М 316635

НА ДОМ НЕ ВЫДАЕТСЯ

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР

Московское

ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени высшее техническое училище имени Н.Э.Баумана

На правах рукописи

СИЛЬВЕСТРОВ Юрий Григорьевич

ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ РАЗРУШЕНИЯ СВАРНЫХ СОСУДОВ И ТРУБОПРОВОДОВ

(05.04.05 - Технология и машины сварочного производства)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 1977

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
С С С Р

М о с к о в с к о е

ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени высшее
техническое училище имени Н.Э.Баумана

На правах рукописи

СИЛЬВЕСТРОВ Юрий Григорьевич

М316635

ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ РАЗРУШЕНИЯ СВАРНЫХ СОСУДОВ И ТРУБОПРОВОДОВ

(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

НТБ МГТУ им. Н.Э.Баумана
1316635
Сильвестров Ю.Г. Исследова

Москва 1977

Работа выполнена в Московском ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени высшем техническом училище имени Н.Э.Баумана.

Научный руководитель – д.т.н.,профессор КУРКИН С.А.
Официальные оппоненты: д.т.н.,профессор АНУЧКИН М.П.
к.т.н.,ст.н.с. ВИНКЛЕР О.Н.

Ведущее предприятие указано в решении Ученого Совета.

Защита диссертации состоится " "_____1977 г. на заседании специализированного Совета К053.15.03 по технологии и машинам сварочного производства Московского ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени высшего технического училища им.Н.Э.Баумана по адресу: Москва,107005, 2-я Бауманская, д.5.

Ваши отзывы в 2-х экземплярах, заверенные печатью, просьба высылать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Училища.

Автореферат разослан " "_____1977 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО СОВЕТА
д.т.н.,доцент ЯМПОЛЬСКИЙ В.М.

Тип. МВТУ им. Н.Э.Баумана, тир. 100 экз., объем 1 п.л.
Л – 80014, подписано к печати 8.7.1977г. Зак. 1212

ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ
МВТУ им. Н.Э. Баумана БИБЛИОТЕКА

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Расширение освоения месторождений нефти и газа в северных районах нашей страны требует развитой сети магистральных трубопроводов и сосудов, работающих в условиях низкой температуры. Так как разрушения этих конструкций представляют опасность и приводят к значительным материальным потерям, возрастают требования к обеспечению их надежной работы. Этим объясняется актуальность исследований, направленных на повышение сопротивляемости разрушению сосудов и трубопроводов.

Цель работы. Целью работы является оценка сопротивляемости разрушению листового металла и сварных соединений при нормальных и низких температурах применительно к условиям работы стенки трубы или сосуда.

Методы исследования. Исследование сопротивляемости разрушению производили при испытании плоских образцов на растяжение и элементов сосуда или трубы в виде цилиндрической панели, нагружаемой в установке двухосного растяжения УДР-12 методом гидростатического выпучивания. Раскрытие кромок надреза и усилие записывали непрерывно на ленту осциллографа. Для определения величины критического раскрытия надреза использовали визуальные измерения под микроскопом характерных размеров надреза и трещины. При определении поправки на инерционность приборов в методе тепловой волны для нахождения работы распространения трещины использовали моделирование на АВМ.

Научная новизна. Вскрыты особенности процесса разрушения стенки сосуда из низкоуглеродистой и низколегированной сталей от поверхностного трещиноподобного дефекта при нормальной и низкой температурах. Установлено различие зависимости величины критического раскрытия кромок сквозной и поверхностной трещины от температуры. Показано, что снижение величины δ_c поверхностного дефекта под действием термодеформационного цикла сварки в условиях нагружения при $T < T_{кр}$ может служить причиной разрыва стенки при низком уровне напряжений. Установлено, что критический коэффициент интенсивности напряжений K_c на момент начала движения трещины от сквозного трещиноподобного дефекта в средней части толщины и $K_{cд}$ бегущей трещины - величины примерно одинаковые.

Практическая ценность. Разработанная методика позволяет оценивать сопротивляемость листового металла и сварных соединений началу движения трещины и ее распространению в направлении толщины стенки трубы или сосуда от поверхностного трещиноподобного дефекта при различных температурах эксплуатации.

Апробация работы. Методика определения критического раскрытия надреза в момент начала движения трещины нашла применение в Воронежском филиале ВНИИАвтогенмаш для оценки сопротивляемости разрушению различных зон сварного соединения в присутствии водорода. Основные положения работы докладывались на XУШ итоговой конференции сварщиков г. Москвы, на научно-техническом семинаре "Методы оценки и пути повышения качества газонефтепроводных труб" в г. Челябинске и на научном семинаре кафедры АМ-7 МВТУ им. Н.Э.Баумана.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав и общих выводов по работе. Выполнена на 222 машинописных листах, содержит 82 рисунка, I4 таблиц и 94 наименования использованных литературных источников.

Глава I. Вопросами сопротивляемости начальной стадии разрушения сосудов и трубопроводов из сталей малой и средней прочности занимались многие исследователи (Анучкин, Хан, Даффи и др.). При этом большинство теоретических и экспериментальных разработок касается разрушения от сквозного надреза или трещины. В то же время для стенки трубы или сосуда наиболее характерен несквозной, чаще всего поверхностный, трещиноподобный дефект. На начальном этапе разрушения стенки происходит распространение трещины от такого дефекта в направлении по толщине вплоть до нарушения герметичности. Этот этап разрушения практически не изучен. В то же время он приводит к образованию течи и в значительной степени определяет будет ли образовавшаяся сквозная трещина стабильной или нестабильной.

Для оценки сопротивляемости начальной стадии (зарождению) разрушения в настоящее время используют методы механики разрушения. В сосудах и трубопроводах из сталей малой и средней прочности с относительно небольшой толщиной стенки разрушению обычно предшествует развитая пластическая деформация. В этом случае в качестве критерия часто используют критическое раскрытие δ_c Обычные методы определения δ_c не позволяют установить его ве-

личину в момент начала движения трещины, если нестабильности предшествует стадия устойчивого роста. В то же время именно эта величина, по данным ряда работ (Steigerwald , Terry), характеризует свойства материала и не зависит от размеров образца и исходной трещины.

Влияние сварки может в значительной степени понизить сопротивляемость начальной стадии разрушения. Основное неблагоприятное воздействие сварки заключается в сочетании концентрации напряжений у дефектов шва или околошовной зоны с низкими механическими свойствами металла в локальных участках у вершины дефекта. Гиренко, Винокуровым, Бурдекиным и др. показано, что для ряда низкоуглеродистых сталей главной причиной снижения сопротивляемости разрушению является пластическая деформация и старение в концентраторе. Некоторые трубные стали, напротив, чувствительны к термическому циклу сварки. Для оценки влияния сварки на сопротивляемость разрушению используют обычно образцы с надрезами, вершина которых помещается до или после сварки в наиболее неблагоприятной зоне сварного соединения. Однако применительно к условиям работы стенки трубы или сосуда эти методы оценки разработаны недостаточно.

Если нестабильная трещина возникает и разгоняется в дефектном месте, например связанном со сваркой, то для ее остановки основной металл должен обладать высокой сопротивляемостью распространению бегущей трещины. Для магистральных газопроводов в условиях возможного лавинного разрушения сопротивляемость распространению бегущей трещины играет особенно большую роль. Для ее оценки используется удельная работа распространения трещины a_p и связанный с ней динамический коэффициент K_{cg} . Для определения этих критериев целесообразно использовать метод тепловой волны (Уэллс, Винокуров).

В настоящее время расширяется строительство мощных магистральных трубопроводов в районы новых промыслов в Сибири и на Крайнем Севере. Разрабатываются проекты транспорта газа в охлажденном и сжиженном состоянии. В связи с этим важную роль играет оценка сопротивляемости разрушению при низких температурах. Методика такой оценки при испытании элементов трубы (цилиндрических панелей в условиях двухосного напряженного состояния разрабатывалась в работе Реморова (МВТУ им. Н.Э.Баумана).

На основании проделанного литературного обзора в работе были поставлены следующие задачи:

I. Разработать методику определения величины δ_c соответствующей началу движения трещины в основном металле и сварных соединениях.

2. Исследовать процесс разрушения стенки трубы или сосуда от поверхностного трещиноподобного дефекта.

3. Оценить сопротивляемость разрушению трех марок стали и их сварных соединений при нормальной и низкой температурах.

Глава 2. Ввиду сложного характера искажения поверхности у дефекта стенки сосуда методику определения величины δ_c разрабатывали при растяжении плоских образцов из стали Ст.3кп шириной 150 и толщиной I2 мм с центральным надрезом длиной 50 мм. Предварительно, до нанесения надреза, образцы были растянуты на величину 4%. Радиус закругления сквозных надрезов составлял примерно 0,I мм. Поверхностные надрезы глубиной 4 мм выполняли дисковыми фрезами, проходя последний миллиметр по глубине фрезой толщиной 0,2 мм.

При определении величины δ_c использовали визуальные измерения под микроскопом исходной ширины надреза Δ_o, раскрытия надреза после разрушения $\Delta_к$ и раскрытия образовавшейся трещины в устье надреза $\Delta_{тр}$. Эти величины служили для определения пластической составляющей критического раскрытия по следующей формуле:

$$\Delta_{пл} = \Delta_к - \Delta_o - \Delta_{тр} \qquad (I)$$

Для сквозного надреза величины $\Delta_к$ и Δ_o по толщине пластины неизменны. В то же время раскрытие $\Delta_{тр}$ в общем случае переменно и его измеряли по дну надреза на разных уровнях по толщине. Полученные значения подставляли в формулу (I) и строили распределение $\Delta_{пл}$ по толщине образца (рис. Iа).

Результаты испытания при различных температурах показали, что характер распределения пластической составляющей раскрытия сквозного надреза по толщине отражает особенности начала движения трещины. При сразу нестабильном распространении распределение $\Delta_{пл}$ по толщине линейно (-40°С на рис. Iа). Напротив, при устойчивом начале движения трещины распределение $\Delta_{пл}$ по толщине нелинейно и имеет минимум в середине толщины – месте возникновения разрушения и максимум у поверхности образца (+20°С).

Минимальное значение $\Delta_{пл} = \Delta_c$, соответствующее раскрытию надреза в момент начала движения трещины, использовали для определения полного критического раскрытия δ_c по диаграмме нагрузка – перемещение кромок. Для непрерывной записи этой диаграммы на ленту осциллографа датчик перемещений устанавливали у вершины надреза.

Испытания образцов из стали Ст.3кп показали, что величина δ_c сквозного надреза в середине толщины снижается плавно в широком диапазоне температур (рис.1б, кривая I). Напротив, величина раскрытия кромок в момент выхода трещины на поверхность (кривая 2), а также в момент нестабильности (кривая 3) уменьшаются резко в узком интервале температур. С приближением этих величин к величине δ_c период устойчивого подрастания исчезает и при температуре около -10^0С трещина становится нестабильной сразу в момент начала ее движения. По-видимому, в этом проявляется увеличение чувствительности материала к скорости деформации.

При определении критического раскрытия δ_c поверхностного надреза дополнительно учитывали наличие поворота кромок, проводя измерения ширины надреза на двух уровнях по глубине. Экспериментально показано, что в образцах из стали Ст.3кп δ_c поверхностного надреза, в отличие от δ_c сквозного надреза, в диапазоне температур от +20 до -50^0С не уменьшается (прямая 4 на рис. 1б). Причина этого, вероятно, заключается в разной стесненности протекания пластических деформаций.

Измерение величины $\Delta_{тр}$ по всей толщине образца на шлифе поперечного сечения позволяет помимо δ_c построить распределение пластических удлинений перемычки под поверхностным надрезом по толщине $\Delta(t)$ (рис. 1в). Это распределение отражает характер роста трещины в направлении толщины. Устойчивый рост сопровождается увеличением удлинений впереди трещины ($+20^0$С), а при сразу нестабильном распространении распределение удлинений на момент нестабильности фиксируется (-50^0С).

Для поверхностного надреза, также как и для сквозного, характерно плавное изменение величины δ_c в том узком интервале температур, где устойчивое начало движения трещины в направлении толщины сменяется нестабильным. Температура, при которой исчезает стадия устойчивого роста, для сквозного и поверхностного надреза примерно совпадает.

Для оценки влияния термодеформационного цикла сварки на сопротивляемость разрушению разработан образец с поверхностным надрезом, на обратной надрезу поверхности которого наплавляли валики, либо производили переплав неплавящимся электродом в среде аргона. Продольный валик наносили вдоль надреза, поперечный – поперек в середине надреза. Принятая схема изготовления позволяет располагать вершину надреза в зоне с определенным термодеформационным циклом. В то же время поверхностный надрез наиболее близко соответствует реальному типу дефекта в стенке сосуда. Располагая его кончик на различных расстояниях от сварного шва, можно выявить зону, где неблагоприятное воздействие сварки максимально и оценить степень снижения сопротивляемости разрушению стенки сварной трубы или сосуда при наличии поверхностного дефекта. Для этого используются величины δ_c и распределение пластических удлинений перемычки по толщине.

Экспериментально показано, что для стали Ст.3кп, предварительно сдеформированной на 4%, характерно значительное уменьшение под воздействием сварки величины δ_c, а также наличие слоя металла у кончика надреза толщиной равной в данном случае 1,5 мм, где пластические удлинения перемычки практически отсутствуют. В результате такого неблагоприятного воздействия сварки, разрушение образцов при $-50^{\circ}C$ происходило при напряжениях порядка $0,3\,\sigma_T$.

Глава 3. При исследовании сопротивляемости разрушению применительно к условиям работы стенки трубы или сосуда испытанию подвергали элементы трубы в виде цилиндрических панелей, нагружая их в установке двухосного растяжения УДР-12 конструкции МВТУ им. Баумана методом гидростатического выпучивания через эллиптическое отверстие. Испытывали цилиндрические панели радиусом 150 мм и толщиной стенки 12 мм. Надрезы по центру панели наносили вдоль образующей. Сквозные надрезы длиной 70 мм герметизировали специальным пластырем. Поверхностные надрезы имели длину 100 мм и глубину 4 мм. Наплавку валиков в сварных цилиндрических панелях производили на внутренней поверхности.

При испытании цилиндрических панелей из стали Ст.3кп показано, что методика определения δ_c сквозного надреза, разработанная на плоских образцах, применима и к условиям работы стенки трубы. Дополнительно необходимо учитывать неравномерность рас-

крытия кромок по толщине вследствие их выпучивания под действием внутреннего давления, а также то, что трещина возникает и начинает двигаться от участка дна надреза между серединой толщины и наружной поверхностью. Для поверхностного надреза методика определения δ_c и распределения пластических удлинений перемычки остается без изменений.

Испытание цилиндрических панелей позволило установить основные особенности разрушения стенки от наиболее реального применительно к условиям работы трубы или сосуда поверхностного трещиноподобного дефекта. Показано, что нарушение герметичности стенки из стали Ст.3кп при температурах выше -10÷0°С происходило, как правило, после устойчивого роста трещины в направлении по толщине в результате наступления пластической неустойчивости при раскрытии кромок значительно превышающем δ_c (кривые I на рис. 2). При температурах ниже -10÷0°С нарушение герметичности происходило сразу в момент достижения раскрытия δ_c в результате нестабильного продвижения трещины в направлении толщины (кривые 2). Таким образом температура -10÷0°С является для данной стенки сосуда характерной, ниже которой сопротивляемость нарушению герметичности падает. Это проявляется в резком уменьшении величины пластических удлинений перемычки и в снижении уровня напряжений, способных вызывать нарушение герметичности. Одновременно с этим увеличивается опасность распространения нестабильной трещины вдоль образующей после нарушения герметичности.

При наличии сварных соединений падение сопротивляемости нарушению герметичности стали Ст.3кп с понижением температуры ниже -10÷0°С может проявляться еще заметнее. Уменьшение δ_c под воздействием термодеформационного цикла сварки способствует существенному снижению напряжений, вызывающих нарушение герметичности (кривые 4 на рис. 2) и может привести к разрушению при катастрофически низком уровне напряжений. Напротив, при температурах выше -10÷0°С такое снижение не происходит, если трещина в процессе своего устойчивого роста от исходного дефекта в направлении по толщине встречает "неиспорченный" металл и нарушению герметичности предшествует дополнительное раскрытие кромок (кривые 3 на рис. 2).

В процессе разрушения стенки сосуда от поверхностного де-

фекта образуется сквозная трещина. Окажется ли эта трещина стабильной или нестабильной можно определить с позиции критерия K_c. При этом, если сквозная трещина образуется в результате нестабильности поверхностного дефекта, то коэффициент K надо сопоставлять с критической величиной K_{cg}, соответствующей движущейся трещине. В работе проведено сопоставление значений K_c в момент начала движения трещины от кончика сквозного надреза и K_{cg} бегущей трещины. Значения K_c определяли через раскрытие δ_c и через критическое напряжение σ_{ic} по известным формулам:

$$K_c = \sqrt{E \sigma_T \delta_c} \quad (2); \qquad K_c = \sigma_{ic} M \sqrt{\pi \ell \varphi} \quad (3)$$

Значения K_{cg} определяли методом тепловой волны, для усовершенствования которого найдена поправка на инерционность регистрирующего прибора при помощи моделирования на АВМ. Установлено, что с уменьшением расстояния между трещиной и спаем термопары эта поправка возрастает.

Проведенное сравнение показало, что для стали Ст.3кп коэффициент K_c на момент начала движения трещины от сквозного надреза в средней части толщины и K_{cg} бегущей трещины в диапазоне температур $-60 \div +20^0$С – величины одного порядка.

Глава 4. В четвертой главе на примере сопоставления сталей Ст.3кп и 09Г2С и частично стали типа 08Г2БФ рассматриваются возможности и особенности сравнительной количественной оценки сопротивляемости сосудов и трубопроводов разрушению.

Проведенные испытания показали, что для стали 09Г2С и 08Г2БФ характерны такие же закономерности развития пластических деформаций и разрушения от сквозного и поверхностного надрезов, как и для стали Ст.3кп. Это подтверждает их общий характер.

Сравнение результатов испытаний стали Ст.3кп и 09Г2С позволило по изменению сопротивляемости разрушению выделить три характерные температурные области. Область I соответствует температурам выше $-10 \div 0^0$С и отличается как для стали 09Г2С, так и стали Ст.3кп устойчивым началом движения трещины. Величины δ_c для обоих материалов здесь примерно одинаковы. Однако уровень напряжений, при котором в сходных условиях достигается раскрытие δ_c для стали 09Г2С, значительно выше. Нарушение герметичности в области I происходит обычно в результате наступления пластической неустойчивости. При этом сопротивляемость нестабильности сквозной трещины и распространению бегущей трещины

оцениваемая критериями K_c и K_{cg}, для стали 09Г2С выше.

При температурах ниже -10÷0°С для стали Ст.3кп характерно отсутствие стадии устойчивого роста трещины и значительное снижение сопротивляемости разрушению. Это проявляется в уменьшении величины пластических удлинений перемычки и уровня напряжений, вызывающих нарушение герметичности, уменьшении δ_c сквозного надреза и величин K_{cg}. Напротив, сопротивляемость разрушению стали 09Г2С изменяется незначительно по сравнению с областью I вплоть до температуры -50÷-45°С. Таким образом проведенное сопоставление позволило установить, что именно в интервале температур от -50÷-45°С до -10÷0°С (область 2) преимущества стали 09Г2С по сравнению со сталью Ст.3кп (с данными конкретными свойствами) проявляются наиболее сильно. Температуру -10÷0°С для данной стали Ст.3кп следует считать предельной, ниже которой эксплуатация сосудов и трубопроводов из этого материала становится нецелесообразной. Для стали 09Г2С такой температурой, ниже которой (в области 3) исчезает стадия устойчивого роста и снижается сопротивляемость разрушению является -50÷-45°С.

Сопоставление результатов испытания сварных образцов показало, что и для стали Ст.3кп и для стали 09Г2С характерно уменьшение величин δ_c в результате действия термодеформационного цикла сварки. Для стали Ст.3кп это уменьшение выражено сильнее. Для этой же стали в отличие от 09Г2С воздействие сварки вызывает значительное уменьшение удлинений перемычки при устойчивом росте трещины в слое металла у надреза толщиной равной для данного случая 1,5 мм. Наличие такого слоя представляет опасность, т.к. трещина может разогнаться в нем и выйти в "неиспорченный" металл с большой скоростью.

Проведенное сопоставление показало, что в области температур 2 влияние сварки в еще большей степени увеличивает разницу по сопротивляемости разрушению между сталями 09Г2С и Ст3кп. Это проявляется в том, что уменьшение δ_c под воздействием сварки для стали Ст.3кп может привести к существенному снижению уровня разрушающих напряжений. Так разрушение плоского образца при -50°С произошло при напряжении 0,3 $\sigma_т$. Напротив для стали 09Г2С в области 2 после достижения величины δ_c характерно значительное дополнительное раскрытие надреза в про-

цессе устойчивого роста трещины по толщине и снижение уровня напряжений в момент нарушения герметичности не происходит.

Хотя испытания стали 08Г2БФ имели ограниченный характер, значительное ее отличие от стали 09Г2С и тем более Ст.3кп позволяет отметить следующее. Температура, при которой исчезает стадия устойчивого роста трещины и уменьшается сопротивляемость нарушению герметичности лежит для стали 08Г2БФ заметно ниже -50^{0}С, т.е. ниже, чем для стали 09Г2С. Однако и в области температур от -50^{0}С до $+20^{0}$С сопротивляемость этой стали разрушению значительно выше. Об этом свидетельствуют гораздо более высокие, по сравнению со сталью 09Г2С, пластические удлинения перемычки и уровень приложенных напряжений в момент нарушения герметичности. Сталь 08Г2БФ также как сталь 09Г2С проявляет чувствительность к термодеформационному циклу в концентраторе, о чем свидетельствует уменьшение δ_c сварного образца. Исследование распределения пластических удлинений перемычки под надрезом позволило выявить, что для этой стали характерно также наличие участка в зоне термического влияния на расстоянии примерно I мм от шва с пониженной сопротивляемостью разрушению.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

I. Разработана методика определения величины δ_c сквозной трещины или надреза. Особенность этой методики заключается в том, что по результатам записи перемещений кромок и последующих визуальных измерений под микроскопом устанавливается распределение раскрытия кромок по толщине образца и определяется критическая величина δ_c в момент начала движения трещины в средней части трещины.

2. Распределение раскрытия сквозного надреза по толщине образца в момент начала движения трещины отражает характер разрушения. С понижением температуры величина δ_c в середине толщины для исследованных сталей изменяется плавно, в широком интервале температур. Напротив, величины раскрытия кромок в момент выхода устойчивой трещины на поверхность, а также в момент нестабильности, уменьшаются резко в узком интервале температур. С приближением этих величин к величине δ_c период устойчивого роста исчезает и трещина становится нестабильной сразу в момент ее начала движения. По-видимому именно в этом проявляется

чувствительность материала к скорости деформации.

3. Применительно к разрушению стенки трубы или сосуда под внутренним давлением разработана методика определения величины δ_c поверхностного надреза или трещины в момент начала движения трещины, а также распределения пластических удлинений перемычки, полученных в процессе роста трещины от дна исходного надреза в направлении толщины. Показано, что устойчивый рост трещины в направлении толщины сопровождается увеличением удлинений перемычки впереди трещины. При нестабильном продвижении трещины дополнительная пластическая деформация может не происходить и распределение удлинений фиксируется таким, каким оно было в момент нестабильности.

4. Вследствие разной стесненности протеканию пластических деформаций, критическое раскрытие поверхностной трещины может отличаться как по величине, так и по характеру изменения с температурой от критического раскрытия сквозной трещины. Однако критическая температура ($T_{кр}$), при которой для стали одной толщины исчезает стадия устойчивого подрастания трещины, оказывается примерно одинаковой как в случае сквозного, так и несквозного надрезов.

5. Возможность и степень снижения сопротивления разрушению стенки сосуда или трубы в результате процесса сварки целесообразно оценивать величиной критического раскрытия кромок поверхностного надреза и распределением удлинений перемычки по толщине. Нанесение поверхностного надреза до или после сварки и расположение его вершины на различных расстояниях от сварного шва позволяет выявить наиболее опасную зону сварного соединения.

6. Показано, что для сталей Ст.3кп, 09Г2С и типа 08Г2БФ характерно уменьшение величины критического раскрытия поверхностного надреза под действием термодеформационного цикла сварки при наложении шва вблизи вершины надреза. В сходных условиях это уменьшение для стали Ст.3кп выражено сильнее. Для этой же стали, в отличие от двух других, характерно значительное уменьшение пластических удлинений перемычки при устойчивом росте трещины в слое металла у вершины надреза.

7. При испытании трех марок стали показано , что температура, при которой исчезает стадия устойчивого роста трещины, является для сосудов и труб характерной ($T_{кр}$), ниже которой сопротивляемость нарушению герметичности понижается. При температурах выше $T_{кр}$ нарушение герметичности от поверхностного

трещиноподобного дефекта происходит, как правило, в результате наступления пластической неустойчивости при раскрытии значительно превышающем δ_c. При температурах ниже $T_{кр}$ нарушение герметичности происходит сразу по достижении величины раскрытия δ_c в результате нестабильного продвижения трещины в направлении толщины с последующим развитием ее вдоль образующей. Такое изменение условий разрушения может сопровождаться уменьшением величины напряжений, способных вызывать нарушение герметичности стенки сосуда или трубы.

8. При температурах ниже $T_{кр}$ сопротивляемость нарушению герметичности стенки сосуда или трубопровода определяется величиной критического раскрытия δ_c. Поэтому уменьшение величины δ_c под воздействием термодеформационного цикла сварки может привести к существенному снижению напряжений, вызывающих нарушение герметичности. При температурах выше $T_{кр}$ снижение δ_c в зоне действия термодеформационного цикла сварки менее опасно, так как трещина на пути продвижения от исходного поверхностного дефекта в направлении толщины встречает металл мало чувствительный к скорости деформации и происходит значительное дополнительное раскрытие.

9. Сопоставление результатов испытания цилиндрических панелей толщиной 12 мм показало, что преимущества стали 09Г2С и ее сварных соединений перед сталью Ст.3кп по сопротивляемости разрушению от поверхностного трещиноподобного дефекта наиболее сильно проявляются в диапазоне температур от $-50 \div -45^{\circ}C$ до $-10 \div 0^{\circ}C$, где для стали 09Г2С характерно устойчивое, а для стали Ст.3кп нестабильное начало движения трещины. Температура, при которой исчезает стадия устойчивого роста для стали 08Г2БФ значительно ниже, чем $-50^{\circ}C$. В диапазоне температур $-50 \div +20^{\circ}C$ величины пластических удлинений перемычки и напряжений в момент нарушения герметичности для стали 08Г2БФ по сравнению со сталями 09Г2С и Ст.3кп гораздо выше.

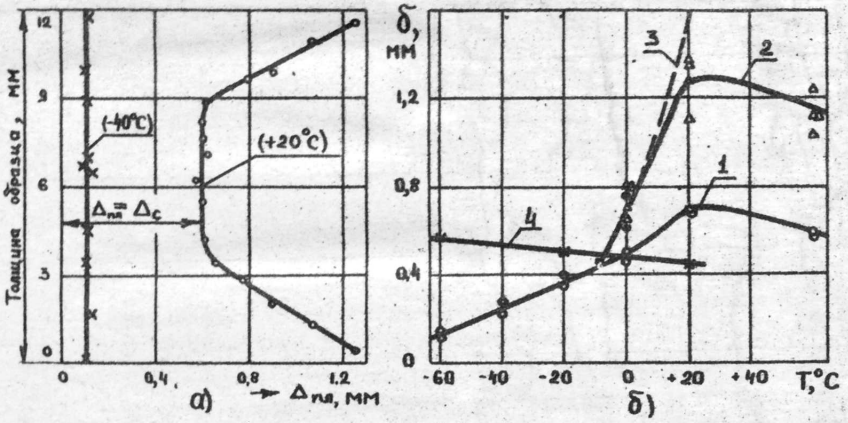
10. Экспериментально показано, что для сталей Ст.3кп и 09Г2С толщиной 12 мм критический коэффициент интенсивности напряжений K_c на момент начала движения трещины от сквозного надреза в средней части толщины и $K_{cд}$ бегущей трещины величины одного порядка.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Куркин С.А., Сильвестров Ю.Г. Определение критического раскрытия трещины."Известия вузов. Машиностроение", 1976, №8, с. 16-20.

2. Куркин С.А., Сильвестров Ю.Г. Оценка сопротивления разрушению стенки трубы или сосуда от сквозного надреза. "Известия вузов. Машиностроение", 1976, № 12, с. 19-24.

3. Суворин В.Я., Николаев А.Ф., Куркин С.А., Фролов В.В., Сильвестров Ю.Г. Оценка свойств сварных соединений стали Ст.3 в присутствии водорода на основе критического раскрытия трещины. Тезисы докладов научно-технического семинара "Повышение стойкости сварных соединений против водородной хрупкости", Воронеж, 1977, (НТО Машпром).



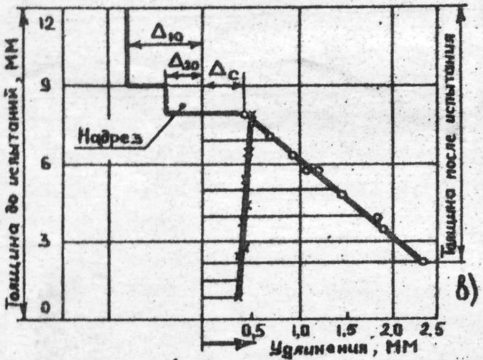


Рис. I. Результаты испытания плоских образцов из стали Ст.3кп: а) распределение $\Delta_{пл}$ в вершине сквозного надреза; б) результаты определения критического раскрытия сквозного надреза; в) распределение удлинений по толщине перемычки под поверхностным надрезом.

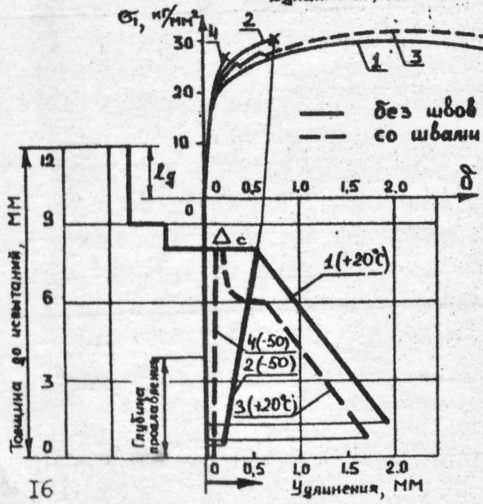


Рис. 2. Результаты испытания цилиндрических панелей из стали Ст.3кп с поверхностным надрезом: σ_i – окружные напряжения; l_g – глубина установки датчика перемещений.