результаты исследований, для основного металла его ударная вязкость КСВ, как показатель сопротивляемости разрушению, после 25...30 лет эксплуатации снижается ниже допустимого значения [КСВ]. Ударная вязкость сварного шва даже при крайне большом сроке эксплуатации трубопровода, равным 29 годам, находится выше [КСВ] (рис. 2). Общие закономерности изменения ударной вязкости металла шва в процессе эксплуатации в первом приближении можно считать аналогичными таковым для основного металла.

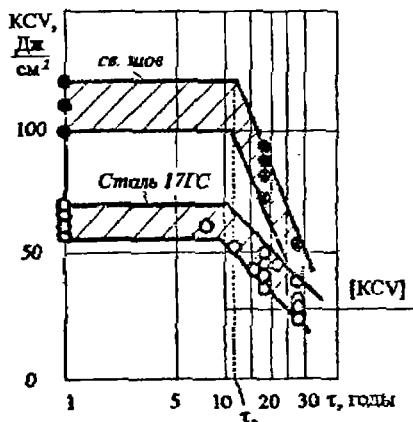


Рис. 2. Сопоставление ударной вязкости металла шва и стали 17ГС при разных сроках эксплуатации трубопровода

Тем не менее, следует сказать, что минимальные значения работы распространения трещины наплавленного металла находятся на пределе нормативных требований —  $(K_{C_p})_{\min} = [K_{C_p}]$ . В связи с этим для металла шва к 29 годам эксплуатации повысилась вероятность протяженного, лавинного разрушения, также повысилась чувствительность к концентраторам вследствие существенного снижения КС<sub>в</sub>. Темп снижения ударной вязкости и, соответственно, темп старения, характеризуемые углом наклона прямой КСВ —  $\ln t$ , у металла шва значительно больше, чем у основного металла. Анализ результатов испытаний показал, что работа распространения трещины определяет граничное время  $t_*$ , при превышении которого происходит снижение ударной вязкости и смена доминирующего механизма разрушения. Это положение отражает и характер осциллограмм "усилие-время" ударного изгиба образцов, вырезанных из сварных соединений с разным сроком эксплуатации. Об этом же свидетельствуют фрактографические исследования изломов ударных образцов, изготовленных из сварных швов после 18 и 29-летнего сроков эксплуатации в составе трубопровода.

Общие закономерности изменения ударной вязкости коррелируются с результатами испытаний на статическое растяжение микрообразцов из сварного шва и основного металла.

Пятая глава посвящена экспериментальным исследованиям искусственно состаренных образцов. После выдержки под нагрузкой в течение 1 года и 5 лет образцы разгружались и проводились испытания по стандартной методике на статическое растяжение.

По результатам статических испытаний на растяжение оценивались характеристики металла шва:  $\sigma_s$  — временное сопротивление,  $\sigma_t$  — предел текучести,  $S_x$  — истинное сопротивление разрыву, определяемое с учетом формулы (10),  $\psi$  — полное относительное сужение,  $\psi_0$  — равномерное относительное сужение и  $B'$  — хрупкая составляющая в поперечном сечении излома образца, характеризующая картину разрушения

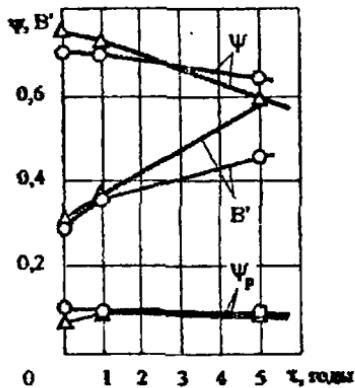
$$B' = \frac{F_r}{F_k} \cdot 100\%, \quad (13)$$

где  $F_r$  — площадь поперечного сечения в центре разрушения образца;  $F_k$  — общая площадь поперечного сечения шейки образца в месте разрушения.

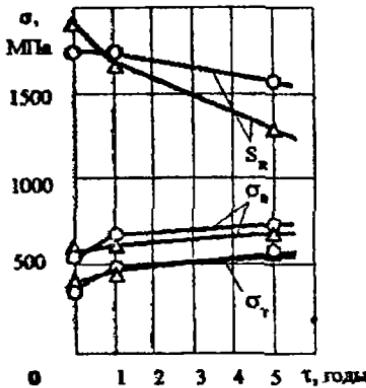
В целом годичные и пятилетние выдержки образцов под растягивающей нагрузкой на уровне, равном 80 % от предела текучести, показали достаточно заметные изменения механических свойств соединений, сваренных по двум технологиям: ручной дуговой и контактно-стыковой сваркой огневлением.

Прочностные свойства  $\sigma_s$  и  $\sigma_t$  для обоих способов сварки возрастают, однако истинные напряжения разрушения  $S_x$  уменьшаются, что связано с уменьшением пластичности металла при больших степенях деформирования. Полное относительное сужение уменьшается с течением времени, а равномерное сужение слабо зависит от времени (рис. 3). Сопоставление прочностных и деформационных свойств сварных соединений показывает, что наиболее заметно процессы старения протекают в контактно стыковых соединениях: к пятилетнему сроку предварительного нагружения контактно-стыковые соединения имеют более низкие значения  $S_x$  и  $\psi$ , чем дуговые.

Наряду с механическими характеристиками образцов, была определена амплитудная зависимость логарифмического декремента колебаний внутреннего трения. Данная характеристика наиболее чувствительна к начальным стадиям деформационного старения. Действительно, старение в течение 5 лет приводит к монотонному увеличению фона внутреннего трения и снижению крутизны его амплитудной зависимости, что соответствует начальной стадии деформационного старения.



а)



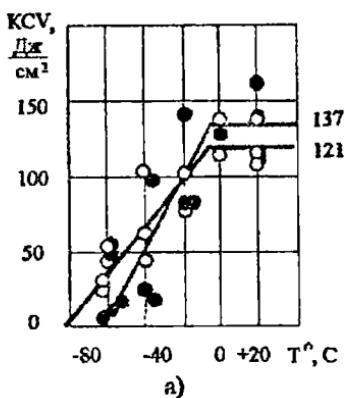
б)

Рис. 3. Сопоставление механических свойств сварных соединений выполненных ручной дуговой (РДС) и контактно-стыковой (КСС) сваркой при разных временных базах выдержки под растягивающей нагрузкой:

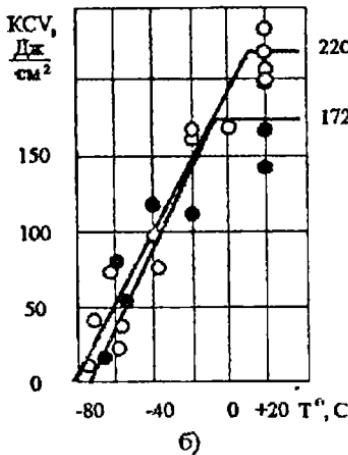
○ — РДС;      △ — КСС

Проведена аппроксимация и вероятностно-статистическая корреляция температурной зависимости ударной вязкости сварных соединений. Зависимость ударной вязкости металла дугового шва от времени неоднозначная. Средние значения KCV металла шва при  $T = +20^\circ\text{C}$  после пятилетней выдержки не уменьшились, а увеличились на 10% по сравнению с годичной (рис. 4, а). Однако, как показали статистические расчеты, такая разница на фоне повышения дисперсии (разброса выборки от среднего) статистически не значима. Вследствие этого приходиться говорить лишь о тенденции к повышению ударной вязкости после пятилетнего срока выдержки под нагрузкой. Обоснована физическая возможность существования эффекта повышения ударной вязкости в некотором временном интервале.

В тоже время после пятилетней выдержки ударная вязкость металла шва при пониженных температурах ( $T < -40^\circ\text{...}50^\circ\text{C}$ ) меньше таковой после годичного срока нагружения, что приводит к повышению температуры порога хладноломкости  $T_2$ . Следует отметить, что дисперсия значений ударной вязкости увеличивается после пяти лет нагружения на растяжение примерно на 50...60 %, что указывает на огрубление структуры и снижение пластических свойств металла шва.



a)



б)

Рис. 4. Температурная зависимость ударной вязкости металла дугового шва и границы сплавления после годичной и пятилетней выдержки под растягивающей нагрузкой:

● — нагружение 1 год; ○ — нагружение 5 лет

Таким образом, несмотря на некоторый рост ударной вязкости металла шва после пятилетней выдержки, у него появляется чувствительность к температуре и скорости нагружения и снижаются пластические свойства.

Металл на границе сплавления после пятилетнего срока нагружения снижает свои вязкостные свойства, увеличивается температура нижнего порога хладноломкости примерно на  $10^0$  С, увеличивается разброс свойств (рис. 4, б). Таким образом, металл шва на границе сплавления, испытанный на ударный изгиб, показывает снижение ударной вязкости во всем интервале комнатных и пониженных температур. Кроме того, такая закономерность в снижении ударной вязкости указывает на более высокую относительную скорость уменьшения пластических свойств металла границы сплавления по сравнению с ростом прочностных свойств. В связи с этим можно сделать вывод о том, что металл на границе сплавления более чувствителен к процессам старения, чем таковой в центральной области шва, и первые повреждения микроскопического типа (трещины, порывы) будут происходить по границе сплавления.

Экспериментальные данные об ударной вязкости контактно-стыковых соединений противоречивы, ввиду небольшого числа образцов (10 образцов), предоставленных заказчиком и весьма большого разброса значений КСВ. Поэтому установить четкие закономерности изменения ударной вязкости контактного соединения от времени нагружения при 5-летнем сроке не удалось.

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Основным технологическим процессом при строительстве магистральных трубопроводов является сварка, качество сварных соединений в значительной мере определяет надежность всего трубопровода. В то же время современные нормативные указания не учитывают особенность структуры и напряженного состояния сварного соединения. В настоящее время методы расчета служебных свойств сварных соединений трубопроводов сводятся к оценке прочности по временному сопротивлению, не учитывают запас пластичности и износение механических свойств от времени и продолжительности эксплуатации.

2. Разработана методика для определения истинного сопротивления разрушению достоверная при достаточно больших (>70%) степенях деформации, что характерно для пластичных образцов или образцов малых размеров. Расчетная методика, в отличие от других известных в настоящее время, позволяет более точно определить значение истинных разрушающих напряжений.

3. Регламентируемые строительными нормами и правилами — СНиП, методы определения механических свойств сварных соединений трубных конструкций не позволяют оценить механические свойства характерных зон сварного соединения, которые являются необходимыми при оценке чувствительности металлов по зонам от времени эксплуатации и склонности к старению. Существующие представления о влиянии фактора времени на кинетику и механизмы процессов деформирования и разрушения материалов и конструкций находятся на стадии становления, отсутствует единая концепция о физической природе зависимости механических свойств материалов от сроков эксплуатации, недостаточно разработана инструментальная основа для оценки служебных свойств.

4. Для исследования влияния фактора времени на изменения физико-механических свойств, структуры и фрактографии разрушений сварных соединений к основного металла газонефтепроводных труб разработаны и созданы ряд специальных испытательных установок, устройств и приборов и используется ряд современных физико-механических методик. Для оценки локальных механических свойств металла сварного соединения при длительных сроках эксплуатации используется метод испытания микрообразцов на специальной установке с регулируемой скоростью деформации. Микрообразцы позволяют локализовать нагружение именно в зоне шва или зоне термического влияния и применимы как для "свежего" металла, так и для сварных соединений находящихся в эксплуатации. Разработана методика для моделирования в лабораторных условиях механического поведения сварных соединений труб при длительных сроках эксплуатации в условиях действия постоянного давления, позволяющая в лабораторных

условиях осуществлять нагружение малоразмерного образца на необходимой временной базе.

5. В целом длительная эксплуатация на базе 25...30 лет снижает запас пластичности и зависящее от нее истинное сопротивление разрушению, приводя металлы сварного соединения в охрупченное состояние. Как следствие, у металлов различных зон сварного соединения наблюдается различная склонность к старению при длительной эксплуатации. В частности, металл сварного шва менее подвержен старению по сравнению с основным металлом и зоной термического влияния, металлы контактно-стыкового шва охрупчивается больше, чем металл дугового шва.

6. Экспериментальные исследования влияния времени эксплуатации трубопроводов, проработавших до 30 лет, на сопротивляемость разрушению сварных соединений и основного металла с использованием методики испытаний образцов Шарпи ударным изгибом и регистрацией осцилограмм "усилие-время" показали, что с увеличением срока эксплуатации ударная вязкость и ее составляющие работы зарождения и распространения трещины металла шва, зоны термического влияния и основного металла снижаются, однако по годам темп снижения различен.

7. Результаты исследований показывают, что прочностные и пластические характеристики характерных зон сварного соединения трубы, определенные по стандартным методикам, изменяются на малой временной базе (5 лет). Изменение комплексной характеристики — истинного сопротивления отрыву, повышение прочностных свойств и достаточно заметное снижение пластических характеристик различных зон сварного соединения свидетельствуют о наличии начальных стадий процессов старения металлов сварного соединения после пятилетнего периода нагружения под постоянно действующей нагрузкой равной 0,8 от предела текучести. Наиболее интенсивно протекают деформационные процессы старения в соединениях выполненных контактно-стыковой сваркой

8. После пятилетнего срока выдержки ударная вязкость металла шва при пониженных температурах меньше таковой после годичного срока нагружения. Происходит повышение температуры нижнего порога хладноломкости на 17° С. На границе сплавления металла шва с основным металлом происходят процессы старения более интенсивно по сравнению с таковыми в центральной области шва и первые повреждения микроскопического типа (трещины, порывы) могут появиться в первую очередь именно в этой области.

9. Исследование процесса изменения механических свойств металла сварного соединения физическими методами с позиций металлофизики подтверждает наличие начальных стадий старения после пятилетнего периода нагружения. При

анализе амплитудной зависимости логарифмического декремента затухания колебаний установлено, что нагружение в течение 5 лет приводит к монотонному увеличению фона внутреннего трения и снижению крутизны его амплитудной зависимости, что в свою очередь связано с уменьшением подвижности дислокаций путем их блокирования примесными атомами азота и углерода, в результате развития эффекта деформационного старения металла сварного соединения.

10. На основе углубленных исследований изменения исходных свойств сварных соединений и основного металла газопроводных труб при длительной эксплуатации был разработан современный неразрушающий метод диагностирования остаточного ресурса прочности газопроводных систем, эксплуатирующихся в условиях Уренгойского газоконденсаторного месторождения. Для практической реализации данного метода разработана инструкция по диагностированию неразрушающими методами остаточного ресурса газопроводов.

Результаты работы внедрены на двух предприятиях, о чем свидетельствуют акты внедрения, приложенные к работе.

#### ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

1. Анисимов Ю.И., Кульевич В.Б. К вопросу о влиянии времени эксплуатации на механические свойства трубопроводов// Вопросы сварочного производства: Сборник научных трудов. — Челябинск: ЧГТУ, 1994. — С. 35–41.

2. Анисимов Ю.И., Кульевич В.Б. К вопросу о профиле шейки растягиваемого образца// Там же. — С. 54–59.

3. Анисимов Ю.И., Кульевич В.Б., Пашков Ю.И. Прогнозирование запаса пластичности сварных соединений при длительных сроках эксплуатации// Современные проблемы сварочной науки и техники: Мат-лы НТ конф. — Пермь: ГГТУ, 1995. — Ч. 1. — С. 147–149.

4. Прогнозирование остаточного ресурса прочности магистральных газонефтепроводов с учетом продолжительности эксплуатации/ Ю.И. Пашков, Ю.И. Анисимов, В.Б. Кульевич и др.// Строительство трубопроводов. — 1996. — № 2. — С. 2–5.

5. Анисимов Ю.И., Кульевич В.Б. К вопросу изменения механических свойств стыковых сварных соединений трубных сталей во времени// I Международная специализированная выставка "Машиностроение и промышленность": Сборник тезисов докладов конференции. — Челябинск: ЗАО ЮУЭКСПО, 1997. — С. 63.

6. Анисимов Ю.И., Кульевич В.Б. Разработка расчетной методики оценки прогнозирования свойств материалов трубопроводов и их сварных соединений в процессе их старения// Актуальные проблемы преподавания в современных технических университетах: Тезисы докладов.— Уфа: Изд-во УГНТУ, 1997.— С. 90.

7. Кульевич В.Б., Ершов В.В., Федоров С.П. Неразрушающий контроль уровня напряжений в машиностроении// II Международная специализированная выставка "Машиностроение прогрессивные технологии": Сборник тезисов докладов конференции.— Челябинск: ЗАО ЮУЭКСПО, 1998.— С. 81.

8. Анисимов Ю.И., Кульевич В.Б. Влияние длительности нагружения на ударную вязкость металла сварных соединений// Там же.— С. 82.

9. Анисимов Ю.И., Кульевич В.Б. Влияние времени эксплуатации на механические свойства стыковых сварных соединений магистральных трубопроводов// Прогрессивные технологии в машиностроении: Сборник научных трудов.— Челябинск: Издательство ЮУрГУ, 1998.— С. 169–171.

10 Анисимов Ю.И., Кульевич В.Б. Изменение механических свойств сварных соединений находящихся длительное время под действием постоянной статической нагрузки// Там же.— С. 172–174.

11. Анисимов Ю.И., Шахматов М.В., Кульевич В.Б. Влияние искусственного старения на механические свойства сварных соединений трубных сталей// Тезисы докладов 18-й конференции сварщиков Урала.— Екатеринбург: Изд-во УГТУ, 1999.— С. 17–19.

Кульневич Вера Борисовна

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ФАКТОРА ВРЕМЕНИ  
НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТЫКОВЫХ СВАРНЫХ  
СОЕДИНЕНИЙ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

Специальность 05.03.06. — "Технология и машины  
сварочного производства"

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Издательство Южно-Уральского государственного университета

---

ЛР № 020364 от 10.04.97. Подписано в печать 22.03.99. Формат 60\*84 1/16.  
Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,16. Уч.-изд. л. 1. Тираж 100 экз. Заказ 73/123.

---

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