

М 334290

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
С С С Р



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

На правах рукописи

ПОПОВ Владимир Александрович

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ СТОЙКОСТИ ПРОТИВ ЗАМЕДЛЕННОГО
ВОДОРОДНОГО РАЗРУШЕНИЯ ТРУБОПРОВОДНЫХ СТАЛЕЙ
И ИХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

(05.02.II - Методы контроля материалов, деталей,
узлов, изделий и сварных соединений)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
С С С Р

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

На правах рукописи

ПОПОВ Владимир Александрович

М 337290 ф
МЕТОДИКА ОЦЕНКИ СТОЙКОСТИ ПРОТИВ ЗАМЕДЛЕННОГО
ВОДОРОДНОГО РАЗРУШЕНИЯ ТРУБОПРОВОДНЫХ СТАЛЕЙ
И ИХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

(05.02.11 - Методы контроля материалов, деталей,
узлов, изделий и сварных соединений)



Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в Оренбургском отделе Всесоюзного научно-исследовательского института по строительству магистральных трубопроводов.

Научные руководители - профессор, д.т.н. О.И. СТЕКЛОВ
- к.т.н. Б.В. ПЕРУНОВ

Официальные оппоненты - профессор, д.т.н. Л.С. ЛИВШИЦ
- доцент, к.т.н. В.Г. ФЕДОРОВ

Ведущее предприятие - производственное объединение
"Оренбургнефть"

Защита диссертации состоится " " _____ 1979 года
на заседании специализированного Совета К053.15.01 по
автоматизации в машиностроении Московского ордена Ленина
и ордена Трудового Красного Знамени высшего технического
училища имени Н.Э. Баумана по адресу:

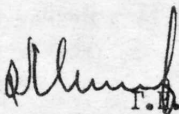
107005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5

Ваши отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные
печатью, просьба выслать по указанному адресу.

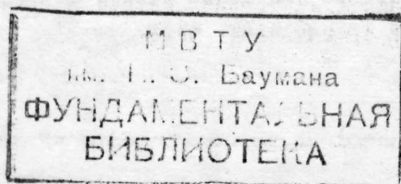
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
МВТУ имени Н.Э. Баумана.

Автореферат разослан " " _____ 1979 года.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО СОВЕТА
кандидат технических наук


Г.А. МЕЛЬНИКОВ

Л27556 Подп. к печ. 12 марта 1979г. Объем I п.л.
Тип. 100 экз. Тип. МВТУ им. Баумана. Заказ 415



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

В связи с интенсификацией разработки месторождений, нефть и газ которых содержат примесь сероводорода, одной из первоочередных задач стала проблема повышения надежности сварных трубопроводов и аппаратов.

Актуальность проблемы. Повышение надежности сварных конструкций в наводороживающих средах может быть достигнуто за счет оптимизации защитных мероприятий (в частности – выбора марки стали, толщины стенки, сварочных материалов и режимов послесварочной термообработки, марки ингибитора и режима ингибирования). Возникает необходимость более глубокого изучения процессов замедленного водородного разрушения и получения количественных характеристик стойкости против ЗВР различных трубопроводных сталей и их сварных соединений, тем самым разделяя их по чувствительности к воздействию водорода. Целесообразно также проводить разработки по исследованию наводороживающей способности природных сред. Возможность контроля агрессивности сред позволит активно вмешиваться в процесс защиты сварных конструкций в период их эксплуатации.

Научной задачей работы является обоснование метода испытаний (материалов трубопроводов и их сварных соединений), позволяющего дифференцированно подойти к оценке стойкости материалов и их соединений в наводороживающих средах, т.е. выявить влияние на параметры разрушения водорода, исключая поверхностное влияние агрессивной среды, что позволит в лабораторных условиях количественно моделировать воздействие природных наводороживающих сред. Разрабатываемый метод испытаний, основанный на введении контролируемых количеств водорода в зону разрушения диффузионным путем, базируется на следующих установленных в работе закономерностях:

- диффузионно-подвижный водород распространяется в металле на значительную глубину, распределение по толщине концентраций его для низкоуглеродистых сталей описывается экспонентой;
- характер распределения диффузионно-подвижного водорода по толщине металла при наводороживании не меняется.

Методы исследования, применяемые в данной работе, включали в себя испытания на замедленное разрушение, послойное определение концентраций водорода в металле – сбор диффузионно-подвижного водорода под слоем запирающей жидкости и плавление образцов

в потоке газа-носителя для оценки распределения остаточного водорода, электрохимические исследования, металлографический анализ. При анализе экспериментальных данных применялись методы математического моделирования. Выбор наводороживающей среды производился с применением методов планирования оптимального эксперимента. Обработка результатов экспериментов проводилась с использованием методов математической статистики.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- разработан метод испытаний, основанный на введении контролируемых количеств водорода в зону разрушения диффузионным путем, который позволяет исследовать поведение в зоне разрушения (перед концентратором напряжений) диффузионно-подвижного и остаточного водорода;

- с помощью разработанного метода установлено, что растягивающие напряжения, как равномерные, так и неравномерные (в надрезанных образцах), не оказывают влияния на характер макрораспределения диффузионно-подвижного водорода в направлении действия одноосных растягивающих напряжений, а остаточный водород в основном накапливается в зоне разрушения (перед концентратором напряжений) и скорость накопления его оказывает влияние на стойкость против замедленного водородного разрушения.

Практическая ценность работы заключается в следующем:

- разработана методика оценки стойкости против замедленного водородного разрушения материалов трубопроводов и их сварных соединений, позволяющая дифференцированно подойти к оценке стойкости материалов и их сварных соединений в наводороживающих средах, т.е. выявить влияние на параметры разрушения водорода, исключая поверхностное влияние агрессивной среды;

- с помощью разработанной методики можно оценить стойкость против замедленного водородного разрушения сталей и их сварных соединений при различных уровнях растворенного в металле диффузионно-подвижного водорода и различных напряжениях в зоне разрушения. Показано, что в зависимости от марки стали термический цикл сварки может способствовать ускорению перехода диффузионно-подвижного водорода в остаточное состояние (у стали I7Г2СФ) и тем самым увеличивать чувствительность стали к воздействию водорода или не влиять на скорость этого перехода (у стали 20). В первом случае восстановление сопротивляемости ЗВР сварного соединения может быть достигнуто высоким отпуском, который почти на порядок снижает восприимчивость к воздействию водорода; во

втором - термообработка повышает время до разрушения только на 30%;

- создан датчик концентрации диффузионно-подвижного водорода, позволяющий установить количество водорода в стенке трубопровода при его наводороживании из транспортируемой среды; с помощью датчика исследована наводороживающая способность природных сред Оренбургского газоконденсатного месторождения и защитная способность в них различных марок ингибиторов;

- разработан нормативный документ Р271-77 Миннефтегазстроя "Руководство по контролю и прогнозированию работоспособности несущих сварных конструкций в средах, содержащих сероводород".

Автор защищает возможность проведения испытаний с помощью разработанного метода испытаний, основанного на введении контролируемых количеств диффузионно-подвижного водорода в зону разрушения, позволяющего в лабораторных условиях моделировать воздействие природных наводороживающих сред, и работоспособность датчика концентрации диффузионно-подвижного водорода, позволяющего оценить наводороживающую способность природных сред.

Апробация работы. Основные положения работы докладывались:

- на Всесоюзном научно-техническом семинаре "Повышение стойкости сварных соединений против водородной хрупкости", г.Воронеж (февраль, 1977 г.);

- на расширенном заседании президиума Комитета ВСНТО по коррозии и защите металлов (май, 1977 г.);

- на конференции молодых ученых "Оренбурггазпрома" (ноябрь, 1977 г.);

- на научном семинаре кафедры "Машины и автоматизация сварочных процессов" МВТУ им.Н.Э.Баумана (январь, 1978 г.);

- на научном семинаре кафедры "Сварочное производство" Липецкого политехнического института (апрель, 1978 г.);

- на заседании секции "Сварка трубопроводов" Ученого Совета Всесоюзного научно-исследовательского института по строительству магистральных трубопроводов (январь, 1979 г.).

Диссертация состоит из введения, четырех глав и общих выводов по работе, изложена на 147 страницах машинописного текста, содержит 8 таблиц, 47 рисунков и библиографию из 99 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе "ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ" рассматриваются основные, отраженные в литературе сведения о влиянии наводороживающих сред на стойкость металла и

сварных соединений. К настоящему времени - по работам Карпенко Г.В., Фролова В.В., Стеклова О.И., Прохорова Н.Н., Лиззица Л.С., Суворина В.Я., Бастьена П., Герцога Е., Трояно А. и др. - сложилось мнение о том, что при наводороживании основной причиной разрушения напряженного металла является водород и накоплено достаточно экспериментальных данных о влиянии водорода на механические свойства сталей. Значительно меньше исследований по изучению длительной прочности металла и его сварных соединений в наводороживающих средах. Значительное количество разрушений трубопроводов происходит вследствие замедленного водородного разрушения (ЗВР): при длительном воздействии напряжений, величина которых ниже предела текучести, и при уровнях водорода, которые не приводят к потере пластичности при обычных испытаниях на растяжение.

Обычно исследование стойкости основного металла и сварных соединений против ЗВР ведется на основе испытаний, когда инициированная исходной трещиной зона разрушения находится в контакте с искусственной наводороживающей средой. Разрушение происходит под влиянием не только водорода, но и анодного растворения, расклинивающего эффекта среды и других воздействий.

Выбор защитных мероприятий для сварных трубопроводов в наводороживающих средах производится в настоящее время без учета индивидуальных особенностей добываемых продуктов месторождения и без достаточного анализа эффективности защитных мер. Существующие приборы контроля за наводороживанием трубопроводов не позволяют количественно оценить связь между уровнем внедренного в металл водорода и условиями контактирования стенок трубопровода со средой.

В дополнение литературного обзора для выбора цели работы и путей ее реализации проводилась коллективная экспертная оценка проблемы надежности конструкций в наводороживающих средах, в которой приняли участие 16 специалистов (9 докторов и 7 кандидатов наук). Выводы экспертной оценки заостряют наше внимание на необходимости получения количественных характеристик стойкости против ЗВР трубопроводных сталей и их сварных соединений.

Основные задачи работы:

1. Разработка методики по оценке стойкости против ЗВР, когда разрушение происходит под влиянием водорода, как главного, инициирующего разрушение фактора.

2. Изучение влияния технологических мероприятий на стой-

кость против ЗВР сварных соединений трубопроводных сталей.

3. Разработка способа и прибора, позволяющего определить количество водорода в стенке трубопровода, внедренного в нее в результате взаимодействия с транспортируемым продуктом.

Во второй главе диссертации "ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДИФфуЗИОННО-ПОДВИЖНОГО ВОДОРОДА (/Н/диф)" разработаны методы оценки концентраций /Н/диф по толщине металла и определено распределение диффузионно-подвижного водорода в низкоуглеродистых сталях значительных толщин при одностороннем их наводороживании, характерном для реальных условий.

Водород в исследуемые образцы вводился электролитическим способом при катодной их поляризации в водном растворе серной кислоты с добавлением стимулятора наводороживания - тиосульфата натрия. Выбор режимов наводороживания производился с привлечением методов математического планирования экспериментов: при оценке влияния семи основных факторов на показатели наводороживания был реализован насыщенный план, представляющий собой дробную реплику 2^{7-4} ; поиск режима наводороживания, обеспечивающего максимальное количество /Н/диф в образце, производился методом последовательного симплексного планирования. В 14% растворе H_2SO_4 с добавкой 3 г/литр $Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$ при катодной поляризации с плотностью тока $19,5 \text{ мА/см}^2$ образец поглощает максимальное количество водорода. На основе экспериментальных данных с помощью ЭВМ "МИР-2" рассчитана модель, представляющая собой полином второй степени, позволяющая расчетным путем определить количество водорода в образце, вводимого применяемой нами средой с различным соотношением компонент.

Для оценки распределения концентраций /Н/диф по толщине металла проводили опыты с односторонним наводороживанием образцов диаметром 30 мм. Предварительно проведенные опыты позволили предположить, что распределение диффузионно-подвижного водорода в цилиндрическом образце диаметром 30 мм соответствует распределению /Н/диф в полубесконечном теле или бесконечной стенке. Наводороживали образцы высотой от 2 до 20 мм до установления стационарного потока водорода с обратной стороны. Предполагалось, что стационарному потоку соответствует стационарное во времени распределение /Н/диф по высоте образца. Количество водорода в каждом образце определяли под эвдиометром. Вычисляли разность между количествами водорода, выделяющимися из образцов неодинаковых толщин. Делили результат на разность весов образцов и относили полученную

концентрацию к координате, определяемой полусуммой высот. В результате обработки экспериментальных данных получены распределения концентраций диффузионно-подвижного водорода по толщине металла в разных средах. Они описываются экспонентой, множитель перед которой определяет интенсивность наводороживающей способности среды. Показатель экспоненты описывает диффузионные свойства материала. Крутизна экспоненты остается постоянной не только для разных сред, но и для испытанных нами низкоуглеродистых сталей - Ст.3, сталь 20, сталь 17Г2СФ - в различных их структурных состояниях.

По окончании процесса наводороживания $/H/$ диф в наибольших количествах десорбирует их тех участков образца, где его концентрация выше. Поместив наводороживающий цилиндр под слой глицерина так, чтобы ось его была горизонтальна, на боковой поверхности его будем наблюдать продвижение границы покрытого пузырьками десорбированного водорода участка металла от поверхности наводороживания в глубь образца. Выделение пузырьков водорода на боковой поверхности регистрировалось на фотопленку в различные моменты времени. Для удобства фотографирования на боковой поверхности образца заранее подготавливали продольную площадку шириной 5 мм, полировали ее до 10...11 класса чистоты. На каждой фотографии при помощи микрофотометра МФ-4 оценивали положение границы. Каждой концентрации диффузионно-подвижного водорода соответствует свое собственное время, необходимое для образования достаточно крупных и плоских пузырей.

Связывая законы распределения $/H/$ диф по толщине металла с динамикой перемещения границы между покрытой пузырьками десорбированного водорода и чистой поверхностью образца, получаем способ оценки концентраций $/H/$ диф по времени появления пузырьков водорода на боковой поверхности образца. Зависимость концентраций $/H/$ диф от времени t нахождения границы при 5% уровне значимости адекватно описывается выражением:

$$[H]_{\text{диф}} = 20 \cdot t^{-1} \quad (\text{см}^3/100 \text{ г}).$$

Она может использоваться для оценки распределений диффузионно-подвижного водорода, когда метод вычитания объемов (испытания цилиндрических образцов разной высоты) неприменим.

В третьей главе "РАЗРАБОТКА ПРИБОРА КОНТРОЛЯ ЗА КОНЦЕНТРАЦИЕЙ $/H/$ диф В СТЕНКЕ ТРУБОПРОВОДА" рассмотрены принцип действия, конструктивные особенности, методика обработки показаний и тех-

нические характеристики прибора контроля за воздействием наводороживающей среды, позволяющего определить количество внедренного в металл труб диффузионно-подвижного водорода, а также произвести оценку и оптимизацию антикоррозионных мероприятий в период эксплуатации, как, например, количество и периодичность введения ингибиторов коррозии.

При исследованиях распределения $H/диф$ по толщине металла с применением образцов разных толщин замерялся поток водорода, продиффундировавшего через каждый цилиндрический образец. Между концентрацией $H/диф$ растворенного в слое металла, близком к свободной поверхности (с которой выделялся водород) и потоком водорода $\dot{V}_H$ ($см^3/см^2 \cdot час$) продиффундировавшего через нее, обнаружена линейная зависимость, выражаемая уравнением:

$$[H]_{диф} = 41,7 \cdot \dot{V}_H \quad (см^3/100 г).$$

Она позволяет определить наибольшее количество растворенного в металле диффузионно-подвижного водорода непосредственно по характеристике потока через стенку известной толщины и оценить для реальных условий наводороживающую способность среды.

На этих сведениях основана работа датчика концентрации диффузионно-подвижного водорода. В отличие от существующих приборов типа "водородный зонд" и "труба в трубе" датчик позволяет количественно определить наводороживающую способность среды. Чувствительный элемент датчика находится в таких же условиях контакта с газом, как и стенка трубопровода.

Проведены испытания датчика в лабораторных условиях при наводороживании электролитическом и из газовой фазы. Рассчитаны его технические характеристики — чувствительность и точность.

Проверка работоспособности датчика проводилась на опытно-промышленном участке Оренбургского отдела ВНИИСТА в районе скважины 643.

При оценке склонности к замедленному водородному разрушению сварных швов необходимо учитывать дополнительную неравномерность распределения диффузионно-подвижного водорода, обусловленную электрохимической гетерогенностью сварных соединений. В работе экспериментально установлено отличие в насыщении водородом швов, выполненных сваркой плавлением электродами УОНИ 13/55, ВСЦ-4 и при контактной сварке.

Показания датчика следует корректировать на сварочный материал, метод сварки и характер термообработки.

Четвертая глава диссертации "ИСПЫТАНИЯ НА ЗВР С ВВЕДЕНИЕМ ВОДОРОДА В ЗОНУ РАЗРУШЕНИЯ ДИФфуЗИОННЫМ ПУТЕМ" отведена созданию способа испытания, позволяющего оценивать стойкость различных сталей и их сварных соединений при контролируемых уровнях водорода и внешней нагрузки. Применение его позволяет, в частности, оценивать опасность разрушения трубопроводов отдельно от поверхностного их взаимодействия с транспортируемой наводороживающей средой и от водорода, вводимого этой средой в металл труб.

На предложенный способ получено авторское свидетельство. Испытания проводили следующим образом (рис. I): на образец наносили концентратор напряжения и подвергали наводороживанию участок образца вне концентратора напряжений. Диффузионно-подвижный водород, внедренный в образец на наводороживаемом участке, диффузионным путем распространяется к концентратору напряжений. Замедленное разрушение в этом случае будет происходить только под влиянием напряжений в зоне концентратора и $H/диф$ в этой зоне. Напряжения в той части образца, которая подвергается наводороживанию, низки и не могут привести к образованию трещин раньше, чем у концентратора напряжений. Количество $H/диф$ в зоне концентратора определяется расстоянием ее от границы наводороживаемого участка образца.

Испытывались надрезанные образцы сечением 30×10 мм. Надрез радиусом 0,05 мм наносился с помощью вольфрамовой нити. Для наводороживания использовалась выбранная нами среда с "жестким" режимом. Ее подводили с двух сторон образца при катодной его поляризации. Нагружающие устройства позволяют сообщить образцам усилия до пяти с половиной тонн. Для контроля за усилием и регистрации времени разрушения образца использовали тензометрический усилитель УТ-4-1 и шлейфовый осциллограф ЭПО-9.

Условия наводороживания образцов выбирались экспериментально. Для этого использовали метод, основанный на связи между скоростью образования пузырьков водорода при десорбции его с боковой поверхности образца и распределением концентраций $H/диф$ по толщине металла. Установлено, что растягивающие напряжения не оказывают влияния на макрораспределение диффузионно-подвижного водорода. Концентрация его по толщине достаточно равномерна.

При разработке методики использовали образцы из стали 17Г2СФ и стали 20, а также их сварные соединения. Эти стали применяются при добыче, транспортировке и переработке сероводородосодержащих газов и нефти, в частности, на Оренбургском газовом место-

рождении, на нефтепромыслах Татарии.

Образцы из стали I7Г2СФ выполнялись ручной двухсторонней сваркой в X-образную разделку. Надрез наносили на различном удалении от центра шва. Меньшая стойкость, как в исходном состоянии, так и после высокого отпуска наблюдается при пересечении надрезом зоны сплавления. Излом образца повторяет конфигурацию шва. Видимо, это свидетельствует о наибольшей склонности к замедленному разрушению зон, твердость которых повышена. Для того, чтобы получить сопоставимые результаты, необходимо, чтобы при испытаниях основного металла и сварных соединений трещины развивались, имея одинаковую геометрию, по зоне с постоянными металлофизическими характеристиками. Для создания зон, поведение которых отражает свойства отдельных участков сварного соединения, использовали метод имитации, разработанный в МВТУ им.Баумана при оценке коррозионной стойкости сварных соединений.

Работоспособность предлагаемой методики по оценке стойкости против ЗВР подтверждается испытаниями, проведенными на имитированных сварных соединениях стали I7Г2СФ (рис. 2) и сварных соединениях стали 20. Из практики известно положительное влияние высокого отпуска на стойкость сварных стыков трубопроводов в наводороживающих средах. Нами определялось влияние термической обработки на поведение нагруженного металла при наличии в зоне разрушения одного только водорода. Соответствие поведения образцов и поведения реальных объектов свидетельствует об адекватности механизма растрескивания, происходящего при испытаниях по нашей методике, и механизма разрушения в реальных условиях.

Логарифм времени до разрушения образцов стали I7Г2СФ в разных состояниях линейно зависит от напряжений и количества водорода в зоне разрушений. Коэффициенты уравнения соответствуют вкладу каждого фактора в долговечность образца. При всех испытанных структурных состояниях роль механического фактора остается примерно на одинаковом уровне. Роль растворенного в металле водорода существенно меняется: высокий отпуск, обеспечивающий более равновесную структуру, почти в два раза снижает восприимчивость к воздействию водорода. Стойкость сварного соединения в этом случае приближается к стойкости основного металла.

При исследовании сварных соединений из стали 20 применяли образцы, выполненные контактной сваркой как без термообработки, так и после высокого отпуска. Наименьшую стойкость против ЗВР также имеет участок с наибольшей твердостью, расположенный вблизи

зоны стыка. Высокий отпуск примерно на 30% повышает время до разрушения.

Исследования с помощью быстродействующего дозатора водорода французской фирмы "Адамель" распределения остаточного водорода в зоне разрушения образцов сталей 20 и 17Г2СФ в различных их структурных состояниях обнаружили локализацию остаточного водорода у вершины надреза. Скорость его накопления сильно зависит от структурного состояния и марки стали — она резко возрастает с повышением прочности и твердости.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. В результате проведенных исследований разработана и научно обоснована методика по количественной оценке влияния диффузионно-подвижного водорода на стойкость против замедленного разрушения сталей и их сварных соединений, основанная на введении в зону разрушения диффузионным путем контролируемых количеств водорода. Концентрация водорода у вершины концентратора напряжений образца определяется расстоянием ее от границы наводороживаемого участка. Проведены контрольные испытания по разработанной методике, подтверждающие ее работоспособность.

2. С помощью разработанной методики установлено, что растягивающие напряжения не оказывают влияния на характер макрораспределения диффузионно-подвижного водорода в направлении действия одноосных растягивающих напряжений. Неравномерное поле растягивающих напряжений (в надрезанных образцах) также не оказывает влияния на характер макрораспределения диффузионно-подвижного водорода.

Экспериментально установлено, что при ЗВР разрушение происходит вследствие накопления остаточного водорода у концентратора напряжений, причиной разрушения является растворенный в металле диффузионно-подвижный водород. Стойкость стали против ЗВР зависит от количества водорода, который у концентратора напряжений перешел из диффузионно-подвижного состояния в молизованный (остаточный) и от скорости этого процесса. Более интенсивно диффузионно-подвижный водород переходит в остаточный водород у более прочной стали, вследствие этого обладающей большей восприимчивостью к замедленному разрушению под влиянием водорода. Борьба за повышение надежности сварных соединений в наводороживающих средах должна вестись как путем уменьшения концентрации диффузионно-подвижного водорода, внедряемого в металл средой, так и уст-

ранением дефектов, способных быть концентратором напряжений.

3. Наибольшей склонностью к замедленному, под влиянием водорода, разрушению обладают участки сварных соединений, твердость которых повышена. Сварные соединения из низкоуглеродистой стали с низким пределом прочности (сталь 20) не восприимчивы к ЗВР, т.к. с меньшей скоростью накапливают в себе остаточный водород даже при напряжениях, выше рабочих. Высокий отпуск, обеспечивающий более равновесную структуру и снижение твердости, почти на порядок снижает восприимчивость к воздействию водорода металла сварных соединений стали 17Г2СФ и на 30% повышает время до разрушения сварных соединений стали 20.

4. Определена дополнительная неравномерность распределения диффузионно-подвижного водорода в сварных соединениях, обусловленная их электрохимической гетерогенностью. Шов, выполненный электродами УОНИ 13/55 наводороживается более интенсивно, чем основной металл; электродами ВСЦ-4 - менее интенсивно. Высокий отпуск выравнивает распределение диффузионно-подвижного водорода в сварных соединениях, выполненных сваркой ~~и~~ плавлением. Распределение диффузионно-подвижного водорода в соединениях, выполненных контактной сваркой, не отличается от распределения в основном металле.

5. Разработан метод оценки концентраций диффузионно-подвижного водорода по толщине металла, основанный:

а) на определении концентраций диффузионно-подвижного водорода (под слоем вязкой жидкости) в образцах разных толщин, находившихся до этого в одинаковых условиях наводороживания;

б) на связи скорости образования пузырьков десорбирующего с боковой поверхности образца водорода с его исходной концентрацией.

6. Распределение по толщине концентраций диффузионно-подвижного водорода для испытанных низкоуглеродистых сталей описывается экспонентой. Диффузионные свойства оцениваются показателем экспоненты, они не зависят от структур и марки испытанных низкоуглеродистых сталей. Наводороживающая способность среды оценивается множителем перед экспонентой. Характер распределения диффузионно-подвижного водорода по толщине металла не меняется при наводороживании 9, 100 и 500 часов.

Установлена линейная зависимость между количеством диффузионно-подвижного водорода, растворенного в металле на некоторой толщине, и потоком водорода, продиффундировавшего через

образец такой толщины.

7. На основе данных, полученных с помощью метода оценки распределения водорода по толщине металла, разработан датчик концентраций диффузионно-подвижного водорода для количественной оценки наводороживающей способности сред в реальных условиях. Чувствительный элемент датчика находится в условиях контакта со средой таких же, как и внутренняя стенка трубопровода или аппарата. Создана методика обработки показаний датчика. Работоспособность его подтверждена лабораторными и опытно-промышленными испытаниями. Датчик принят к опытной эксплуатации в производственном объединении "Оренбурггаздобыча".

Материалы диссертации опубликованы в следующих работах автора:

1. "Метод исследования макрораспределения диффузионно-подвижного водорода в толстостенных элементах при их наводороживании". Материалы Всесоюзного научно-технического семинара "Повышение стойкости сварных соединений против водородной хрупкости", г. Воронеж, 1977, с.27-28 (в соавторстве).

2. "Моделирование наводороживающих сред в лабораторных условиях". Информационный листок I25-77 Оренбургского ЦНТИ, 1977.

3. "Руководство Р 271-77 по контролю и прогнозированию работоспособности несущих сварных конструкций в средах, содержащих сероводород", М., ВНИИСТ, 1977, 8 с (в соавторстве).

4. "Способ механических испытаний металлических образцов". авторское свидетельство 589563. "Бюллетень изобретений" № 3, 1978, с.142 (в соавторстве).

5. "Выбор режима электролитического наводороживания". "Защитная лаборатория", 1978, № 3, с.133 (в соавторстве).

6. "Датчик концентрации диффузионно-подвижного водорода", "Газовая промышленность", 1978, № 4, с.33-34 (в соавторстве).

7. "Влияние растягивающих напряжений на макрораспределение диффузионно-подвижного водорода". РНТС "Коррозия и защита в нефтегазовой промышленности", 1978, № 9, с.3-4 (в соавторстве).

8. "Коллективная экспертная оценка проблемы надежности конструкций в наводороживающих средах". "Защита металлов", 1978, том XIV, выпуск 5, с. 572-575 (в соавторстве).

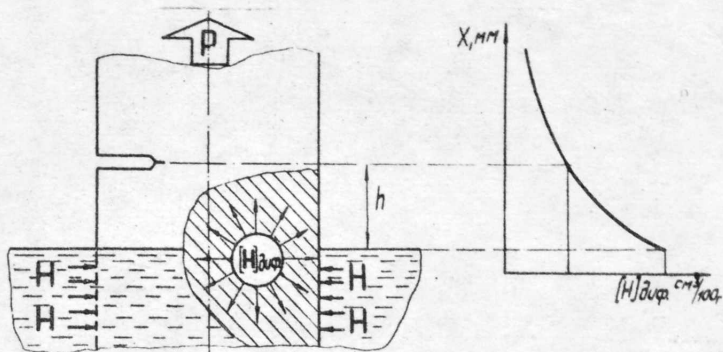


Рис. 1. Испытания на ЭВР с введением водорода в зону разрушения диффузионным путем.

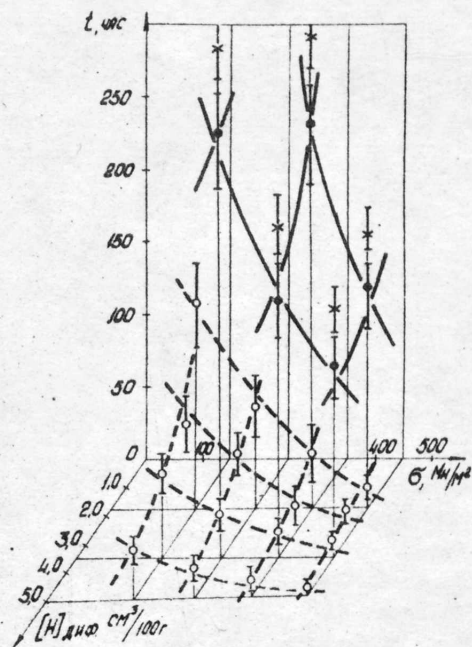


Рис. 2. Стойкость против замедленного водородного разрушения стали 17Г2СФ (o - имитаторов З.Т.В., ● - имитаторов З.Т.В. после высокого отпуска, x - основного металла).