

М442524
МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
СССР

МОСКОВСКОЕ ОРДЕНА ЛЕНИНА, ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ И
ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ВЫСШЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ
УЧИЛИЩЕ ИМ.Н.Э.БАУМАНА

На правах рукописи
УДК 621.791.052:539.4

ТРУВИН ВАЛЕНТИН ВИТАЛЬЕВИЧ

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ СОПРОТИВЛЯЕМОСТИ РАЗВИТИЮ РАЗРУШЕНИЯ
ОТ ПОВЕРХНОСТНЫХ ДЕФЕКТОВ ОСНОВНОГО МЕТАЛЛА И СВАРНЫХ
СОЕДИНЕНИЙ ТРУБ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ

05.03.06 - Технология и машины сварочного производства
01.02.06 - Динамика, прочность машин, приборов и
аппаратуры

Автореферат
диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических
наук

Работа выполнена в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции 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 Лившиц Л.С.
к.т.н. Волотов А.С.

Ведущее предприятие - Харьковский трубный завод.

Защита состоится "24" марта 1986 г. на заседании специализированного Совета К053.15.03 в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени высшем техническом училище имени Н.Э.Баумана по адресу: 107005, г.Москва, 2-я Бауманская, ул., 5.

Ваш отзыв в I-м экземпляре, *
лать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознак
Н.Э.Баумана.

Автореферат разослан "22"

M442.524

Ученый секретарь
специализированного Совета
к.т.н., доцент

Л-97508

Подписано к печати 3.01.86 06

Заказ № 8

Рос-

НТБ МГТУ им. Н.Э.Баумана



1442524

Трубин В.В. Методика оценки

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. В планах развития газовой промышленности до 2000 г. предусмотрено строительство нескольких десятков тысяч километров магистральных газопроводов для транспортировки газа с северных месторождений Тименской области.

Значительная протяженность таких сооружений обуславливает необходимость снижения их металлоемкости за счет применения труб из сталей повышенной прочности. Однако отсутствие в мировой практике опыта эксплуатации труб большого диаметра из сталей с пределом прочности свыше 600 МПа в условиях предполагаемого снижения температуры стенки трубы до $-15...-20^{\circ}\text{C}$ и повышения рабочего давления до 10...12 МПа, трудности обеспечения высокого качества строительно-сварочных работ и вероятность пропуска дефектов после неразрушающего контроля крайне осложняет решение этой проблемы прежде всего из-за увеличения опасности возникновения лавинных протяженных разрушений.

В основном, мероприятия по предотвращению таких аварий направлены либо на повышение трещиностойкости металла, либо на постановку в нитку газопровода труб-гасителей специальной конструкции с определенным шагом. В последнем случае предполагается снизить требования к свойствам материала обычных труб по сопротивляемости развитию разрушения. Выбор сталей как для первого варианта, так и для второго с позиций оценки склонности к образованию протяженных разрушений затрудняется недостаточной изученностью процесса разрушения от поверхностного дефекта. Неясными остаются как условия превращения поверхностного дефекта в сквозной разрыв, так и закономерности дальнейшего движения сквозной трещины. При этом значения параметров ударной вязкости и процента волокна в изломе образца DWTT, используемые на практике при выборе новых материалов, либо для новых условий эксплуатации еще не установлены, а оценка трещиностойкости металла стенки трубы с использованием традиционных приемов механики разрушения может оказаться недостаточной для установления характера разрушения газопровода. Создавшееся положение можно объяснить, прежде всего, отсутствием методики испытания металла стенки сварной трубы, позволяющей непосредственно наблюдать и исследовать процесс превращения поверхностной трещины в сквозную, что предопределило постановку настоящей работы.

Проведение этой работы связано с выполнением целевой работы

М. И. Т. У.
И. И. Е. сына
БИБЛИОТЕКА

лексной научно-технической программы ГКНТ, направленной на разработку методов оценки несущей способности труб, материалов и сварных соединений магистральных газопроводов, сооружаемых в сложных природно-климатических условиях.

Цель работы состоит в обосновании критерия оценки сопротивления основного металла и сварных соединений труб для магистральных газопроводов развитию разрушения от поверхностного дефекта и разработке методики его определения в лабораторных условиях с учетом дальнейшего использования при проведении испытаний полноразмерных труб.

Методы исследования. Закономерности процесса превращения поверхностной трещины в сквозную исследовали на широких плоских образцах с исходным поверхностным острым надрезом при статическом растяжении с непрерывной регистрацией параметров нагружения и раскрытия кромок надреза методами электротензометрии. Используются различные варианты записи получаемой информации на всем протяжении процесса превращения поверхностной трещины в сквозную: на шлейфовый осциллограф с ленточной кассетой, на пленочные осциллографы с ленточной и барабанной кассетами одновременно, а также на магнитную ленту.

Сведения о развитии пластических деформаций по мере продвижения трещины в направлении толщины испытуемого элемента получали путем обработки результатов измерений исходных размеров надреза до нагружения и кромок разрыва после разрушения с помощью микроскопа.

Научная новизна заключается в следующем:

- установлено, что статическую трещиностойкость металла перемычки под поверхностным надрезом можно характеризовать пластической податливостью зоны разрушения, оцениваемой значением раскрытия кромок исходного надреза $\bar{U}$, энергетическими затратами на продвижение трещины в направлении толщины, определяемыми по приращению удлинений волокон перед ее вершиной и ускорением расхождения кромок исходного надреза $d^2\bar{U}/dt^2$, отражающим кинетику процесса превращения поверхностной трещины в сквозную;

- экспериментально показано, что в процессе превращения длинной ($2c > 3Z_0$) поверхностной трещины в сквозную, на этапе когда разрыв перемычки происходит самопроизвольно под действием упругой энергии, кинетика расхождения кромок трещины $\bar{U} = \bar{U}(t)$ наилучшим образом отражает способность металла сопротивляться

развитию разрушения, а параметр $(d^2\sigma/dt^2)_{\max}$ обеспечивает наиболее четкую оценку этой способности и может служить критерием оценки трещиностойкости на этой стадии разрушения как основного металла, так и зоны сварного соединения претерпевшего термомеханический цикл сварки.

Практическая ценность работы заключается:

- в разработке методики и "Методических рекомендаций" по оценке сопротивляемости развитию разрушения металла труб как в исходном состоянии, так и после воздействия термомеханического цикла сварки. Текст "Методических рекомендаций" разослан в ряд организаций и получил положительные отзывы о подтверждении их будущего использования;

- в предложении осуществлять такую оценку сопротивляемости магистральных трубопроводов протяженным разрушениям в три этапа: при растяжении плоских образцов с поверхностным надрезом в лабораторных условиях, при испытаниях полноразмерных труб внутренним давлением на стенде и нагружением дуги из полноразмерных сварных труб сжатием газом в условиях полигона.

Апробация работы. Основные положения работы докладывались на научном семинаре кафедры "Машины и автоматизация сварочных процессов" МВТУ им. Н.Э.Баумана, на II Всесоюзной научно-технической конференции "Совершенствование эксплуатации и ремонта корпусов судов" в г.Калининграде, а также перед специалистами отдела прочности в институте сварки (ВУЗ) в г.Братиславе (ЧССР).

Структура и объем работы. Диссертация изложена на 180-страницах машинописного текста, содержит 76 рисунка, 7 таблиц и 108 наименований литературных источников. Состоит из введения, трех глав и приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

I. Состояние вопроса. Источником разрушения магистральных газопроводов зачастую служат несквозные дефекты сварных соединений или повреждения основного металла. Разрыв стенки трубы от такого дефекта наступает внезапно, приводя к динамическому нагружению металла в вершине образовавшейся сквозной трещины. Кинетика дальнейшего роста трещины в значительной степени определяется способностью металла сопротивляться разрушению в условиях высокоскоростного нагружения.

Исследования процессов разрушения при динамическом нагружении требуют преодоления методических трудностей воспроизведе-

ния реальных скоростей и условий нагружения в вершине трещины. Результаты таких исследований нередко противоречивы, что затрудняет их обобщение.

Исследованием процесса разрушения магистральных газопроводов занимались различные исследователи как в нашей стране (Анучкин М.П., Винокуров В.А., Лившиц Л.С., Куркин С.А., Моношков А.Н. и др.), так и за рубежом (Г.Хан, М.Каннинен, А.Даффи, Р.Эйбер, У.Макси, Р.Шеннон, А.Вито и др.). В их работах было показано, что протяженность разрыва газопровода определяется значением максимальной скорости движения сквозной трещины, достигнутой на участке разгона. Однако в этих исследованиях закономерности распространения сквозной трещины в газопроводе изучены без учета начальной стадии процесса, т.е. возникновения несквозной трещины от исходного дефекта и превращения ее в сквозную. Это означает, что начальная стадия ускорения движения трещины, протекающая до нарушения герметичности стенки трубы, остается вне рассмотрения.

Процесс превращения длинной поверхностной трещины в сквозную состоит из двух стадий. Первая из них протекает стабильно, требуя возрастания нагрузки либо повторности нагружения. Вторая, напротив, развивается самопроизвольно при постоянной или снижающейся нагрузке.

Как показано в работах Сильвестрова Ю.Г., Кузгинова В.И. и других сопротивление материала 1-ой стадии можно оценить путем определения критических значений K_{Ic} , K_c или δ_c подобно тому как для сквозной трещины. Напротив, на 2-ой стадии, когда трещина в направлении толщины развивается самопроизвольно методика оценки сопротивления материала развитию разрушения еще не разработана. В определенной степени это объясняется тем, что при испытаниях по определению критериев K_{Ic} , K_c и δ_c , зависимость усилия от раскрытия кромки обычно записывают непосредственно на двухкоординатный самописец. Отсутствие учета фактора времени исключает информацию о кинетике развития разрушения на 2-ой стадии.

В связи с этим представляется перспективной работа Володина В.В., в которой предложена идея непрерывного фиксирования измеряемых параметров в процессе превращения поверхностной трещины в сквозную во времени. Методические трудности, связанные с получением непрерывной, поддающейся обработке записи изменения параметров на обеих стадиях, значительно отличающихся по длитель-

ности, позволили автору поставить эксперименты только при импульсном нагружении элементов оболочек внутренним давлением. Было показано, что резкое ускорение движения трещины в направлении толщины происходит либо в результате наступления неустойчивости трещины, либо потери пластической устойчивости перемычки с последующим ускоренным движением образовавшейся сквозной трещины, в особенности, если ее кромки находятся под воздействием внутреннего давления газа.

Дальнейшее исследование процесса превращения поверхностной трещины в сквозную и, прежде всего, самопроизвольной стадии этого процесса, протекающей под действием упругой энергии, накопленной в системе нагружения, должно иметь целью создание методики оценки сопротивляемости металла развитию разрушения.

На основании вышеизложенного в работе были поставлены следующие задачи:

1. Разработать методику исследования кинетики процесса роста трещины от поверхностного дефекта в основном металле и в стыковом сварном соединении применительно к условиям работы стенки трубы, работающей под внутренним давлением.

2. Исследовать кинетику процесса разрушения перемычки под поверхностным дефектом в зависимости от термдеформационного цикла сварки, низкой температуры, запасенной упругой энергии в системе нагружения для ряда сталей, применяемых в производстве сварных оболочковых конструкций.

3. Обосновать выбор критерия сопротивляемости металла развитию разрушения и методику его определения.

4. Разработать методические рекомендации по оценке сопротивляемости развитию разрушения основного металла и сварных соединений труб для магистральных газопроводов.

В главе 2 изложены вопросы, связанные с установлением требований к средствам измерения и записи, отработкой схем непрерывной записи параметров разрушения в процессе роста трещины в направлении толщины при статическом нагружении, процедуры обработки и формы представления результатов испытания.

Основу методики исследования составляет наблюдение за процессом превращения поверхностной трещины в сквозную посредством непрерывной записи раскрытия кромок исходного надреза U и уюилия P . Постановку и практическое проведение испытаний отрабатывали на плоских образцах (рис.1) из стали СтЗпс шириной 150 мм толщиной 8 мм, с центральным надрезом при нагружении растягива-

ким усилием на разрывных машинах различной конструкции.

Анализ записи параметров разрушения во времени для рассматриваемого процесса показывает, что длительность протекания самопроизвольной стадии может быть значительно меньше, чем предыдущая — стабильная. Такая особенность исследуемого процесса предъявляет к аппаратуре для записи параметров P и V определенные требования по быстродействию.

Для установления верхней границы частотного диапазона канала датчика раскрытия было рассмотрено решение задачи о распространении продольных колебаний в однородном стержне с одним свободным и другим жестко заземленным концом. Такая расчетная схема близко соответствует поведению образца при хрупком разрушении сечения с надрезом. В итоге решения этой задачи установлено, что период свободных колебаний незакрепленного конца стержня зависит от длины образца L и при $L = 300$ мм составляет 8300 Гц. При этом порядок предельной скорости расхождения половин образца, определяемый величиной приложенного напряжения в момент разрыва, например, при $\sigma = 250$ МПа и длине рабочей части образца 300 мм составляет 12,5 м/с.

Экспериментально определенная верхняя граница рабочего диапазона скоростей расхождения ножек датчика раскрытия с диаметром упругого элемента 14 мм составляет 3,8 м/с. Выбор этого датчика предопределила простота в обслуживании и то соображение, что реальные скорости расхождения берегов сквозной трещины могут быть значительно меньше расчетной, полученной из предположения абсолютно хрупкого разрыва образца. Кроме того, интерес представляет не абсолютное значение скорости сквозной трещины в случае наступления ее неустойчивости, а кинетика развития разрушения, предшествующая этому состоянию. Эксперименты проводили с использованием следующих приборов: усилители постоянного тока CDV-230A — Япония ($\Delta f_{\text{раб}} = 0-20$ кГц) и Топаз-3 ($\Delta f_{\text{раб}} = 0-10$ кГц), шлейфовый Н115 ($\Delta f_{\text{раб}} = 0-10$ кГц) и электроннолучевой С8-17 ($\Delta f_{\text{раб}} = 0-3,5$ гГц) осциллографы, магнитограф SR-70 — Япония ($\Delta f_{\text{раб}} = 0-20$ кГц) и самописец MC6623 — Япония ($\Delta f_{\text{раб}} = 0-0,2$ кГц).

Переход от стабильного роста трещины к самопроизвольному может наступить как в интервале малых упруго-пластических так и при значительных пластических деформациях перемычки. Внезапность наступления такого перехода создает определенные трудности в организации записи параметров испытания, пригодной для расшифровки

на всем протяжении процесса превращения поверхностной трещины в сквозную. В настоящем исследовании отработаны следующие варианты записи. Это одновременная запись на два шлейфовых осциллографа с ленточной и барабанной кассетами, работающих с различной скоростью развертки, запись на шлейфовый осциллограф с ленточной кассетой с запуском развертки на большой скорости при одновременной подаче давления в силовой цилиндр нагружающего устройства, а также запись на магнитную ленту без применения каких-либо синхронизирующих устройств. Опыт проведения испытаний показал, что последний вариант является универсальным и наиболее простым в обслуживании способным регистрировать процесс деформирования и разрушения образца с исходным надрезом при статическом нагружении и повышенных скоростях перемещения захвата нагружающего устройства.

Процедура проведения испытаний предусматривает подготовку средств записи, установку датчиков перемещения между кромками исходного надреза и нагружение образца однократным приложением растягивающего усилия до разрушения перемычки. Особенность подготовки образца состоит в размещении двух датчиков раскрытия $\bar{U}_1$ и $\bar{U}_2$ на разных уровнях по глубине надреза. Это позволяет определять взаимное положение кромок надреза в процессе нагружения не только по смещению, но и по углу поворота.

Полученную непрерывную запись параметров испытания обрабатывали путем построения зависимостей ζ , $d\bar{U}/dt$, $d^2\bar{U}/dt^2$, в функции раскрытия кромок $\bar{U}$. На шлифе центрального сечения поперек надреза проводили под микроскопом измерение расстояний между кромками надреза и берегами трещины по глубине с определенным шагом. Обработка этих данных с учетом исходной ширины надреза позволяет построить зависимость распределения пластических удлинений волокон $\delta_{пл}$, сопровождающих продвижение трещины в направлении толщины $\bar{z}$. Перенос характерных точек с диаграммы $\zeta-\bar{U}$ на зависимость $\delta_{пл}(\bar{z})$ осуществляли путем учета взаимного положения кромок исходного надреза по данным записи показаний датчиков раскрытия $\bar{U}_1$ и $\bar{U}_2$.

Совместное представление результатов испытаний в такой форме позволяет наиболее наглядно представить кинетику процесса и изменение факторов ее определяющих. На диаграмме $\zeta-\bar{U}$ можно выделить участок стабильного роста трещины с восходящей ветвью до точки ($\zeta = \zeta_{max}$) и участок самопроизвольного роста трещины с ниспадающей ветвью за этой точкой. Кроме того на диаграммах $\zeta-\bar{U}$

и δ_{II-2} намечены характерные сопряженные точки: страгивания трещины, максимума нагрузки и превращения трещины в сквозную. Для анализа протекания процесса превращения поверхностной трещины в сквозную был намечен ряд параметров, численно отражающих поведение металла в процессе разрушения. Это расхождение берегов исходного надреза δ , отражающее пластическую податливость зоны разрушения, приращение удлинения волокон перед вершиной трещины по мере ее продвижения в направлении толщины $d\delta_{II}/d\lambda$, показывающее энергетические затраты на это продвижение, а также ускорение расхождения берегов трещины $d^2\delta/dt^2$, характеризующее кинетику процесса. Сопоставление значений этих параметров, соответствующих характерным моментам процесса превращения поверхностной трещины в сквозную, позволяет вскрыть связи между кинетикой роста трещины и энергетическими затратами на ее продвижение.

Испытания образцов с различной длиной исходного надреза показали, что значения параметров на стадии самопроизвольного дорыва перемычки существенно зависят от соотношения размеров образца и надреза, а также способа нагружения и податливости нагружающего устройства, в совокупности определяющих запас упругой энергии в системе нагружения. Ограниченность запаса упругой энергии в системе нагружения может приводить к спаду нагрузки, снижающему нарастание скорости несквозной трещины на участке за точкой $G=G_{max}$. Такое развитие процесса разрушения при росте трещины в направлении толщины имеет сходство с процессом потери пластической устойчивости при осевом растяжении гладкого образца в связи с образованием шейки.

Ранее аспирантом Володиным В.В. были проведены эксперименты на элементах оболочек с исходным несквозным надрезом при нагружении внутренним давлением жидкости или газа. Результаты этих испытаний показали, что воздействие большого запаса упругой энергии сжатого газа проявляется в поддержании постоянного давления на стадии самопроизвольного разрушения, что приводит к интенсивному нарастанию скорости раскрытия кромок после наступления пластической неустойчивости. Полученные результаты натурных испытаний, с участием автора, плетей длиной около 250 м из труб $\varnothing$ 1420 мм при давлении 10,0 МПа при нагружении внутренним давлением воздуха до разрушения показывают, что после разгерметизации на расстоянии нескольких метров от места образования разрыва в вершине распространяющейся сквозной трещины поддерживается практически

постоянное исходное давление. Тем более на стадии самопроизвольного роста сквозной трещины наличие огромного запаса энергии нагружающей ореды на несколько порядков превышающей энергию деформации в стенке трубы, может привести к быстрому возрастанию скорости движения трещины на стадии пластической неустойчивости вплоть до наступления неустойчивости трещины.

Воссоздать, в лабораторных условиях, запас упругой энергии, способный исключить спад нагрузки после достижения точки максимума усилия достаточно сложно. В то же время результаты испытаний плоских образцов растягивающим усилием показывают, что дорыв перемычки происходит самопроизвольно под действием энергии, накопленной в системе нагружения. При этом условия роста трещины близко соответствуют реальным условиям роста трещины в стенке трубы. Отсюда следует, что при испытании геометрически однотипных образцов в сопоставимых условиях приложения растягивающего усилия значения параметров на этой стадии будут отражать способность металла сопротивляться развитию разрушения под действием накопленной энергии.

Исходя из вышеизложенного были рассмотрены результаты испытаний плоских образцов из стали СтЗпс при различной температуре, скорости перемещения захвата нагружающего устройства и запасу упругой энергии в системе нагружения. Анализ экспериментальных данных показал, что превращение длинной поверхностной трещины в сквозную может происходить либо в результате наступления пластической неустойчивости перемычки, когда продвижение трещины в направлении толщины сопровождается заметной пластической деформацией, а скорость раскрытия кромок исходного поверхностного дефекта нарастает плавно, либо в результате внезапного падения способности металла сопротивляться развитию разрушения, когда продвижение трещины происходит внезапно скачком за счет упругой энергии образца без заметной дополнительной пластической деформации. При этом, если в первом случае процесс выхода трещины на противоположную поверхность протекает с отрицательным ускорением движения, а образующаяся сквозная трещина не выходит за пределы исходного дефекта, то во втором, значительное ускорение расхождения берегов трещины, достигнутое за короткий промежуток времени, способствует полному разрыву сечения образца, не требуя дополнительной работы нагружающего устройства, свидетельствуя о склонности металла к образованию протяженного разрушения.

В работе была рассмотрена возможность использования плоских образцов для оценки сопротивляемости сварного соединения труб разрушению от поверхностного трещиноподобного дефекта.

Сварные швы в газопроводных трубах большого диаметра, как правило, выполняются двухсторонними. В этом случае значительную опасность представляют трещины, расположенные в первом шве или в непосредственной близости от него в основном металле, которые при наложении второго подвергаются термдеформационному воздействию. В результате может произойти снижение трещиностойкости в локальных участках у вершины дефекта, существовавшего до сварки и претерпевшего воздействие его термдеформационного цикла.

Учитывая вышеизложенное, при изготовлении образцов такого сварного соединения должны имитироваться термдеформационные процессы, которые могут протекать в зоне дефекта типа непровара, например, при укладке второго шва. Для этого на плоский образец со стороны обратной надрезу, вдоль его укладывали шов. В этом случае интенсивность протекания термдеформационных процессов в значительной степени определяется режимом сварки и расстоянием между вершиной дефекта и швом. В качестве примерных вариантов образцов можно использовать сварные соединения, показанные на рис. 2. При этом исходный дефект должен выполняться после укладки первого шва. Укладка сварного валика на образец из основного металла с исходным сквозным надрезом позволяет оценить реакцию металла перемычки под поверхностным дефектом на сварку. Для этого на образцах из стали СтЗпс выполняли сварные швы аргонодуговой сваркой без присадки. Режим сварки изменяли в следующих пределах: $I = 240-275$ А, $U = 12-14$ В, $v_{св} = 9-9,4$ м/ч. Результаты испытания этих образцов при $+20^{\circ}$ С и статическом нагружении показали, что наступление неустойчивости трещины в зоне сварного соединения происходит только при совпадении действия всех неблагоприятных факторов.

Исследование, выполненное на образцах из стали СтЗпс, показало, что в процессе превращения поверхностной трещины в сквозную когда разрыв перемычки происходит под действием накопленной упругой энергии кинетика расхождения кромок исходного надреза отражает способность материала сопротивляться развитию разрушения, а разработанная методика может быть использована для оценки реакции металла на понижение температуры и термдеформационный цикл сварки.

В главе 3 на примере сопоставления результатов испытаний трех марок сталей: X-65 (регулируемая прокатка), И6Г2АФ (нормализация) и СтЗпс (горячекатанная) обосновывается выбор критерия для сравнительной количественной оценки сопротивляемости материала образованию протяженного разрушения. Кроме того, рассмотрены возможности использования разработанных приемов записи и средств измерения, порядка и формы представления результатов испытания при проведении экспериментов на полноразмерных трубах.

Первоначально в качестве критерия сопротивляемости развитию разрушения предполагалось использовать один из трех параметров $\dot{U}$, $d\delta_{нл}/d\tau$ и d^2U/dt^2 . При этом из перечисленных параметров надо было не только выделить главный, но и обосновать для какого момента процесса разрушения численное значение этого параметра следует принять в качестве критерия сравнительной количественной оценки. В соответствии с этим были выделены моменты срагивания трещины - С, максимума усилия - М, достижения максимума ускорения кромок - Х и прорастания трещины сквозь толщину образца - Р. Обоснование выбора критерия требует сопоставления результатов испытания образцов из различных металлов. Для этой цели были проведены испытания плоских образцов из указанных сталей при температурах, обеспечивающих условия наступления характерных схем процесса превращения несквозной трещины в сквозную: $+20^{\circ}\text{C}$ и -55°C . Размеры образцов: $B=150\text{ мм}$, $z_0=11\text{ мм}$, $2c=50\text{ мм}$, $z_H=3,5\text{ мм}$.

Результаты испытаний показали, что при $+20^{\circ}\text{C}$ превращение поверхностной трещины в сквозную для всех трех сталей происходит на стадии самопроизвольного роста трещины в результате наступления пластической неустойчивости перемычки. Для сопоставления значений $\dot{U}$, $d\delta_{нл}/d\tau$ и d^2U/dt^2 на разных стадиях роста трещин полученные данные сведены в таблицу. Можно видеть, что значения раскрытия кромок $\dot{U}$ для всех характерных моментов процесса разрушения у стали И6Г2АФ оказались меньше, чем у сталей X-65 и СтЗпс. Приращение удлинений $d\delta_{нл}/d\tau$ по мере продвижения трещины в направлении толщины также для стали И6Г2АФ наименьшие из трех рассматриваемых сталей, тогда как значения ускорения раскрытия кромок d^2U/dt^2 для стали И6Г2АФ оказываются наибольшими. Таким образом как на стадии срагивания и стабильного подостания трещины так и на стадии ее самопроизвольного превращения в сквозную все три параметра $\dot{U}$, $d\delta_{нл}/d\tau$ и d^2U/dt^2 свидетельствуют о том, что сталь И6Г2АФ обладает наименьшей трещиностойкостью. Однако, наиболее четкую сравнительную оценку дает сопоставление

Результаты испытаний образцов

	Марка стали	Температура испытаний °C	Параметр	Стадии роста трещины			
				стабильная		самопроизвольная	
				С	М	Х	Р
ОСНОВНОЙ МЕТАЛЛ	И6Г2АФ	+20	$\bar{V}, \text{ мм}$	0,35	0,53	1,37	2,00
			$d\delta_{\text{нл}}/d\bar{z}$	0,16	0,16	0,14	0,20
			$d^2\bar{V}/d\bar{t}^2, \text{ мм/с}^2$	-	6,0	4200	-300
	Х-65	+20	$\bar{V}, \text{ мм}$	0,54	1,00	3,05	4,45
			$d\delta_{\text{нл}}/d\bar{z}$	0,46	0,46	0,43	0,83
			$d^2\bar{V}/d\bar{t}^2, \text{ мм/с}^2$	-	1,2	10,0	0
	СтЗпс	+20	$\bar{V}, \text{ мм}$	0,45	2,35	3,20	4,10
			$d\delta_{\text{нл}}/d\bar{z}$	0,45	0,33	0,65	0,65
			$d^2\bar{V}/d\bar{t}^2, \text{ мм/с}^2$	-	0,8	15	0
	И6Г2АФ	-55	$\bar{V}, \text{ мм}$	0,23	0,38	1,28	2,20
			$d\delta_{\text{нл}}/d\bar{z}$	0,06	0,08	0,15	0,50
			$d^2\bar{V}/d\bar{t}^2, \text{ мм/с}^2$	-	0,8	1500	0
	Х-65	-55	$\bar{V}, \text{ мм}$	0,50	0,78	-	-
			$d\delta_{\text{нл}}/d\bar{z}$	0,38	0,38/0	-	-
			$d^2\bar{V}/d\bar{t}^2, \text{ мм/с}^2$	-	0/∞	-	-
	СтЗпс	-55	$\bar{V}, \text{ мм}$	0,42	0,80	-	-
			$d\delta_{\text{нл}}/d\bar{z}$	0,40	0,40/0	-	-
			$d^2\bar{V}/d\bar{t}^2, \text{ мм/с}^2$	-	0/∞	-	-
СО СВАРНОМ ШВЕ	И6Г2АФ	+20	$\bar{V}, \text{ мм}$	0,17	0,62	1,20	-
			$d\delta_{\text{нл}}/d\bar{z}$	0,23	0,40	1,20	-
			$d^2\bar{V}/d\bar{t}^2, \text{ мм/с}^2$	-	0,3	5/∞	-
	Х-65	+20	$\bar{V}, \text{ мм}$	0,45	2,25	2,93	3,32
			$d\delta_{\text{нл}}/d\bar{z}$	1,14	0,6	0,1/0	-
			$d^2\bar{V}/d\bar{t}^2, \text{ мм/с}^2$	-	0,9	1·10 ⁶	-1,3·10 ⁶

значений $(d^2\bar{V}/d\bar{t}^2)_{\text{max}}$ поскольку у стали И6Г2АФ этот параметр на два порядка превышает соответствующие значения его у сталей Х-65 и СтЗпс, тогда как различие двух других параметров не выходит за пределы одного порядка. Отсюда следует целесообразность использования значений $(d^2\bar{V}/d\bar{t}^2)_{\text{max}}$, в качестве критерия.

Результаты испытания этих же сталей, но при -55°С представлены в таблице. Как видно из этих данных трещиностойкость стали И6Г2АФ при -55°С мало отличается от трещиностойкости при

$+20^{\circ}\text{C}$ как по кинетике, так и по значению параметра $d\delta_{нл}/dz$. Напротив, для сталей X-65 и СтЗпс при -55°C аналогично условиям при $+20^{\circ}\text{C}$ происходит только срагивание трещины от исходного надреза, тогда как стадия стабильного роста трещины резко сокращается и сразу наступает неустойчивость трещины, свидетельствующая о склонности к образованию протяженного разрушения. Это подтверждает и значения параметра $d\delta_{нл}/dz$.

Для оценки реакции основного металла на термомеханический цикл сварки в вершине концентратора, оказавшегося в зоне влияния, использовали также плоские образцы, но со сварным швом со стороны обратной надрезу. Результаты испытаний сталей X-65 и 16Г2АФ при $+20^{\circ}\text{C}$, представленные в таблице, показывают, что эти стали чувствительны к термомеханическому циклу сварки. При этом использование в качестве критерия значений $(d^2\delta/dt^2)_{max}$ вполне обеспечивает количественную оценку трещиностойкости металла в зоне надреза, подвергнутой воздействию сварки.

Таким образом, рассмотренные результаты испытаний плоских образцов из разных сталей при нормальной и низкой температурах и при наличии термомеханического воздействия сварки, наглядно подтверждают целесообразность использования экспериментально определенных значений $(d^2\delta/dt^2)_{max}$ в качестве критерия сопротивляемости металла развитию разрушения. При проведении испытаний плоских образцов наиболее трудоемкими оказываются операции подготовки, измерения и обработки данных замеров раскрытия трещины на шлифе в зоне разрыва. Результаты обработки данных этих измерений в виде зависимостей $\delta_{нл} = \delta_{нл}(z)$ полезны для анализа условий продвижения трещины, однако, сопоставление характеристик разрушения в процессе превращения поверхностной трещины в сквозную по данным осциллограмм и шлифов показывает, что для оценки сопротивляемости развитию разрушения при различных условиях нагружения достаточно определить максимальную величину $(d^2\delta/dt^2)$. Тем самым трудоемкость эксперимента можно значительно снизить. Следует отметить, что условия превращения поверхностной трещины в сквозную при растяжении образца и при нагружении трубы внутренним давлением имеют не только сходство, но и различия, обусловленные большим выпучиванием зоны трубы с несквозным дефектом от воздействия радиальной составляющей внутреннего давления, а также различием в зависимостях $\zeta = \zeta(\delta)$, обусловленных не только воздействием давления, но и его постоянством после достижения

точки σ_{max} . Поэтому результаты лабораторной оценки, полученные на достаточном количестве плоских образцов, при сопоставлении ряда исследуемых материалов по температуре и воздействию сварки целесообразно дополнять результатами испытания полноразмерных труб внутренним давлением до разрушения, для ограниченного числа вариантов, показавших наилучшие результаты при испытаниях плоских образцов. При этом техническая реализация разработанной методики применительно к испытанию труб, по-видимому, не встретит каких-либо затруднений. Завершающим этапом испытаний, проверяющим пригодность выбранного варианта для магистрального газопровода, является нагружение сварной плети полноразмерных труб сжатым газом в условиях полигона.

На основании выполненного исследования разработаны "Методические рекомендации" по оценке сопротивляемости развитию разрушения металла труб для магистральных газопроводов путем испытания плоских образцов с поверхностным надрезом. "МР" содержат описание конструкции и подготовки образцов, условий их нагружения, приемов испытания и записи параметров испытаний, порядка проведения испытаний, обработки их результатов.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Статическое растяжение широкого плоского образца с несквозным надрезом позволяет исследовать закономерности процесса превращения несквозной трещины в сквозную и может быть использовано для оценки сопротивляемости металла развитию разрушения применительно к стенке оболочки, нагруженной внутренним давлением.

2. Разработанная методика исследования процесса превращения поверхностной трещины в сквозную включает:

а) растяжение плоских образцов (из основного металла и со сварным швом) с центральным несквозным надрезом с фиксированием во времени приложенного усилия P и раскрытия кромок исходного надреза δ ;

б) определение распределения пластических удлинений δ_{pl} , сопровождающих продвижение поверхностной трещины в направлении толщины 2 ;

в) графическое представление результатов испытаний, показывающее связи между кинетикой роста трещины и энергетическими затратами на ее продвижение;

г) определение значений параметров V , $d\delta_{pl}/d\delta$ и $d^2V/d\delta^2$,

соответствующих характерным моментам процесса превращения поверхностной трещины в сквозную.

3. Экспериментально показано, что в процессе превращения длинной поверхностной трещины в сквозную, на этапе когда разрыв перемычки происходит самопроизвольно под действием упругой энергии, кинетика расхождения кромок трещины отражает способность металла сопротивляться развитию разрушения. Следовательно параметр, характеризующий кинетику расхождения кромок на этом этапе можно использовать в качестве критерия оценки сопротивления металла развитию разрушения.

4. Анализ результатов испытаний геометрически однотипных плоских образцов из сталей X-65, IG2AF и СтЗпс показал, что из трех параметров: раскрытие кромок δ , интенсивность удлинения волокон при продвижении трещины в направлении толщины $d\delta/dz$ и ускорение раскрытия кромок $(d^2\delta/dt^2)_{max}$ наиболее четкую оценку сопротивляемости развитию разрушения дает сопоставление значений $(d^2\delta/dt^2)_{max}$, достигаемых на стадии самопроизвольного роста поверхностной трещины.

5. Использование критерия $(d^2\delta/dt^2)_{max}$ позволяет с позиции сопротивляемости развитию разрушения оценивать реакцию металла на понижение температуры и на термдеформационный цикл сварки в присутствии трещиноподобного дефекта.

6. Оценку сопротивляемости магистральных газопроводов протяженным разрушениям целесообразно выполнять в три этапа:

- а) при растяжении плоских образцов из основного металла и со сварным швом с поверхностным надрезом в лабораторных условиях;
- б) при испытаниях полноразмерных сварных труб внутренним давлением на стенде;
- в) нагружением плиты из полноразмерных сварных труб сжатым газом, в условиях полигона.

На I-ом этапе использование разработанной методики позволяет сопоставить ряд вариантов листового металла труб, их реакцию на термдеформационный цикл сварки, на понижение температуры и на влияние ряда других факторов. На 2-ом этапе использование разработанных приемов записи кинетики превращения поверхностной трещины в сквозную обеспечит сопоставление результатов испытаний сварных труб с несквозным надрезом для двух, трех вариантов, показавших наилучшие результаты на I-ом этапе. 3-й этап является контрольным с целью проверки пригодности выбранного варианта в усло-

виях, близких к условиям работы магистрального трубопровода.

7. На основании выполненного исследования разработаны "Методические рекомендации" по оценке сопротивляемости развитию разрушения металла труб для магистральных газопроводов путем растяжения плоских образцов с поверхностным надрезом. Текст "МР" разослан в ряд организаций и получил положительные отзывы.

Основное содержание диссертации отражено в работах:

1. Исследование нестабильного роста трещины в процессе ее превращения из поверхностной в сквозную /С.А.Куркин, В.В.Трубин.- Совершенствование эксплуатации и ремонта корпусов судов: Тез. докл. II научно-технической конференции.-Калининград: КТИ, 1981, с.183-185.

2. Оценка чувствительности материала к дефекту /С.А.Куркин, В.В.Трубин. - В об.: Надежность и долговечность машин и сооружений. - Киев: Наукова думка, 1983, вып.3, с.47-53.

3. Измерение скорости движения трещины после ее превращения из поверхностной в сквозную /С.А.Куркин, В.М.Ховов, В.В.Володин, В.В.Трубин. - Труды/МВТУ, 1981, № 337, с.50-57.

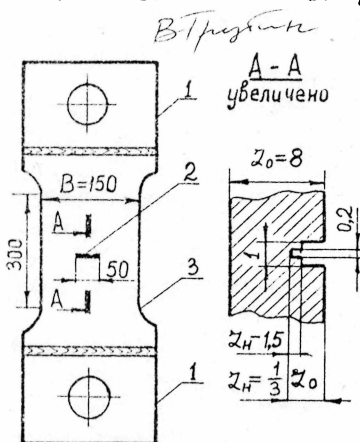


Рис.1. Плоский образец:
1 - захваты, 2 - несквозной надрез, 3 - рабочая часть образца

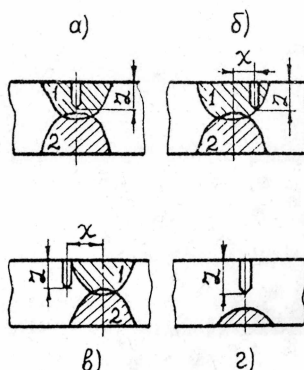


Рис.2. Некоторые варианты выполнения образцов сварных соединений с несквозным надрезом