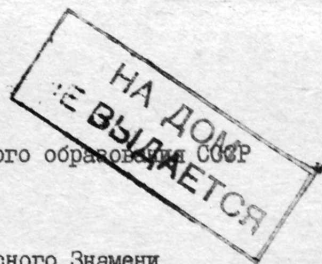


М337923



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

НИКОЛАЕВ Анатолий Федорович

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ МАЛОУГЛЕРОДИСТЫХ,
НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ И ИХ СВАРНЫХ
СОЕДИНЕНИЙ В УСЛОВИЯХ НАВОДОРОЖИВАНИЯ
(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

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

НИКОЛАЕВ Анатолий Федорович

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ МАЛОУГЛЕРОДИСТЫХ,
НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ И ИХ СВАРНЫХ
СОЕДИНЕНИЙ В УСЛОВИЯХ НАВОДОРОЖИВАНИЯ
(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



1337923

Николаев А. Ф. Исследование

Воронеж

1979

Работа выполнена в Воронежском производственном объединении "Автогенмаш" и в Московском ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени высшем техническом училище имени Н.Э.Баумана.

Научный руководитель - д.т.н., профессор ФРОЛОВ В.В.

Официальные оппоненты

д.т.н., профессор ЛИШИЦ Л.С.

к.т.н., с.н.с. АРБУЗОВ Ю.П.

Ведущее предприятие указано в решении Ученого Совета.

Защита диссертации состоится "_____" _____ 1979г.
на заседании специализированного Совета Д053.15.07 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 "_____" _____ 1979г.

Ученый секретарь
специализированного Совета

д.т.н., профессор

Стеклова
М В ТУ
им. Н. Э. Баумана

Стеклова О.И.

ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ
БИБЛИОТЕКА

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. В практике эксплуатации стальных конструкций известны многочисленные случаи их катастрофического разрушения в результате водородного охрупчивания металла. Несмотря на высокий уровень, достигнутый в развитии сварочной техники и технологии, изготовить сварную конструкцию, полностью свободную от факторов, способствующих наводороживанию сталей (дефекты, термомеханическое воздействие сварки и т.д.), практически невозможно. Увеличение объемов строительства нефтегазопроводов и выпуска оборудования нефтяного и химического машиностроения, которые в большинстве случаев эксплуатируются в наводороживающих средах, требует обеспечения их надежной работы. В этом заключается актуальность данных исследований.

Цель работы. Целью работы является повышение стойкости стальных конструкций к хрупкому разрушению в наводороживающих средах.

Методы исследования. Влияние водорода на служебные характеристики сталей и сварных соединений исследовали на цилиндрических и плоских образцах квазистатическим одноосным растяжением с постоянной скоростью вплоть до разрушения при нормальных и отрицательных температурах. Геометрические размеры образцов в процессе растяжения определяли механическими, оптическими и тензометрическими методами. Наводороживание образцов выполняли методом электролитического насыщения, достоверно имитирующего процессы в рабочей наводороживающей среде, характерной для химического и нефтяного машиностроения. Оценка сопротивляемости сталей и стальных соединений хрупкому разрушению производилась на основе принципов линейной механики разрушения, теории упруго-пластического деформирования материалов и сравнения времен до разрушения образцов. Анализ полей напряжений и деформаций при реализации в образцах плоского или объемного напряженных состояний, а также обработка экспериментальных данных производилась с помощью ЭВМ.

Научная новизна. Установлено, что понятие предела временного сопротивления (σ_g) теряет свою значимость при сравнении прочности ненаводороженных и наводороженных малоуглеродистых и низколегированных сталей. Обнаружен эффект уменьшения "времени жизни" наводороженных образцов при их испытании на растяжение с постоянной скоростью. Выполнен аналитический расчет и вскрыты особенности распределения полей напряжений, деформаций в наводороженных и ненаводо-

осесимметричных образцах в осесимметричном и плоском напряженном состояниях. С помощью критерия раскрытия устья развивающейся трещины (δ_c) сделана оценка механических свойств наводороженного и ненаводороженного основного металла, металла шва и зоны термического влияния сварных соединений, выполненных различными способами сварки. Установлено, что критерий δ_c и методика его определения вполне приемлемы для анализа работоспособности стальных конструкций в наводороживающих условиях.

Практическая ценность. Упорядочение по значениям критерия δ_c наиболее распространенных способов сварки позволяет сделать их выбор в зависимости от условий эксплуатации конструкций (отрицательная или положительная температура, наводороживающая или ненаводороживающая среды). При помощи разработанного экспрессного метода возможно быстро определить стали, наиболее устойчивые к хрупкому разрушению в условиях наводороживания. Разработанные алгоритмы позволяют при помощи ЭВМ решать сложные transcendентные уравнения упруго-пластического равновесия и выполнять расчет полей напряжений и деформаций в условиях плоского или осесимметричного напряженных состояний образцов.

Апробация работы. Выбор способов сварки по значениям критерия δ_c сделан на Борисоглебском заводе "Химмаш" и на Воронежском экскаваторном заводе им. Коминтерна при изготовлении конструкций, эксплуатируемых в наводороживающих средах и в условиях Севера. Экспресс-метод определения металлов, наиболее устойчивых водородному охрупчиванию, апробирован на Воронежском авиационном заводе при определении физико-механических свойств титановых сплавов. Основные положения работы докладывались на УП, УШ, IX областных научно-технических конференциях сварщиков г. Воронежа, на XXXI научной конференции Воронежского инженерно-строительного института, на Всесоюзном научно-техническом семинаре "Повышение стойкости сварных соединений против водородной хрупкости" (г. Воронеж) и на научном семинаре кафедры АМ-7 МВТУ им. Н.Э. Баумана.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов по работе и приложения. Содержит 185 страниц, в том числе 38 иллюстраций, 20 таблиц и 132 наименований использованных литературных источников.

ГЛАВА I. Водород попадает в металл в условиях плавки и разлива, в процессе изготовления (гальваническая обработка, сварка) и эксплуатации стальных конструкций в наводороживающей среде (влаги, коррозии, сероводорода и т.д.). Водород в ста-

лях может находиться в виде диффузионного, остаточного и связанного.

Как показали в своих исследованиях Р.А.Козлов, Г.В.Карпенко, В.Я.Дубовой, В.А.Романов, влияние водорода на механические свойства металлов ощутимо при содержании $1-2 \text{ см}^3 / 100 \text{ г}$ металла. При контакте с наводороживающей средой или при сварке плавлением количество водорода в металле может значительно больше. У малоуглеродистых и низколегированных сталей водород значительно снижает пластические свойства, разрушающее напряжение, длительную прочность, энергию разрушения.

У нас в стране и за рубежом проведено очень много исследований, посвященных проблеме водородной хрупкости (П.В.Гельд, Г.В.Карпенко, В.В.Фролов, О.И.Стеклов, В.Я.Суворин, Р.А.Козлов, А.Сивертс, А.Трояно и др.). Несмотря на это, до сих пор не удалось найти общепринятых мер, предупреждающих охрупчивание металлов и катастрофическое разрушение конструкций в результате водородного воздействия. Разрушения конструкций связаны с человеческими жертвами и большими материальными потерями. Примером могут служить разрушения американских судов типа "Либерти", газопровода на юго-западе Франции, растрескивание оборудования нефтяной и химической промышленности у нас в стране и др.

В настоящее время в СССР расширяется строительство магистральных трубопроводов для транспортирования нефти и газа, изготовление оборудования нефтяного и химического машиностроения, которое в большинстве случаев предназначено для эксплуатации в наводороживающих условиях. Следовательно, проблема повышения стойкости металлов и сварных соединений к водородной хрупкости приобретает большое народно-хозяйственное значение. Поведение водорода в металлах в большой степени зависит от природы, чистоты и качества легирующих элементов, наличия напряжений, деформаций, различного рода дефектов и т. д. Указанные факторы контролируются лишь приблизительно, чем объясняется разноречивость литературных данных о количественном и качественном влиянии водорода на свойства металлов. Вместе с тем многие факторы, их взаимодействие изучены недостаточно и не учитываются при инженерных расчетах.

Попытка использовать дорогостоящие высококачественные стали не снимает проблемы водородной хрупкости, т.к. в процессе изготовления конструкций необходимо применение сварки, выполнить которую без дефектов, способствующих наводороживанию металлов в процессе эксплуатации (поры, непровары, трещины, остаточные

деформации и напряжения и т.д.) практически невозможно. Водородное охрупчивание металлов – сложная проблема, требующая объективных критериев для выбора материалов и методов изготовления конструкций, устойчивых в наводороживающих средах. На основании проделанного литературного обзора в настоящей работе были поставлены следующие задачи:

1. Разработать методы сравнительных испытаний сталей (Ст.3, 09Г2С, 17ГС) и их сварных соединений применительно к условиям эксплуатации конструкций газо- и нефтехимической промышленности;

2. Оценить влияние водорода на свойства металлов и сварных соединений с точки зрения теории упруго-пластических деформаций и принципов механики разрушения материалов;

3. Исследовать влияние водорода на распределение напряжений и деформаций вблизи дефектов;

4. Разработать технические рекомендации по выбору металлов, способов сварки и термообработки, обеспечивающих устойчивость конструкций разрушению в наводороживающих средах.

ГЛАВА 2. В исследованиях Л.С.Мороза, Т.Э.Мингина и др. показано, что процесс взаимодействия наводороживающей среды и металла можно достаточно точно имитировать в лабораторных условиях путем подбора электролита, концентрации и плотности тока. В наших исследованиях применялся 5% водный раствор серной кислоты с добавлением 0,05 г/л тиосульфата натрия как стимулятора наводороживания. Плотность тока равнялась 100 А/м². Необходимое время наводороживания определялось экспериментально: 24 круглых образца диаметром 6 мм из стали Ст3, наводороженные в течение 0–8 ч, растягивались с постоянной скоростью 4 мм/мин на разрывной машине УММ–5 вплоть до разрушения. Измерялись предел временного сопротивления σ_t^p , напряжение (истинное) σ^p и пластичность ϵ^p в момент разрушения и время T^p от начала нагружения до разрушения образца. Из рис.1 видно, что в пределах естественного разброса, связанного с погрешностью эксперимента, можно считать, что при наводороживании более 3 ч величины σ_t^p , σ^p , ϵ^p , T^p принимают стабильные значения, практически не зависящие от дополнительного увеличения содержания водорода в металле. Аналогичный результат наблюдался для других марок сталей. Во всех дальнейших исследованиях принято время наводороживания 4 ч, а содержание диффузионного водорода в исследованных сталях составляет 9–12 см³/100 г металла.

Корреляционный анализ статистической зависимости σ_t^p , σ^p , ϵ^p , T^p от времени наводороживания t_n (см.рис.1), основанный на методе наименьших квадратов, показал существование следующих связей:

$$\begin{array}{rcl}
 \sigma_e & = & 416,9 \\
 \sigma^P & = & 544 + 351 \varepsilon \\
 \varepsilon^P & = & 0,41 + 1,59 \varepsilon \\
 \tau^P & = & 168,6 + 100,8 \varepsilon
 \end{array}
 \left. \begin{array}{l} -1,0183 t_H \\ -1,0184 t_H \\ -1,0178 t_H \end{array} \right\} \quad (1)$$

Отсюда следует, что предел временного сопротивления σ_e практически не зависит от содержания водорода в металле и теряет свою значимость при сравнении прочности ненаводороженных и наводороженных образцов.

Работоспособность наводороженной стали существенно меньше, чем ненаводороженной, о чем косвенно свидетельствует снижение величин σ^P , ε^P , τ^P . Однако знания только напряжения (σ^P) и пластичности (ε^P) при разрушении образца недостаточно для объективного суждения о работоспособности конструкции с учетом физико-механических свойств сталей, условий нагружения и среды эксплуатации. Объективным критерием оценки работоспособности, наиболее полно учитывающим свойства прочности и долговечности конструкций, является время t^P до разрушения конструкций или макетов при их испытании на длительную прочность в реальных условиях эксплуатации, и для его определения требуются длительные и трудоемкие эксперименты. Поэтому обычно механические свойства сталей исследуют на пропорциональных образцах с имитацией условий эксплуатации при квазистатическом нагружении с постоянной скоростью удлинения. Аналогом времени t^P до разрушения в условиях длительной прочности является время τ^P до разрушения образцов при кратковременном испытании на растяжение.

При уменьшении скорости растяжения образцов время до разрушения τ^P увеличивается и приближается по смыслу ко времени t^P . Опытные данные для ненаводороженных образцов свидетельствуют о том, что большему t^P соответствует большее τ^P и наоборот. Очевидно, t^P является некоторой сложной функцией σ^P и ε^P . Из соотношений (1) после исключения t_H (с учетом того, что показатели экспонент почти одинаковы) получаются следующие связи:

$$\left. \begin{array}{l} \sigma^P \approx -43,1 + 3,48 \tau^P \\ \varepsilon^P \approx -2,25 + 0,0158 \tau^P \end{array} \right\} \quad (2)$$

Таким образом, t^P является функцией τ^P . Вид и коэффициенты связей (2) не зависят от того, есть ли водород в металле или нет, а отсюда следует независимость от наличия водорода связи t^P с τ^P . Это позволяет утверждать, что для двух металлов I и 2

соотношение значений $\tau_1^P > \tau_2^P$ не приведет к противоречию с критерием $t_1^P > t_2^P$ независимо от среды, в которой металлы эксплуатируются.

Материалом для дальнейших исследований служили широко используемые в народном хозяйстве, в газонефтедобывающей и перерабатывающей промышленности малоуглеродистые и низколегированные стали Ст.3, 09Г2С, 17ГС. Служебные характеристики сталей в состояниях поставки, с остаточной деформацией 10%, после деформационного старения, после высокого отпуска и сварных соединений из этих сталей исследовали в диапазоне температур от -60 до 20 °С на плоских и цилиндрических образцах статическим растяжением с постоянной скоростью 4 мм/мин вплоть до разрушения. Величина деформации определялась соответствующим уменьшением площади поперечного сечения в шейке образца при его растяжении, напряжение определялось отношением растягивающей силы к текущему значению этой площади. Деформационное старение выполнялось путем образования в образцах остаточной деформации равной 10% и последующей выдержки в течение 2 ч при температуре 250°С. Высокий отпуск образцов производился при температуре 650°С с выдержкой в течение 4 ч.

Анализ типичных кривых пластического деформирования цилиндрических ненаводороженных образцов показывает, что пластическая деформация при разрушении наводороженных образцов в несколько раз меньше, чем у ненаводороженных, а ход кривых почти совпадает (разница по ординате 10-15%). Аналогичное совпадение хода кривых наблюдалось при испытании плоских образцов с надрезами при температурах от -60 до 20°С.

Чтобы учесть при инженерных расчетах влияние среды на свойства металла, необходимо знать аналитическую зависимость σ от ϵ . Эта зависимость, используемая в дальнейшем для расчета полей напряжений и деформаций вблизи дефектов получена путем аппроксимации кривой пластического деформирования законом Гука на участке упругого деформирования, степенной зависимостью на участке шейкообразования и линейной на участке равномерного пластического течения.

ГЛАВА 3. Известно, что дефект способствует локальной концентрации водорода и напряжений, причем напряженное состояние вблизи концентратора в большинстве случаев имеет характер плоского или объемного. В плоском напряженном состоянии, а также в состоянии осесимметричной деформации находится большинство деталей конструкций, работающих на растяжение.

В соответствии с работами В.С.Жуковского, Г.Нейбера, А.Н.Гру-

бина указанные напряженные состояния имитировались определенным соотношением геометрических размеров плоских (шириной 32 мм, толщиной 4 мм) и цилиндрических (диаметром 13 мм) образцов с надрезами, имеющими в основании радиус 1 мм. Материалом исследований служили стали Ст.3, 09Г2С и 17ГС в указанных выше термомеханических состояниях.

В ходе эксперимента изучалось влияние водорода на характер полей напряжений и деформаций, а также взаимодействие водорода и надреза, имитирующего поры, шлаковые включения и т.д., которые не относятся к категории острых концентраторов, но в определенных условиях способных перейти в трещину, что подтверждается случаями хрупкого разрушения конструкций.

При растяжении образцов контролировались нагрузка и текущие геометрические параметры — глубина надреза, полуширина узкого сечения и радиус в вершине надреза. Измерение этих параметров в процессе растяжения без останова представляет определенную трудность. Предложена установка, которая состоит из 2-х фотоаппаратов, расположенных перпендикулярно относительно друг друга, и 2-х фотовспышек с рассеивающими экранами напротив каждого фотоаппарата. Сначала образец фотографировался двумя аппаратами одновременно в исходном состоянии, а затем съемка повторялась в процессе растяжения через 30 или 10 с. После проявления пленка проектировалась на экран аппарата "Микрофот 5 ПО-1" и измерялись исходные и текущие геометрические параметры с учетом масштаба. Радиус кривизны в вершине надреза измерялся путем совмещения проекции на экране с набором окружностей. Расчет полей напряжений и деформаций вблизи узкого сечения цилиндрических и плоских образцов с надрезами выполняли по методике А.Н.Грубина.

Известно, что при растяжении образца с надрезом упругие деформации концентрируются в центре поперечного сечения, а пластические в зоне надреза. При решении упруго-пластических задач основная трудность заключается в нахождении осевых деформаций ($\epsilon_{\text{хк}}$ — в плоской задаче, $\epsilon_{\text{ок}}$ — в осесимметричной) и границы (χ_r) между зонами относительно малых (упругих) и относительно больших (пластических) деформаций. Эту трудность А.Н.Грубин преодолевает графически, используя деформационную теорию пластичности. Вместо менее точного графоаналитического метода нами использовался итерационный метод Ньютона, реализация которого проводилась на ЭВМ "Наири-2". В качестве контроля счета служило сравнение расчетных и экспериментальных значений номинальных напряжений. Погрешность не превышала 10%.

Типичные распределения полей напряжений и деформаций для всех состояний можно увидеть на примере плоских образцов с надрезами из основного металла стали Ст.3 (рис.2) в ненаводороженном (а) и наводороженном (б) состояниях в узком сечении в момент разрушения, построенных по результатам счета. Крестиком на оси абсцисс обозначена координата X_T . Можно отметить следующее:

а) Качественно распределение напряжений и деформаций для всех исследуемых сталей и состояний носит одинаковый характер: напряжения σ_x , σ_y и продольная деформация ϵ_x концентрируются вблизи вершины надреза. Поперечное растягивающее напряжение σ_y возрастает от середины к периферии, достигает максимального значения в пластической области и падает до нуля в вершине надреза;

б) Поперечная деформация ϵ_y дважды меняет знак: в центре образца и у вершины надреза металл растянут в поперечном направлении, а в промежутке между ядром и вершиной сжат. Максимум сжатия приходится на пластическую зону;

в) Наличие водорода в образцах снижает значение всех напряжений и деформаций при разрыве. Поля напряжений и деформаций ненаводороженных и наводороженных образцов, соответствующие одинаковому интервалу времени от начала нагружения (изохроны), практически совпадают вплоть до момента разрушения наводороженных образцов. Наводороженные образцы разрушались раньше ненаводороженных. Глубина проникновения зоны пластичности для наводороженных образцов меньше, чем для ненаводороженных;

г) Наводороженные образцы с остаточной деформацией равной 10% и с деформационным старением, имея малый запас пластичности, разрушаются хрупко, практически в упругой стадии. Высокий отпуск образцов с остаточной деформацией и деформационным старением значительно повышает глубину зоны пластичности, т.е. увеличивает стойкость к водородному охрупчиванию.

В цилиндрических образцах с надрезом наблюдалась аналогичная закономерность в распределении напряжений и деформаций. Однако, количественно из-за объемного деформирования неравномерность выражена меньше. При наличии водорода так же снижаются все прочностные характеристики, а пластические деформации локализуются в непосредственной окрестности вершины надреза, в целом же образец в момент разрушения упругий.

Очевидно, изохроны полей напряжений и деформаций для одной и той же ненаводороженной и наводороженной конструкции также будут повторяться и при других схемах напряженного состояния вплоть до напряженного состояния, соответствующего моменту разрушения

наводороженной конструкции. Никаких особенностей в структуре полей напряжений и деформаций, предвещающих преждевременное разрушение наводороженных конструкций по сравнению с наводороженными, нет.

С целью определения качественного и количественного совместного влияния водорода и надреза на прочностные характеристики металла сравнивались результаты испытаний на разрыв цилиндрических образцов с надрезами и без надрезов. Обработка результатов по методу наименьших квадратов приводит к следующим уравнениям регрессии:

$$\sigma^P = 882 - 60,5X_1 - 98X_2 - 20,5X_1X_2 \quad (3)$$

$$\varepsilon^P = 1,337 - 0,742X_1 - 0,377X_2 - 0,0025X_1X_2 \quad (4)$$

где качественные факторы - надрез и водород - представлены переменными соответственно X_1 и X_2 , принимающими значения - 1 при отсутствии фактора и +1 при наличии его.

В уравнении (4) коэффициент при взаимодействии X_1 и X_2 существенно мал по сравнению с коэффициентом при линейных членах и им можно пренебречь. Эффекты снижения пластичности под влиянием водорода и надреза независимы и суммируются, снижение ε^P происходит интенсивнее от влияния надреза (коэффициент при X_1 почти вдвое больше, чем при X_2). Из (3) следует, что водород и надрез снижают величину σ^P , однако под действием водорода падение σ^P больше, чем под влиянием надреза, и кроме того, наличие надреза усугубляет потерю прочности под действием водорода. Следовательно, в местах дефектов конструкции водород существенно снижает ее прочность и, если конструкция эксплуатируется в наводороживающей среде, то все отрицательные свойства дефектов проявляются рельефней, чем в ненаводороживающей.

ГЛАВА 4. Исследованием прочностных свойств материалов при наличии острых дефектов в виде трещин занимается линейная механика разрушения, которая базируется на работах А.Гриффитса, Дж.Ирвина, Е.Орована, Г.П.Черепанова и др. Для сталей малой и средней прочности для оценки начальной стадии зарождения разрушения используют критическое раскрытие трещины δ_c . Значения критерия δ_c , соответствующие моменту страгивания трещин, определяли по методике и на установке, разработанными в МВТУ им. Н.Э.Баумана С.А.Куркиным, В.А.Винокуровым, Ю.Г.Сильвестровым на плоских образцах шириной 150 мм и толщиной 10 мм с центральным сквозным надрезом длиной 50 мм. Радиус закругления надрезов равнялся примерно 0,1 мм. Перемещение

кромки надрезов и нагрузка записывались непрерывно в процессе растяжения образцов на ленту осциллографа для последующего определения упругой составляющей критерия δ_c . Величину пластической составляющей критерия определяли визуальным измерением под микроскопом исходной и конечной ширины надреза с учетом ширины образовавшейся трещины в вершине надреза. Исследовались свойства сталей Ст.3, 09Г2С и сварных соединений, выполненных следующими способами сварки – автоматической под слоем флюса, полуавтоматической в среде углекислого газа, ручной дуговой электродами АНО-4 и УОНИ-13/45. Кроме того исследовались образцы, прошедшие предварительную термомеханическую обработку – деформационное старение, высокий отпуск. В сварных соединениях критерий δ_c определяли в металле шва, в зоне термического влияния на расстоянии 0,5–1 мм и 18–20 мм от линии сплавления. Температура испытания: от -60 до 20°C . Зависимости критического раскрытия надреза металла шва, выполненного сваркой под слоем флюса, металла зоны термического влияния и околошовной зоны в наводороженном и наводороженном состояниях от температуры испытания показывают, что общей закономерностью для зон сварного соединения при 20°C является уменьшение значений δ_c от влияния водорода, особенно для металла шва. Наличие водорода снижает критерий δ_c тем больше, чем ниже температура и при -60°C величина δ_c составляет всего 0,05 мм. При температурах $-60 - 0^\circ\text{C}$ наибольшей склонностью к водородной хрупкости обладает металл околошовной зоны, где характерно термомеханическое воздействие сварки. Исследования металла при наличии в нем деформационного старения показали, что наводороживание и понижение температуры до -40°C уменьшают величину критерия δ_c . Применение последующего высокого отпуска повышает значения δ_c как наводороженных, так и наводороженных образцов примерно в 1,5–2 раза.

Исследования металла швов, выполненных различными способами сварки, показали, что максимальные значения критерия δ_c имеет металл швов, выполненных автоматической сваркой под слоем флюса и в среде углекислого газа (рис.3). Это согласуется с минимальным количеством водорода в металле швов по данным Р.А.Козлова, Н.Н.Колыкина, Н.А.Ганно и др. Можно отметить, что критерий δ_c и методика его определения приемлемы для анализа работоспособности сталей и сварных соединений в наводороживающих условиях.

ГЛАВА 5. В данной главе рассматриваются некоторые практические рекомендации для повышения стойкости сталей и сварных соединений, вытекающие из изложенных исследований.

Для повышения срока службы сварных конструкций необходимо использовать такие способы сварки или обработки металла, которые образуют швы, наиболее устойчивые к хрупкому разрушению. Применяемые в настоящее время механические способы обработки сварных соединений (деформированием, взрывом, проковкой и др.) нельзя считать надежными, т.к. они могут значительно снизить не только величину остаточных напряжений, но и пластичность некоторых участков зоны термического влияния. Как уже отмечалось, несмотря на разницу методик (см. Гл.3 и 4) получены идентичные результаты: путем высокого отпуска можно восстановить значительную часть потерянной пластичности наводороженных сталей, прошедших различную термомеханическую подготовку, характерную для зоны термического влияния сварных соединений. На основании этого предложено для повышения стойкости водородному охрупчиванию сварных соединений из малоуглеродистых и низколегированных сталей при наличии остаточной деформации (до 10%), деформационного старения, дефектов типа трещин, пор, подрезов и т.д. обрабатывать сварные швы высоким отпуском по следующему режиму: нагрев до температуры 600-650°C, выдержка при этой температуре в течение 1,5-2 ч, охлаждение со скоростью 80-100°C в час. Этот способ обработки сварных швов прост и удобен при изготовлении стальных конструкций.

Анализ пластических свойств основного металла сталей Ст.3, 09Г2С и металла шва методом механики разрушения (см.Гл.4) позволил распределить по максимальным значениям σ_s наиболее распространенные в машиностроении способы сварки в определенной последовательности (см.: рис.3) с учетом условий эксплуатации стальных конструкций.

При выборе способов сварки необходимо учитывать устойчивость водородной хрупкости не только металла шва, зоны термического влияния, но и основного металла конструкций.

Как отмечалось ранее (см.Гл.2), время T^p до разрушения образцов при квазистатическом нагружении с постоянной скоростью растяжения может служить мерой работоспособности сталей, комплексно учитывающей влияние пластических свойств стали, среды эксплуатации и напряженного состояния в образце. В измерении и сравнении "времени жизни" образцов T^p заключается суть предлагаемого экспрессного метода сравнительной оценки работоспособности различных сталей в наводороживающих средах. Безусловно, сравнению подлежат стали, близкие по своим физико-механическим свойствам, удовлетворяющие условиям изготовления и эксплуатации конструкций. Скорость растяжения

должна быть в пределах 2-6 мм/мин, чтобы за время до разрушения образца десорбция водорода из металла была незначительна. Стали с низкими значениями ζ^P отбраковываются. Оставшиеся стали в зависимости от требований условий эксплуатации должны быть тщательно изучены. Из сравнения сталей Ст.3, 09Г2С, 17ГС по времени T^P , по прочности σ^P и пластичности ε^P при разрушении, по глубине проникновения зоны пластичности (см. Гл.3) следует, что менее чувствительной к водороду является сталь 09Г2С.

Общие выводы

1. Водород резко снижает пластичность и прочность сталей Ст.3, 09Г2С, 17ГС в момент их разрушения, в то время как предел прочности σ^P практически не зависит от количества водорода в металле, т.е. при расчете работоспособности конструкций в наводороживающих средах предел прочности не может служить достоверной оценкой.

2. Численным методом при помощи ЭВМ (вместо графо-аналитического) определено распределение полей напряжений и деформаций в наводороженных и ненаводороженных образцах в осесимметричном и плоском напряженном состояниях. Подтверждено, что наибольшая неравномерность в распределении полей имеет место вблизи надрезов. Показано, что наличие водорода в металле уменьшает уровень полей напряжений, деформаций и зону пластичности в момент разрушения. Наводороженные образцы с объемным напряженным состоянием, имея меньшую глубину зоны пластичности, более чувствительны к хрупкому разрушению, чем образцы с плоским напряженным состоянием.

3. Изохроны полей напряжений и деформаций для наводороженных образцов в момент разрушения по своим значениям близки к изохронам для ненаводороженных образцов, но последние, не исчерпав пластичности, еще не разрушаются. Таким образом, несмотря на близость полей напряжений и деформаций, время до разрушения наводороженных образцов значительно сокращается.

4. При наличии в металле концентратора напряжений и водорода общий эффект снижения пластичности равен сумме эффектов от действия концентратора и водорода порознь. Концентратор напряжения усугубляет потерю прочности σ^P под действием водорода.

5. Совместное влияние водорода, остаточной деформации, деформационного старения вызывает существенное изменение физико-механических свойств металла и способствует повышению вероятности хрупкого разрушения сварных конструкций.

6. Обработка сварных соединений высоким отпускком снимает вредные последствия сварки, восстанавливает в основном пластические свойства металла шва и увеличивает срок службы стальных конструкций в наводороживающих средах.

7. Изучение свойств наводороженных сталей и сварных соединений с помощью критерия раскрытия устья развивающейся трещины δ_c показало, что методика его определения вполне приемлема для анализа работоспособности стальных конструкций в наводороживающих условиях.

8. Наибольшие значения критерия δ_c при наличии водорода и температур от -60 до 20°C имеют швы, выполненные автоматической сваркой под слоем флюса и сваркой в среде углекислого газа.

9. Предлагаемый экспрессный метод сравнительной оценки сталей по времени до разрушения образцов (T^P) при квазистатическом растяжении с постоянной скоростью позволяет сравнительно быстро определить группу сталей, предпочтительных для изготовления сварных конструкций, работающих в наводороживающих средах.

10. По факторам чувствительности исследованных сталей к водороду — глубине проникновения зоны пластичности, прочности и пластичности в момент разрушения, времени до разрушения, критерию раскрытия трещины определено, что наибольшей стойкостью против водородного воздействия будет обладать конструкция, изготовленная из стали 09Г2С сваркой под слоем флюса или в среде углекислого газа.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Суворин В.Я., Николаев А.Ф., Стрекалов В.А., Казаков Э.Д. Влияние водорода на хрупкое разрушение сварных соединений. Материалы VII областной научно-технической конференции сварщиков "Передовые методы сварки в промышленности" Воронеж, (НПО Машпром), 1973, с.23-25
2. Суворин В.Я., Николаев А.Ф., Совместное влияние водорода и деформационного старения на хрупкое разрушение стали 09Г2С. Труды НПО Криогенмаш, вып.16, 1974, с.160-165.
3. Суворин В.Я., Николаев А.Ф. Влияние пластической деформации на хрупкое разрушение сталей в присутствии водорода. "Химическое и нефтяное машиностроение", №3, 1975, с.28-30.
4. Суворин В.Я., Николаев А.Ф., Стрекалов В.А., Шукайло В.И.,

- Фролов В.В. Влияние водорода на статическую прочность и пластичность низколегированных сталей 09Г2С и 17ГС (применительно к их сварке). "Сварочное производство", №8, 1976, с.7-9.
5. Суворин В.Я., Николаев А.Ф., Фролов В.В. Влияние накопленной пластической деформации, деформационного старения и температуры на хрупкое разрушение сталей Ст.3, 09Г2С в присутствии водорода. "Сварочное производство", №12, 1976, с.4-6.
6. Николаев А.Ф. Влияние водорода на концентрацию напряжений в стальных образцах с надрезами. Тезисы докладов Всесоюзного научно-технического семинара "Повышение стойкости сварных соединений против водородной хрупкости", Воронеж, (НТО Машпром), 1977, с.37-40.
7. Суворин В.Я., Николаев А.Ф., Фролов В.В., Куркин С.А., Сильвестров Ю.Г. Исследование свойств сварных соединений с помощью кристического раскрытия трещины. "Известия вузов.Машиностроение", 1978, №9, с.127-131.
8. Николаев А.Ф., Фролов В.В. Влияние водорода на поле напряжений и деформаций в стальных цилиндрических образцах с надрезами. "Известия вузов.Машиностроение", 1978, №9, с.122-126.

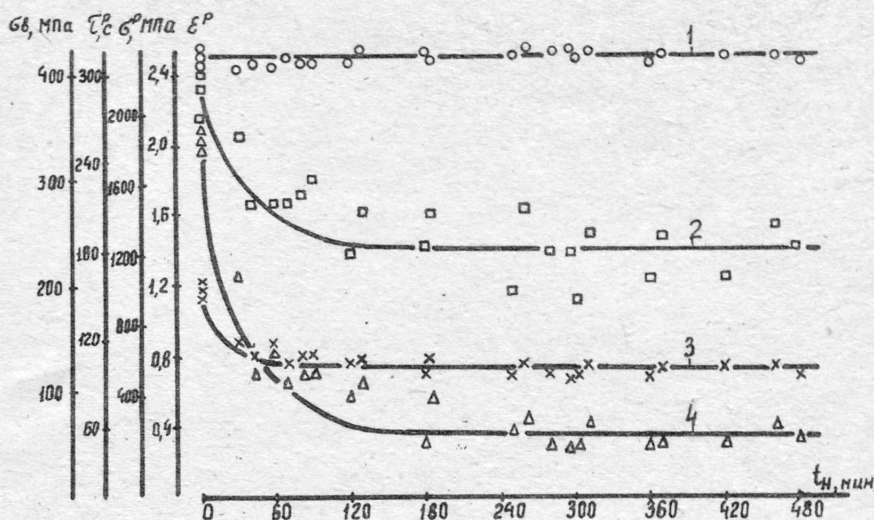


Рис.1. Зависимости предела временного сопротивления (1), времени до разрушения (2), разрывной прочности (3) и пластичности (4) от времени наводороживания (t_H).

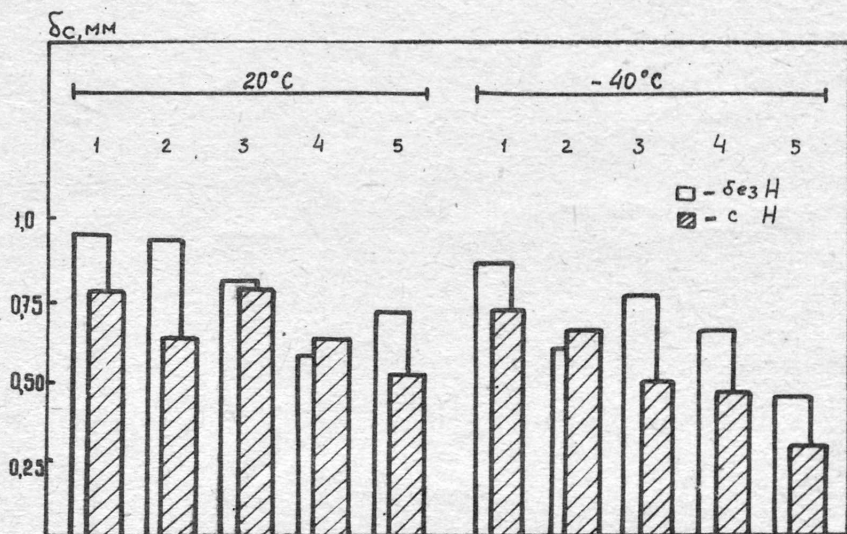


Рис.3. Значения критического раскрытия трещины: 1. - основной металл; 2 - металл шва, сварка под слоем флюса; 3 - в среде CCl_2 ; 4 - электродами АНО-4; 5 - электродами УОНИ-13/45.

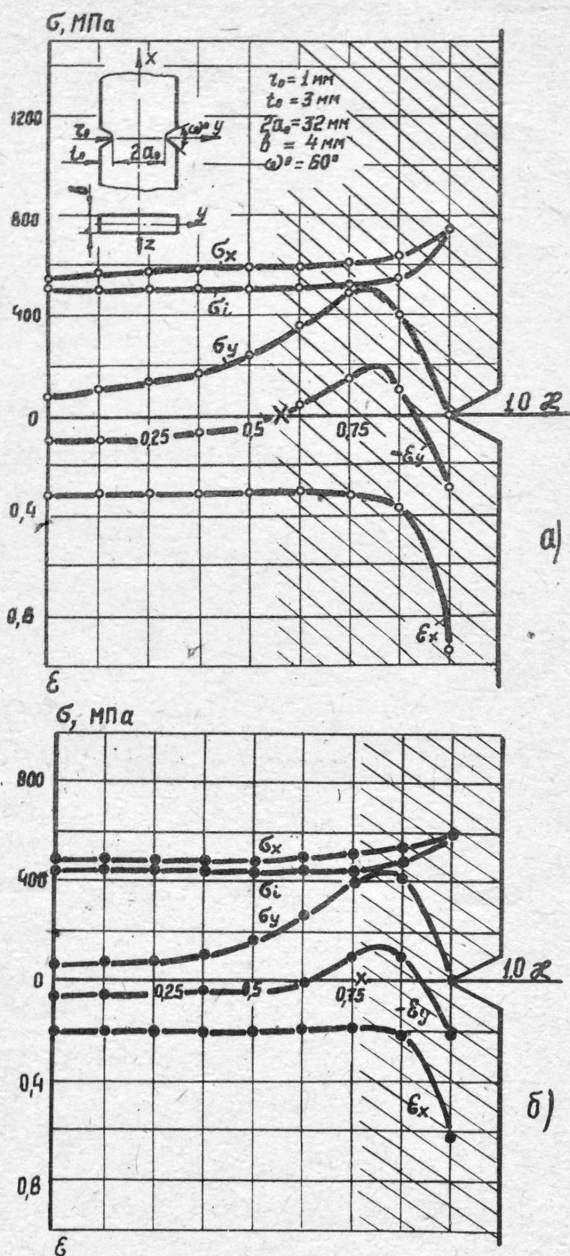


Рис.2. Эпюры напряжений и деформаций ненаводороженного (а) и наводороженного (б) плоского образца в момент разрушения.

М В Т У
им. Н. Э. Баумана
ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ
БИБЛИОТЕКА

ЛЕ 01660. Подписано к печати 5.04.79 г.
Объем 1 п.л. Заказ 117. Тираж 100 экз.

Отпечатано на роталпринте ЭНИКМАШ
Воронеж, 1979