

М388858

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
СССР

Московское ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена
Трудового Красного Знамени высшее техническое училище
имени Н.Э.Баумана

На правах рукописи

СУВОРИН Владимир Яковлевич

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ И ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ВОДОРОДА
НА ПЛАСТИЧНОСТЬ, ПРОЧНОСТЬ И ХРУПКОЕ РАЗРУШЕ-
НИЕ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ И
НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ (ПРИМЕНИТЕЛЬНО К
УСЛОВИЯМ ЭКСПЛУАТАЦИИ)

Специальность 05.04.05 - Технология и машины
сварочного производства

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
СССР

Московское ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена
Трудового Красного Знамени высшее техническое училище
имени Н.Э.Баумана

На правах рукописи

СУВОРИН Владимир Яковлевич

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ И ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ВОДОРОДА
НА ПЛАСТИЧНОСТЬ, ПРОЧНОСТЬ И ХРУПКОЕ РАЗРУШЕ-
НИЕ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ И
НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ (ПРИМЕНИТЕЛЬНО К
УСЛОВИЯМ ЭКСПЛУАТАЦИИ)

Специальность 05.04.05 - Технология и машины
сварочного производства

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук.

Москва

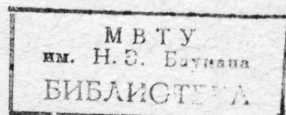
1981

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1388858

Суворин В.я. Методы оценки



Работа выполнена в Воронежском филиале ВНИИАвтогенмаш (ПО "Автоген-маш") и Воронежском политехническом институте.

Официальные оппоненты: д.т.н., проф. Стеклов О.И.
д.т.н., проф. Петров Г.Л.
д.т.н., проф. Гасидуллин Р.Ч.
д. т. н., проф. Шур Д. М.

Ведущее предприятие - ВНИИСТ

Защита диссертации состоится "_____" _____ 1981 года
на заседании специализированного Совета по технологии и машинам
сварочного производства (шифр Д 053.15.07) при МВТУ им.Н.Э.Баумана

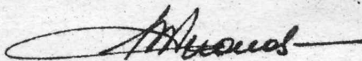
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МВТУ имени
Н.Э.Баумана

Ваши отзывы (в двух экземплярах, заверенные печатью) просим
присылать по адресу; 107005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5 МВТУ
имени Н.Э.Баумана, Ученому секретарю.

Автореферат разослан "_____" _____ 1981 года.

Ученый секретарь
специализированного Совета
доктор технических наук

Э.А.ГЛАДКОВ



Л - 86446 от 21.07.1981 г.

Тип. МВТУ,

зак. 1076

тир. 105

Объем 2 п.л.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Сварные конструкции из сталей часто эксплуатируются в естественных и технологических наводороживающих средах. Экономически целесообразно такие конструкции изготавливать из низкоуглеродистых и низколегированных сталей сваркой плавлением. Однако под влиянием водорода свойства сварных соединений существенно ухудшаются.

Актуальность проблемы. Сварные нефте- и газопроводы, оборудование газо- и нефтедобывающей промышленности и другое подвержены разнородным по характеру, месту и времени разрушениям, вызванным изменениями в металле под влиянием водорода, что приводит к значительным производственным и экономическим потерям. Это свидетельствует о несовершенстве существующих методов оценки работоспособности конструкций и их расчетов для данных условий эксплуатации.

С ростом объема применения сварных конструкций, работающих в наводороживающих средах, разработка методов оценки и мероприятий повышения их работоспособности является актуальной задачей.

Цель работы. Разработка научных основ повышения стойкости сварных соединений низкоуглеродистых и низколегированных сталей против водородной хрупкости при статических нагрузках, которые включают: а) исследование основных закономерностей поведения и влияния водорода на пластичность, прочность и склонность к водородной хрупкости сварных соединений; б) выбор и обоснование методов качественной и количественной оценки работоспособности сварных соединений, а также технологических и конструкторских мероприятий повышения их стойкости в присутствии водорода.

Малоизученными являются формы влияния водорода в сочетании со сварочными охрупчивающими факторами (подкалкой, ростом зерна, накопленной пластической деформацией, деформационным старением, анизотропией проката и др.) и с особенностями различных технологических сварочных процессов; отсутствуют методы качественной и количественной оценки работоспособности сварных соединений.

Методы исследования включают в себя общепринятые механические испытания цилиндрических и плоских мало- и крупномасштабных образцов с искусственными трещинами и надрезами, квазистатическим растяжением при нормальных и отрицательных температурах; измерение твердости, металлографический анализ, осциллографирование термических циклов, измерение плотности сталей гидростатическим взвешиванием и др. и разработанные автором методики исследования:

растворимости, проницаемости и микроскопического исследования проницаемости водорода в сталях с применением фото- и киностемки; влияния анизотропии проката, чувствительности сталей к концентрации напряжений.

Разработанная и предложенная автором методика электролитического наводороживания (до закритических содержаний) сталей достоверно имитирует учет влияния естественных и технологических наводороживающих сред.

Исследования влияния водорода проводились на основе следующих критериев: средних деформаций и напряжений при разрушении, эффективной пластичности (при $[H] > [H]_{кр}$ $\epsilon_{i,[H]}$ -реакция стали на присутствие водорода), коэффициента вязкости разрушения, критического раскрытия трещины и др., а также предложенных автором критериев водородного охрупчивания сталей при сложном напряженном состоянии.

Для теоретического анализа использован подход к изучению стадий макроразрушения металла с позиций математического аппарата, списывающего упруго-пластическое тело как сплошную среду, базирующийся на гипотезе о единой кривой пластического деформирования.

При обработке результатов исследования использовались методы математической статистики, расчеты выполнялись на ЭВМ.

Научная ценность работы состоит в разработке нового направления оценки и повышения работоспособности сварных соединений низкоуглеродистых и низколегированных сталей, эксплуатируемых в наводороживающих средах при температурах $-60...40^{\circ}\text{C}$ и статических нагрузках, основанного: а) на том, что при концентрациях водорода выше критической физико-механические свойства сварных соединений квазипостоянны (см. ниже); б) на учете влияния сварочных и технологических охрупчивающих металл факторов и способов сварки металлов плавлением; в) на развитых в диссертации методах оценки несущей способности сварных соединений.

Это научное направление базируется на следующих основных результатах:

- установлена взаимосвязь между неоднородностями растворимости и проницаемости водорода и неоднородностями физико-механических свойств сварных соединений в присутствии водорода;

- введено понятие критической концентрации водорода в металле, сущность которого состоит в том, что при увеличении содержания водорода в металле его физико-механические свойства зависят от концентрации лишь до определенного предела (для Ст. 3

$[H]_{кр} = 50...80 \text{ см}^3/\text{кг}$) - "критической концентрации", выше

которой механические свойства металла квазипостоянны, то есть не зависят от растворимости и проницаемости водорода, а испытания металлов становятся сопоставимыми и экстремальными, соответствующими условиям эксплуатации; обоснован обобщенный характер "критической концентрации" для всех параметров физико-механических свойств сварных соединений; показана доминирующая роль водорода, как охрупчивающего фактора по сравнению с накопленной пластической деформацией и деформационным старением; разработаны расчетные методы сравнительной оценки и выбора сталей для наводороживающих сред;

- получены температурные зависимости пластичности, прочности, вязкости разрушения, критического раскрытия трещины (с учетом анизотропии проката), чувствительности к концентрации напряжений металла различных зон сварного соединения и металла в различных состояниях, позволяющие оценивать пластичность, прочность и склонность к хрупкому разрушению сварных соединений, выполненных обычными способами сварки плавлением;

- подтвержден принцип суперпозиции (аддитивного суммирования) при влиянии нескольких отрицательных факторов (например, накопленной пластической деформации и водорода);

- обоснована роль высокого отпуска при оптимальной температуре, как необходимой технологической операции при изготовлении сварных конструкций, эффективность которой повышается предварительной частичной (только кромок) или полной закалкой свариваемого материала от субкритических температур $680...700^{\circ}\text{C}$.

Обоснован общий методологический подход исследования влияния водорода, в основе которого лежат следующие экспериментальные и практические данные: а) разрушение стальной сварной конструкции из-за водородного охрупчивания наступает значительно раньше (по времени), чем из-за коррозии; б) существует некоторая "критическая концентрация" водорода в металле; при закритических концентрациях водорода физико-механические свойства металла квазипостоянны, то есть не зависят от концентрации; в) в сварном соединении всегда имеются концентраторы напряжений, которые могут явиться очагами разрушения; г) в условиях эксплуатации насыщение металла водородом достигает закритических концентраций.

Практическая ценность. Разработаны методики исследования растворимости, проницаемости, микроскопических исследований проницаемости водорода, достоверной имитации наводороживающих сред; расчета низкотемпературной термодиффузии водорода; оценки влияния

анизотропии проката; экспрессного определения участка сварного соединения, наиболее склонного к водородной хрупкости, по измерениям твердости; обоснована методика оценки чувствительности наводороженных сталей к концентрации напряжений по результатам испытания цилиндрических образцов.

Практическую ценность имеет обоснование требований к кривой пластического деформирования металла участка сварного соединения, наиболее склонного к водородной хрупкости; нормирование способов сварки плавлением по наибольшей устойчивости металла шва против водородной хрупкости; обоснование роли высокого отпуска при оптимальной температуре как необходимой технологической операции при изготовлении стальных сварных конструкций и повышения его эффективности предварительной закалкой свариваемого материала от субкритических температур 680-700°C.

Комплексные исследования влияния водорода на свойства сталей позволили обосновать и сформулировать конструкторские и технологические мероприятия повышения стойкости сварных соединений в присутствии водорода.

Результаты работы нашли практическое применение при совершенствовании технологического процесса изготовления сварных узлов на ряде предприятий.

Апробация работы. Отдельные разделы работы докладывались в 1968-1978 г.г. на всесоюзных конференциях, семинарах и совещаниях. В целом работа обсуждалась в 1977-78 г.г. на научном семинаре кафедры "Машины и автоматизация процессов сварки" МГУ им. Баумана, семинаре кафедры сварки ЛПИ им. Калинина, научно-технических советах ВНИМАВТОГЕНМАШа и др.

Основные материалы опубликованы в тридцати семи статьях.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и общих выводов, изложена на 282 страницах машинописного текста, содержит 127 рисунков, 26 таблиц и 319 наименований использованных литературных источников.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава I Физико-химическое взаимодействие и влияние водорода на механические свойства сталей. Постановка задачи исследований. Влияние водорода, проникающего в металлы при сварке, на технологическую прочность сварных соединений рассмотрено в работах Г.Л. Петрова, Р.А. Козлова, А.М. Макары, О.И. Стеклова, Е. Herzog и др.

Однако, влияние водорода, проникающего в металл при его взаимодействии с естественными и технологическими средами, на работо-

способность сварных соединений низкоуглеродистых и низколегированных сталей в условиях эксплуатации изучено недостаточно. В главе I на основе работ общеметаллургического характера, посвященных поведению и влиянию водорода на физико-механические свойства сталей, обоснована важность научного направления решения задач повышения стойкости сварных соединений сталей против водородной хрупкости.

В условиях эксплуатации водородная хрупкость сталей определяется рядом факторов, обуславливающих химическое и электрохимическое взаимодействие металла со средой и поведение водорода в металле.

Вопросы термодинамики взаимодействия металла с различными наводороживающими средами рассмотрены в работах С.М.Белоглазова, Ю.И.Арчакова и др. Исследования закономерностей насыщения сталей водородом посвящены работы Г.В.Карпенко, С.М.Белоглазова, А.В.Шрейдера, В.И.Кудрявцева, E. Herzog и др.

Охрупчивание высокопрочных сталей происходит уже в газообразном водороде, активность которого возрастает под воздействием различного рода облучения. В жидких средах наводороживание стали происходит при различных процессах гальванотехники (обезжиривании, травлении, цинковании, кадмировании, никелировании и др.), а также катодной защите, механической обработке. Наличие в жидких средах малых количеств примесей соединений ряда элементов у и UI групп Периодической системы (P, As, Sb, Bi, S, Se, Te, а также Hg, CN⁻ и др.) интенсифицирует процесс, наводороживание происходит без наложения потенциала. Активность процесса выше в кислых средах и ниже в щелочных.

В газообразных средах насыщение сталей водородом происходит при атмосферной коррозии (в воздушных промышленных бассейнах, содержащих SO_2 , H_2S).

Нефть и природный газ большинства месторождений СССР, содержащие примеси H_2S (до 10...15%), CO_2 и влагу, являются активными наводороживающими средами. Добыча нефти и газа в стране непрерывно возрастает.

Таким образом, имеется значительное многообразие сред, при взаимодействии с которыми металлы стальной конструкции наводороживаются.

Влияние химического состава, упруго-пластического и структурного состояния на свойства сталей рассмотрено в работах Ю.А.Клячко, И.В.Попова, В.И.Ткачева, П.Бастьена, R. Lagneborg и др.

Результаты исследования влияния упруго-пластического состояния противоречивы, это объясняется многообразием материалов, сред и условий нагружения.

В.И.Ткачевым на стали 20 однозначно показано, что в упругой области проницаемость и растворимость водорода прямо пропорциональны приложенному напряжению, а в пластической - обратно пропорциональны; увеличение или уменьшение проницаемости связано с увеличением или уменьшением растворимости, поскольку коэффициент диффузии не зависит от приложенного напряжения (R. Lagneborg).

Химический состав сталей оказывает меньшее влияние, чем их структурное состояние. В перлитных сталях границы раздела феррит-цементит являются ловушками для водорода, увеличение их протяженности приводит к увеличению растворимости и уменьшению коэффициента диффузии водорода; скорость проникновения водорода в металл обратно пропорциональна твердости и определяется в основном величиной напряжений в α -фазе.

Отрицательное влияние водорода на свойства сталей впервые было обнаружено L. Pfeil; в наибольшей степени оно проявляется в снижении пластичности (особенно ψ) при малой скорости деформирования (< 4 мм/мин.) и температурах $-100...40^\circ\text{C}$ уже при концентрациях $20...30$ см³/кг. В наибольшей степени водородной хрупкости подвержены мартенситные структуры, в меньшей - феррито-перлитные и достаточно устойчивы - аустенитные. Предпочтительны термодинамически устойчивые структуры сталей.

Исследовалось влияние водорода на сопротивляемость стали пластическому деформированию вплоть до разрушения. Исследования по влиянию водорода на пределы прочности и текучести противоречивы. У низкоуглеродистых сталей влияние водорода не обнаруживается вплоть до предела прочности; у высокопрочных - предел прочности существенно снижается. П.Бастьен пришел к выводу, что кривые пластического деформирования ненаводороженного и наводороженного металла совпадают.

Гипотезы водородной хрупкости многочисленны, но все они объединяются в следующие теории: внутреннего давления молекулярного водорода в коллекторах (C. Zarfje, П.Бастьен), согласно которой охрупчивание стали водородом наступает при его некотором критическом давлении в коллекторах; адсорбционная (Н.Петч, Я.М.Потак) - адсорбируясь на поверхностях (сдвига, трещин и др.) водород понижает поверхностную свободную энергию (эффект Ребиндера) и ослабляет межатомные связи; трехосных напряжений (A. Troiano) - водород

диффундирует в места трехосных напряжений, где возникает трещина; давление водорода в коллекторах также оказывает влияние через зоны трехосных напряжений, возникающих вокруг них. Она уточнена в работах Г.В. Карпенко, Р.И. Крипьякевича; дислокационная (К.В. Попов, Г.В. Карпенко) - объясняет влияние водорода с привлечением теории деформационного старения, разработанной А.Х. Коттреллом. Взаимодействуя с дислокациями, водород создает водородные "облака Коттрелла", препятствующие перемещению дислокаций. При больших скоростях деформирования водород отрывается от дислокаций ввиду малой скорости диффузии. Она хорошо объясняет температурно-скоростную зависимость влияния водорода; общий механизм - включает в себя элементы теории внутреннего давления, адсорбционной и дислокационной (К.В. Попов). Каждая из теорий водородной хрупкости имеет свои недостатки, не объясняя отдельные эффекты влияния водорода на свойства сталей. В их совершенствование внесли определенный вклад советские ученые Г.В. Карпенко, Б.А. Колачев, К.В. Попов и др.

В главе I сделан обзор некоторых характерных случаев разрушения сварных конструкций из низкоуглеродистых и низколегированных сталей при эксплуатации в наводороживающих средах. Показано, что, как правило, ответственными за их разрушение являются сварные соединения; основными охрупчивающими сварочными факторами являются: подкалка металла, рост зерна, накопленная пластическая деформация, деформационное старение, анизотропия и др.

Анализ исследований ряда авторов показывает, что разрушение конструкций из-за водородного охрупчивания наступает раньше (по времени), чем из-за коррозии (отсутствие симбатности), поэтому правомерно исследование влияния водорода независимо от коррозии. На основе анализа литературных данных сформулированы задачи исследований, которые решаются в последующих главах.

Глава 2. Особенности поведения водорода к сварным соединениям сталей. Анализ состояния вопроса по физико-химическому взаимодействию водорода со сталью и его поведения в ней позволил обосновать необходимость изучения следующих аспектов этой проблемы:

- растворимости и проницаемости водорода в сварных соединениях сталей с учетом их специфического строения и сопутствующих технологических операций - отжига и высокого отпуска; микроскопических исследований проницаемости водорода в сварных соединениях сталей и сталях в различных состояниях (электрошлаковый переплав,ковка, прокатка, пластическая деформация, рост зерна, чистота металла, плотности дислокаций и др.);

- имитационной методики насыщения стальных образцов водородом для механических испытаний; характер возникающих в металле при наводороживании микронесплошностей (обратимые и необратимые) и их влияние на пластичность сталей в различных состояниях;

- модели влияния водорода; концентрационной зависимости от водорода различных механических характеристик сталей.

В основе оригинальных методик исследования растворимости, проницаемости и микроскопических исследований проницаемости водорода в сварных соединениях лежит метод катодного насыщения сталей водородом (аналог диффузионно-подвижного водорода). Картина пузырьков выделившегося из металла водорода под слоем вязкой жидкости (глицерин) фиксировалась во времени фотографированием. Рассчитывался объем выделившегося водорода на единицу площади. Кроме того, диффузионный водород в образцах определялся в эвдиометрах, а остаточный - анодным растворением.

Исследовались сварные соединения сталей Ст.3, Ю, ЗОХГСА, кремнистого железа и стали Ст.3, 09Г2С, 17ГС и другие после различной технологической обработки.

Установлено, что физико-металлургическое и термо-пластическое воздействие сварки на металл оказывает решающее влияние на растворимость и проницаемость водорода в различных зонах сварного соединения. Так, растворимость водорода в металле шва на сталях Ю и Ст.3 ниже, чем в основном; она максимальна в металле участка ЗТВ, нагревавшегося в интервале температур 350...450⁰С, и минимальна в металле участка термомодеформационного старения ($T_H = 150...300^0$ С). В металле шва и околошовной зоны стали ЗОХГСА (структуры закалки) растворимость в 15...20 раз выше, чем в основном. Проницаемость водорода в сварных швах на сталях Ю и Ст.3 выше, чем в металле ЗТВ и основном. Это указывает на наличие значительного количества субмикродофектов в металле шва, возникающих при неравновесной кристаллизации. Для стали Ст.3 получено соотношение $D_{ом} : D_{зтв} : D_{ш} = 1,0 : 0,53 : 4,0$, общая проницаемость в соединениях в состоянии после сварки в 3...6 раз выше, чем в состоянии после высокого отпуска, что можно объяснить наличием остаточных напряжений в первых. Наличие закалочных структур (сталь ЗОХГСА) приводит к существенному понижению проницаемости в этих зонах. Выраженная неоднородность проницаемости выявлена в сварном шве на кремнистом железе. Она минимальна на оси шва (наиболее загрязненный участок вследствие ликвации Si) и максимальна на расстоянии 0,25...0,3 ширины шва от линии сплавления (участок

столбчатых кристаллов). Изменение режима сварки приводило к изменению объемов поглощенного или прошедшего водорода и ширины отдельных участков, не меняя принципиально основных закономерностей. Обнаружена также неоднородность проницаемости, обусловленная химической и структурной неоднородностью по отдельным сварным швам в многослойных швах (сталь Ст.3).

Показано также, что обработка, приводящая к охрупчиванию металла (пластическая деформация, деформационное старение), уменьшает растворимость диффузионного водорода в металле. Высокий отпуск повышает растворимость водорода. Однако, на содержание остаточного водорода высокий отпуск оказывал неоднозначное влияние: повышал содержание водорода в деформационно-состаренном металле и понижал в деформированном. Это свидетельствует о различных формах связи водорода в деформированном и деформационно-состаренном металле (сталь 09Г2С).

Микроскопические исследования проницаемости водорода выполнялись по оригинальной методике при увеличении в 1000...1340 раз на образцах типа диафрагм с выявленной структурой на наблюдаемой поверхности. Изучалась топография выделения водорода. Критериями оценки также служили: число мест диффузии (N_d) - число "активных центров" (места выделения), подвижность (T_p) - время проникновения и активность источников.

Установлено, что неоднозначно влияние пластической деформации стали Ю на N_d и T_p , существует оптимальная величина деформации ($\sim 14...15\%$), при которой T_p - минимально (3 мин.), а N_d - максимальна (64), увеличение зерна стали Ю (11...75 мкм) приводило к однозначному уменьшению N_d (от 18 до 2) и уменьшению T_p (от 10 до 2 мин.). Проницаемость водорода в ЭШП металле (стали Ст.3, 4Х2В5РМ, 16ГНМФ и др.) значительно ниже, чем в металле обычной плавки; это объясняется повышенной чистотой металла (меньшим количеством шлаковых включений, более чистыми границами зерен) и значительно меньшим количеством субмикрордефектов (скоплений, вакансий, дислокаций, различного рода рыхлот, субмикронадрывов и т.д.). Анизотропия свойств металла (стали Ст.3, 16ГНМА), возникающая при прокатке, хорошо выявляется по реакции на проницаемость водорода, последняя выше в направлении прокатки. Количество путей диффузии водорода (N_d) находится в линейной зависимости от суммарной поверхности внутренних границ, а интенсивность диффузии T_p - от состояния этих границ; интенсивность выделения водорода по границам крупных структурных составляющих (зерен,

включений, карбидов) выше, чем мелких.

Наблюдались процессы, при которых пузырьки периодически изменяли свои размеры, а иногда уменьшались до полного "исчезновения". Некоторые из них отрывались от места выделения, перемещаясь в сторону, закреплялись на новых местах, уменьшались, и также исчезали.

Это подтверждает существование динамического равновесия молекулярного водорода в пузырьке и растворенного в матрице, вследствие высокой электрохимической активности водорода в пузырьке и каталитическим действиям ювенильной поверхности металла.

Установлена четкая зависимость (повышение) подвижности водорода от загрязненности металла (ЭШП сталей Ст.3, 4Х2В5ФМ под флюсами АНФ-6 и АН-8).

Показана возможность протекания низкотемпературной термодиффузии водорода в неравномерно нагретом металле, поскольку термодиффузионная константа при понижении температуры от 1500 до 0°C увеличивается на три порядка.

Для имитации эксплуатационных сред отработан режим насыщения образцов водородом: электролит - 5%-ный раствор х.ч. H_2SO_4 с добавкой 0,5 г/л $Na_2S_2O_3$ - стимулятор наводороживания; ток 100 А/м²; время - 4 ч.; температура электролита - 22...25°C.

Процессы образования коллекторов в металле под влиянием водорода изучались по изменению его плотности при наводороживании и вылеживании (до 300 ч.), измерение плотности производилось гидростатическим взвешиванием.

Показано, что при наводороживании в металле возникают микронесплошности двух типов: во-первых, обратимые дефекты, создающие в металле, по-видимому, упругие искажения, после удаления диффузионного водорода они исчезают; во-вторых, необратимые дефекты, создающие в металле, очевидно, значительные пластические деформации, после удаления диффузионного водорода они остаются.

В "пластичных" сталях (состояние поставки (ОМ) и после высокого отпуска (ВО) в значительной степени развиваются дефекты обоих типов, а в "хрупких" сталях (после пластической деформации (Д) и деформационного старения (ДС) преимущественно - дефекты второго типа. Установлено также, что пластичность стали 09Г2С в состояниях ОМ, ДС+ВО и Д+ВО в процессе вылеживания (72 ч.) полностью не восстанавливается, а в состояниях после ДС и Д практически полностью восстанавливается. То есть пластичность стали не восстанавливается в тех случаях, когда развиваются дефекты первого типа - обратимые дефекты.

Один из вероятных механизмов этого явления следующий. Вокруг несплошностей первого типа в зонах упругих искажений кристаллической решетки генерируются свежие единичные дислокации, то есть имеет место наклеп металла. В этих зонах протекают процессы динамического деформационного старения, обусловленные взаимодействием углерода и азота со свежими дислокациями.

Обнаружена взаимосвязь между неоднородностями растворимости и проницаемости и неоднородностями физико-механических свойств сварных соединений.

Итогом исследований, выполненных в главах I и 2, стало обоснование и введение понятия "критической концентрации" водорода в стали и новой модели влияния водорода на свойства стали. Существует некоторая концентрация водорода в металле, назовем ее "критической", превышение которой практически не приводит к дальнейшему существенному снижению прочности и пластичности (при $\sigma \leq 900 \dots 1000 \text{ МН/м}^2$). Подобное влияние водорода можно объяснить достижением насыщения водородом внутренних поверхностей.

Показано: а) при закритических концентрациях водорода свойства металла - "квазипостоянные" (рис. I, 2); б) в большинстве эксплуатационных сред создаются закритические концентрации водорода в металле, поэтому имитационная методика насыщения металла водородом может вполне заменить естественные и технологические среды.

На основании наших и литературных экспериментальных данных сформулирована макроскопическая модель влияния водорода.

I. Водород располагается и диффундирует в металле преимущественно на "внутренних поверхностях" - границах зерен, фрагментов, блоков, структурных составляющих, примесей и других дефектов кристаллического строения.

2. При пластическом деформировании ненаводороженного железа изменяется его тонкая структура. Происходит дробление кристаллитов на фрагменты - слабо деформированные участки металла с малой плотностью дислокаций. Одновременно образуются новые границы - "внутренние поверхности", с высокой плотностью дислокаций, которые располагаются в виде сложных, плотных сплетений. На поздних стадиях деформирования в местах наибольшей плотности дислокаций образуются субмикроскопические и микроскопические трещины. В наводороженном металле соответствующие стадии наступают существенно раньше, чем в ненаводороженном, вследствие водородного наклепа и образования избыточных дислокаций под влиянием водорода, как поверхностно-активного вещества. На поздних стадиях деформи-

рования металла водород препятствует скольжению дислокаций.

3. При активном смещении равновесия в системе "водород-металл" пластическим деформированием водород будет перераспределяться; степень влияния водорода на физико-механические свойства стали будет определяться двумя конкурирующими факторами - скоростью адсорбции "внутренними поверхностями" (возрастает с понижением температуры) и скоростью доставки водорода диффузией по этим поверхностям (убывает с понижением температуры).

4. На ранних стадиях деформирования металла может проявляться пластифицирующее действие водорода, который способствует перестройке межатомных связей и интенсивному генерированию дислокаций.

Практические и экспериментальные данные свидетельствуют о том, что при совместном протекании коррозии и наводороживания в начале эксплуатации сварной конструкции имеет место опасность ее разрушения от водородного охрупчивания, особенно при наличии концентраторов напряжений; в условиях эксплуатации концентрация водорода в металле может быть более 80...100 см³/кг. Это позволило в рамках понятия о "критической концентрации" водорода обосновать общий методологический подход исследования влияния водорода на свойства сварных соединений низкоуглеродистых и низколегированных сталей, выполненных сваркой плавлением (см. стр. 5).

Глава 3. Влияние водорода на прочность и пластичность сталей.

При изучении стадии макроразрушения наводороженных сталей использован математический аппарат, описывающий механику упруго-пластического тела как сплошную среду.

Исследовано влияние водорода на свойства кривой пластического деформирования сталей (Ст. 3, 09Г2С, Г7ГС, 30ХГСА и др.) в различных состояниях технологической обработки.

В рамках единой (энергетической) теории Я.Б. Фридмана выполнен теоретический анализ влияния водорода на предельные расчетные состояния (по несущей способности) и пластичность сталей в условиях плоского напряженного состояния. При этом предполагалось, что материал изотропен, нагружение простое и кривая пластического деформирования едина. Проведена экспериментальная проверка аналитических зависимостей.

Математическая обработка экспериментальных данных методом наименьших квадратов позволила для кривой пластического деформирования принять на участке нелинейного упрочнения степенную аппроксимацию $\sigma_i = \sigma_m (\varepsilon_i/m)^m$, при $\varepsilon_i \leq 2m$ и на участке линейного упрочнения - линейную $\sigma_i = \sigma_m \cdot 2^{m-1} (2 + \varepsilon_i - 2m)$, при $\varepsilon_i \geq 2m$. Где σ_m -

истинное напряжение при максимальной нагрузке; m - показатель степени упрочнения; ϵ_i - эффективная пластичность (ϵ_i^p - ее предельное значение).

Установлено, что водород незначительно снижает напряжение σ_m (на 1,5...2,5%), существенно уменьшает пластичность ϵ_i^p (в 1,6...12 раз и более) и, как правило, уменьшает показатель степени упрочнения m (до 45%), то есть охрупчивает металл. Снижение пластичности ϵ_i^p в присутствии водорода наиболее значительно у сталей, подвергшихся предварительной пластической деформации, деформационному старению и закалке (в 8...12 раз и более).

Показано, что водород уменьшает предельную пластичность на порядок больше, чем такие охрупчивающие сварочные факторы, как накопленная пластическая деформация, деформационное старение, рост зерна и др., которые достаточно часто являются ответственными за хрупкое разрушение сварных соединений низкоуглеродистых и низколегированных сталей.

Кривые пластического деформирования ненаводороженного и наводороженного металла не совпадают (до 15% по σ_i), однако с достаточной для практических целей степенью точности можно принять, что они совпадают.

Мы предлагаем эффективную пластичность $\epsilon_{i,[H]}^p$ использовать в качестве критерия предварительной сравнительной оценки реакции (чувствительности) сталей на присутствие в них водорода. В ряде случаев такая оценка является достаточной.

Эти экспериментальные исследования могут найти практическое применение при разработке деформационных критериев механики разрушения для оценки влияния водорода на прочность сварных соединений.

Анализ влияния водорода на расчетные предельные состояния показывает, что каждому напряженному состоянию соответствует некоторая минимальная эффективная пластичность, которая обеспечивает разрушение конструкции в упругой области (обозначим ее $\epsilon_{i,t}^{kp}$) или в зоне устойчивого пластического течения ($\epsilon_{i,\beta}^{kp}$). Для определения ϵ_i^{kp} получены аналитические выражения, справедливые при $\epsilon_i^{kp} \leq \epsilon_{i,\beta}^{kp}$

$$\epsilon_i^{kp} = m \cdot [1/\beta \cdot \sigma_i/\sigma_m]^{1/m}, \text{ при } \sigma_i/\sigma_m \leq \beta \cdot 2^m \quad (1)$$

$$\epsilon_i^{kp} = 1/\beta \cdot \sigma_i/\sigma_m \cdot 2^{1-m} - 2 + 2m, \text{ при } \sigma_i/\sigma_m \geq \beta \cdot 2^m \quad (2)$$

Очевидно, что величина критической деформации $\epsilon_{i,t}^{kp}$ может служить критерием сравнительной оценки перехода материала из области пластического разрушения в область упругого (при $\epsilon_{i,[H]}^{kp} < \epsilon_{i,t}^{kp}$)

или потери устойчивости его пластического течения (при $\epsilon_{i,[n]}^p > \epsilon_{i,\delta}^{kp}$)

Для оценки влияния водорода на величину расчетного предельного состояния (по несущей способности) были получены следующие аналитические уравнения (справедливые при $\epsilon_i^p < \epsilon_{i,\delta}^{kp}$):

$$\sigma_{np} = \frac{\beta \cdot (1+m) \cdot (\epsilon_i^p/m)^m}{1 + \epsilon_i^p \cdot \beta^{1/m}} \cdot \sigma_{\delta}, \text{ при } \epsilon_i^p \leq 2m \quad (3)$$

$$\sigma_{np} = \frac{\beta(1+m) \cdot 2^{m-1} (2 + \epsilon_i^p - 2m)}{1 + m[\beta \cdot 2^{m-1} (2 + \epsilon_i^p - 2m)]^{1/m}} \cdot \sigma_{\delta}, \text{ при } \epsilon_i^p \geq 2m \quad (4)$$

При $\epsilon_{i,\tau}^{kp} < \epsilon_i^p < \epsilon_{i,\delta}^{kp}$ уравнения используются для оценки влияния водорода на предел прочности, а при $\epsilon_{i,\tau}^{kp} < \epsilon_i^p < \epsilon_{i,\delta}^{kp}$ — на предел текучести.

При $\epsilon_i^p = \epsilon_{i,\delta}^{kp}$ имеем $\sigma_{np} = \sigma_{\delta}$, при $\epsilon_i^p \leq \epsilon_{i,\delta}^{kp}$ имеем $\sigma_{np} \leq \sigma_{\delta}$, а также при $\epsilon_i^p = \epsilon_{i,\tau}^{kp}$ имеем $\sigma_{np} = \sigma_{\tau}$ и при $\epsilon_i^p \leq \epsilon_{i,\tau}^{kp}$ — $\sigma_{np} \leq \sigma_{\tau}$.

В уравнениях (1) — (7) α и β — параметры, характеризующие жесткость схемы напряженного (По С.А. Куркину), равные:

$$\beta = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{(1 - \sigma_2/\sigma_1)^2 + (\sigma_2/\sigma_1 - \sigma_3/\sigma_1)^2 + (1 - \sigma_3/\sigma_1)^2}$$

$$\alpha = \frac{2/3 \cdot \beta}{1 + m(1 - m(\sigma_1/\sigma_2 + \sigma_3/\sigma_1))}$$

где: $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ — напряжения от внешней нагрузки.

Экспериментальная проверка уравнений (3) и (4) проводилась на сварных цилиндрических образцах с мягкой прослойкой. Напряженное состояние мягкой прослойки на оси образца определялось на основе анализа О.А. Бакши и Л.М. Качалова. Получено, что для мягких прослоек при $X^* > 0,1$ имеет место удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных величин напряжений разрушения наводороженных образцов. Формулы (3) и (4) требуют дальнейшей экспериментальной проверки, однако уже теперь они могут быть использованы для сравнительной оценки влияния водорода на расчетные предельные состояния конструкций из различных материалов.

Для определения предельной пластичности в условиях плоского напряженного состояния нами получены аналитические выражения (при $\sigma_2/\sigma_1 \geq 0$; $\sigma_3/\sigma_1 \geq 0$):

$$\epsilon_i^p = \frac{1}{\alpha} \ln(\beta^{1/m} \cdot \epsilon_i^p - 1) \quad , \text{ при } \epsilon_i^p < 2m \quad (5)$$

$$\epsilon_i^p = \frac{1}{\alpha} \ln \left\{ 1 + 2m[\beta(1-m + \frac{1}{2}\epsilon_i^p)]^{1/m} \right\}, \quad (6)$$

$$\epsilon_i^p = \frac{1}{\alpha} \ln [2m - 1 + \beta(2 - 2m + \epsilon_i^p)], \quad (7)$$

при $\epsilon_i^p > 2(1/\beta - 1 + m)$

Сравнение предельной пластичности, рассчитанной по эмпирической формуле А.А.Лабутина и др., полученной путем обработки экспериментальных данных, показывает, что в условиях плоского напряженного состояния имеет место удовлетворительное совпадение результатов.

Для сталей, ненаводороженных и наводороженных в различных состояниях, были рассчитаны зависимости предельной пластичности (ϵ_1^p) от соотношения компонентов напряжений $\chi_2 = \sigma_2/\sigma_1$, получены ее минимальные значения $\epsilon_1^{\min}$. Надежная эксплуатация конструкции без разрушений возможна, если металл обладает определенным запасом деформационной способности. Деформационное условие прочности можно записать так: $\epsilon_1^{\min} > \epsilon_1^{\text{доп}}$.

На основе анализа производственного опыта случаев разрушения сварных стальных конструкций и сопоставления этих данных с минимальной пластичностью $\epsilon_1^{\min}$ нами была сделана предварительная оценка необходимой деформационной способности $\epsilon_1^{\text{доп}}$, которая оказалась равной 0,14...0,17; в целом сформулированы основные требования к кривой пластического деформирования металла в участке сварного соединения, наиболее склонного к водородной хрупкости, они таковы: предельная пластичность ϵ_1^p должна быть более 0,14...0,17; наводороженные стали, имеющие предельную эффективную пластичность $\epsilon_{i,[n]}^p \geq 0,6$, пригодны для изготовления конструкций при любом показателе степени упрочнения; если $0,28 \leq \epsilon_{i,[n]}^p \leq 0,6$, то показатель степени упрочнения должен быть более 0,15 (при $\epsilon_1^{\min} \geq 0,14$); при $\epsilon_{i,[n]}^p < 0,28$ стали непригодны для изготовления рассматриваемых изделий.

Анализ зависимостей предельной пластичности ϵ_1^p от отношения $\chi_2 = \sigma_2/\sigma_1$ (при $\chi_3 = \sigma_3/\sigma_1 = 0$) (сталь Ст.3, 09Г2С, 17ГС в различных состояниях) показывает, что накопленная пластическая деформация и деформационное старение повышают вероятность разрушения сварной конструкции в наводороживающей среде ($\epsilon_1^{\min} < \epsilon_1^{\text{доп}}$). Высокий отпуск сталей Ст.3, 09Г2С, 17ГС при температуре 650°C делает их пригодными для эксплуатации в наводороживающей среде ($\epsilon_1^{\min} > \epsilon_1^{\text{доп}}$). Наибольшим запасом пластичности обладают стали 09Г2С и 17ГС.

Энергоемкость металла при разрушении определяли как энергию, отнесенную к единице объема металла, которая выражается площадью под кривой $\sigma_i = g(\epsilon_i)$. Для принятой нами аппроксимации кривой пластического деформирования получены следующие аналитические выражения:

$$W = \sigma_m \int_0^{\epsilon_i} \left(\frac{x}{m} \right) \frac{dx}{1-x}, \quad \text{при } \epsilon_i \leq 2m \quad (8)$$

$$W = \zeta_m \int_0^{2m} \left(\frac{x}{m} \right) \frac{dx}{1-x} + 2^{m-2} \left[(1-2m) \ln \frac{1+\varepsilon_i}{1+2m} + \varepsilon_i - 2m \right], \quad (9)$$

при $\varepsilon_i^p > 2m$

У сталей в состояниях различной технологической обработки водород снижает энергию разрушения в 3...12 раз.

Показана целесообразность использования для предварительной оценки влияния водорода на свойства сталей критерия $J_1 = (\varepsilon_i^p - \varepsilon_{i,[n]}^p) / \varepsilon_i^p$ по снижению предельной максимальной главной деформации под влиянием водорода и критерия $J = (\varepsilon_i^p - \varepsilon_{i,[n]}^p) / \varepsilon_i^p$ по изменению предельной пластичности ε_i^p в главную максимальную деформацию $\varepsilon_{i,[n]}^p$ под влиянием водорода и схемы напряженного состояния. Эти критерии достаточно объективны, поскольку они учитывают свойства кривой пластического деформирования и жесткость схемы напряженного состояния.

Установлено, что температура (режим) высокого отпуска оказывает сильное воздействие на параметры кривой: показатель степени упрочнения металла M , величину истинного напряжения ζ_m и величину эффективной пластичности ε_i^p . В ряде случаев, выбирая наиболее рациональную температуру отпуска, можно создать сварную конструкцию, обладающую достаточной надежностью при эксплуатации в наводороживающей среде в определенном интервале температур.

Аналитический подход, использованный нами в главе 3 является общим и может быть использован для анализа поведения сталей в конструкциях на основе других теорий прочности. Такой подход является приближенным, но позволил получить много результатов интересных в теоретическом и практическом отношении.

Глава 4. Влияние водорода на хрупкое разрушение сварных соединений. В работах В.А.Винокурова, Н.П.Мельникова, Г.В.Жемчужникова, В.С.Гиренко, Л.А.Копельмана, У.Дж.Холла, Х.Кихара, В.Зута установлены основные факторы и исследовано их влияние на хрупкое разрушение сварных соединений. Однако влияние этих факторов на хрупкое разрушение в присутствии водорода изучено недостаточно.

Нами исследовались следующие аспекты водородной хрупкости сварных соединений, влияние: термического цикла сварки (имитировался проходящим током), скорости охлаждения металла при температуре наименьшей устойчивости аустенита и твердости на пластичность и прочность металла различных зон; накопленной пластической деформации и деформационного старения; анизотропии проката; способа сварки, малоциклового усталости и других. Исследования выполнялись в температурном интервале $-60...20^\circ\text{C}$ (рис.3).

Производственный опыт показывает, что при наличии концентраторов напряжений, конструкция может разрушиться не только при переменных, но и статических и повторно-статических нагрузках, поэтому оценка чувствительности материала к концентрации напряжений является необходимой. Для оценки чувствительности сталей в различных состояниях технологической обработки к концентрации напряжений использовано уравнение С.А. Куркина $\frac{1}{\alpha_T} = \frac{\sigma_{0.2}}{2\sqrt{\sigma_1 \cdot \sigma_2 \cdot E}}$ где α_T - теоретический коэффициент концентрации напряжений, E - модуль упругости. Нами показано, что для сталей малой прочности ($\sigma_s \leq 800 \dots 900 \text{ МН/м}^2$) истинное напряжение и истинная деформация могут быть определены при испытании цилиндрических образцов. Объективность метода оценки чувствительности к концентрации напряжений нами производилась на образцах с трещинами.

Термический цикл сварки имитировался путем нагрева проходящим током образцов, имеющих боковые треугольные надрезы, после нагрева в образцах создавались усталостные трещины ($l_{тр} = I \dots I,2 \text{ мм}$). Оценка свойств проводилась на основе средних напряжений при разрушении ($\sigma_{ср.р.}$), относительного уменьшения толщины (η) и коэффициента влияния среды (β) применительно ко всем зонам сварного соединения. У стали Ст.3 существенно изменение пластичности и прочности не происходит при скоростях охлаждения, при температуре наименьшей устойчивости аустенита, от 12 до 50°С/с. У сталей Ст.3 и Х12Н5Т повышалась водородная хрупкость металла в зоне перегрева ($T_H > 1100^\circ\text{C}$) вследствие роста зерна. Образование закалочных структур (стали 30ХГСА и Х16Н6) в металле околосварной зоны приводило к значительному снижению пластичности и прочности в присутствии водорода (при -60°C , $\eta = 0$). Чувствительность закаленных сталей (30ХГСА, 17ГС) к концентрации напряжений чрезвычайно велика. Так закаленная и отпущенная при 500°С сталь 17ГС в 1,6...1,7 раза имеет чувствительность к концентрации напряжений выше, чем у основного металла. Для закаленной стали 17ГС оптимальной температурой высокого отпуска (с интервалом в 30...40°С) является 700°С.

Таким образом, при выборе способа и параметров режима сварки следует учитывать вероятность роста зерна в околосварной зоне; стали, склонные к закалке при сварке, не пригодны для изготовления конструкций данного назначения.

При сварке в отдельных зонах накопленная деформация может составлять 1,5...2,%, а в местах концентраторов до 10% и более, а деформационное старение в этих зонах протекает при температу-

рах 150...350°C. В образцах (8,10,12)х80х600 нами создавалась деформация $\epsilon_{пр} = 0; 2,5; 5,0; 10\%$. Старение образцов проводилось по режиму: $\epsilon_{пр} = 10\%$, $T_H = 250^\circ\text{C}$, $\tau = 4$ ч. Испытывались образцы с боковыми надрезами, имеющие в основании радиус $\rho = 0,07$ мм., по методике В.А. Винокурова на основе средних напряжений ($\sigma_{ср.р.}$) и средних деформаций ($\epsilon_{ср.р.}$) при разрушении ($\epsilon_{ср.р.}$ определялось на базе 20 мм). Закрытические концентрации водорода достигались за 4 ч. насыщения. Установлено, что пластическая деформация ($> 5\%$) существенно снижает $\sigma_{ср.р.}$ и $\epsilon_{ср.р.}$ (у стали 09Г2С, при $\epsilon_{пр} = 10\%$, $\sigma_{ср.р.}$ и $\epsilon_{ср.р.}$ снижались в 2 раза), отрицательный эффект возрастает с понижением температуры (у стали 09Г2С, при -20°C , излом кристаллический, $\epsilon_{ср.р.} \leq 0,5...0,7\%$). Деформационное старение оказывало такое же влияние. Высокий отпуск при температуре 650°C повышал пластичность образцов (в обоих состояниях), однако она оставалась ниже, чем у наводороженных образцов из основного металла. Чувствительность сталей Ст.3, 09Г2С, 17ГС к концентрации напряжений в состоянии поставки составляла 0,008...0,014, при наводороживании она увеличивалась в 1,5...2 раза; деформирование сталей Ст.3 и 09Г2С повышало $1/\alpha_T$ в 1,4...1,6 раза, а наводороживание — еще в 2,5...3,6 раза (до 0,0415...0,0636). Примерно такое же влияние оказывало и деформационное старение. Влияние водорода на повышение $1/\alpha_T$ такое же, как пластической деформации или деформационного старения или несколько выше. Совместное их воздействие повышает чувствительность сталей в 4...6 раз. Для стали 09Г2С оптимальной температурой высокого отпуска (с интервалом 30...40°C) является 700°C.

Водород повышает температуру перехода в хрупкое состояние деформированных и деформационно-старенных образцов на 20...50°C.

Был выполнен анализ и исследования различных сочетаний направлений прокатки листа, накопленной деформации ($\epsilon_{пр} = 10\%$) и максимального усилия в зоне термического влияния стали 10Г2С1 на основе вязкости разрушения $K_{IC}(K_{Ic})$ (по методике Г.П. Черепанова).

Испытывались на изгиб призматические образцы 20х20х320 с искусственной трещиной в различных зонах, вырезанные из пластин 20х320х1000, сваренных автоматической сваркой под слоем флюса с двух сторон (режим стандартный).

Показано, что металл шва имеет вязкость разрушения на уровне или несколько выше, чем у основного металла; сталь 10Г2С1 при автоматической сварке под слоем флюса не склонна к росту зерна в околосшовной зоне; пластическая деформация ($\epsilon_{пр} \leq 2,5\%$) повышала

устойчивость против водородной хрупкости.

Установлено, что наиболее опасное сочетание направлений прокатки, накопленной пластической деформации и максимального напряжения наблюдается (например, у трубопроводов и длинных цилиндрических сосудов, работающих под внутренним давлением) в околосшовной зоне продольного шва, когда направление прокатки параллельно оси трубопровода.

Комбинируя сочетания, можно в достаточно широких пределах управлять склонностью металла зоны термического влияния сварных соединений сталей к хрупкому разрушению в присутствии водорода.

Нормирование металла шва, выполненного различными способами сварки, производилось на основе критического раскрытия трещины (методика С.А. Куркина), испытывались сварные образцы $10 \times 150 \times 700$ из стали Ст.3 с поперечным сварным швом (режимы стандартные). Из экспериментальных данных следует: по уменьшению δ_c металла шва примененные способы сварки можно расположить в последовательности: автоматическая под слоем флюса, полуавтоматическая - в среде CO_2 (при -40°C критерий δ_c на уровне как и у основного металла), ручная дуговая - электродами АНО-4 и ручная дуговая - электродами УОНИ-13/45.

Таким образом, для изготовления сварных конструкций, предназначенных для работы в наводороживающих средах, в наибольшей степени пригодны автоматическая сварка под слоем флюса и полуавтоматическая - в среде CO_2 . При АФ сталь Ст.3 склонна к росту зерна в околосшовной зоне, металл которой обладает высокой чувствительностью к водородной хрупкости.

Анализ наших исследований показывает, что деформационное старение является одним из опаснейших факторов, повышающих водородную хрупкость сварных соединений, поскольку оно может происходить при низком уровне углерода и азота в α - растворе железа, и вероятность его появления всегда существует при практически достижимых уровнях С и N в α - растворе - минимальном ($< 10^{-3} \dots 10^{-4}\%$ по весу) и максимальном ($> 10^{-3} \dots 10^{-4}\%$ по весу).

Исследования влияния характера деформационного старения (естественное, статическое, искусственное и динамическое) нами выполнены на сталях $10\Gamma2\text{C1}$ и $09\Gamma2\text{C}$ на основе вязкости разрушения $K_{IC}(K_{IC})$ и критического раскрытия трещины δ_c . Естественное и искусственное статическое старение (режим стандартный) стали $10\Gamma2\text{C1}$ повышали ее склонность к водородной хрупкости. Закалка образцов при температуре $680 \dots 700^\circ\text{C}$ в воду, содержащую 10% NaCl ,

и последующее динамическое старение в меньшей степени повышали водородную хрупкость. Высокий отпуск образцов после естественно-го и статического искусственного старения не восстанавливал их свойства, а после динамического — восстанавливал до уровня основного металла.

Образцы из стали 09Г2С отжигались при 880°C 24 ч., охлаждались вместе с печью, при этом устранялся наклеп от прокатки, происходила гомогенизация структуры и обеспечивалось минимальное содержание С и N в α — растворе.

Половина образцов закаливала по режиму: нагрев при $680...700^{\circ}\text{C}$ 1 ч., охлаждение в 10-ном водном растворе NaCl. Деформационное старение проводилось по режиму: $\varepsilon_{\text{пр}} = 5\%$, $T_n = 250^{\circ}\text{C}$, $\tau = 1$ ч.

Без водорода образцы с предшествующей закалкой были более устойчивы к хрупкому разрушению. Высокий отпуск при температуре 650°C был также более эффективен для этой серии образцов (в присутствии водорода).

При недостатке азота и углерода в α — растворе пластическое деформирование создает неравномерные скопления дислокаций. При нагреве в этих скоплениях последовательно происходит выделение отдельных атомов, образований сегрегаций, предвыделений и выделений в ферритных зернах, границы зерен рыхлые.

При избытке С и N в α — растворе пластическая деформация приводит к равномерному распределению скоплений дислокаций и отдельных дислокаций при нагреве, протекающей стадии возврата, отдыха и рекристаллизации; дислокации выстраиваются в стенки и образуются субзерна. Границы зерен плотные, металл имеет блочное строение и выделения в зернах отсутствуют.

С позиции адсорбционно-диффузионной модели влияния водорода предпочтительнее второе состояние.

Исследования влияния малоциклового нагружения на скорость распространения трещины в зависимости от коэффициента интенсивности напряжений показывают, что скорость роста трещины в металле шва, выполненного автоматической сваркой под слоем флюса, наименьшая, водород увеличивает скорость роста трещины в 1,5...2 раза. В направлении прокатки в присутствии водорода трещина развивается в 8...10 раз быстрее, чем в ненаводороженном металле шва, скорость роста трещины возрастает в металле, испытывающем объемное напряженное состояние (мягкая прослойка).

Сопоставление твердости металла в различных состояниях технологической обработки и его склонности к водородной хрупкости позво-

лило предложить метод экспрессного определения зоны сварного соединения, металл которой наиболее склонен к водородности хрупкости. по твердости (по Бринелю).

На основе исследований были разработаны и проанализированы мероприятия, направленные на повышение стойкости сварных соединений низкоуглеродистых и низколегированных сталей к хрупкому разрушению в присутствии водорода.

1. Учет и использование разработанных нами методов оценки влияния различных сварочных охрупчивающих факторов в присутствии водорода и, на основе этого, определение участков сварного соединения, в наибольшей степени склонных к водородной хрупкости; для оценки стойкости сварных соединений против водородной хрупкости предпочтительнее использовать деформационные критерии механики разрушения, поскольку под воздействием водорода в наибольшей степени снижается пластичность.

2. Выбор металла; кривая пластического деформирования металла участка сварного соединения, наиболее склонного к водородной хрупкости, должна отвечать основным требованиям, обоснованным нами; сталь не должна быть склонной к росту зерна в околошовной зоне и закалке и деформационному старению в зоне термического влияния; выбор способа сварки и разработка технологического процесса, исключающих рост зерна в околошовной зоне при сварке.

3. Правильный выбор направления прокатки листа (учет анизотропии) по отношению к направлениям накопленной пластической деформации.

4. Применение автоматической сварки под слоем кислого кремне-марганцовистого флюса и автоматической сварки в среде углекислого газа - способов, обеспечивающих стабильность свойств и высокое качество металла шва, обладающего повышенной стойкостью против водородной хрупкости в интервале температур $-60...20^{\circ}\text{C}$.

5. Применение высокого отпуска при оптимальной температуре (с интервалом колебаний в $30...40^{\circ}\text{C}$) как необходимой технологической операции при изготовлении сварных стальных конструкций, металл которых работает в присутствии водорода.

6. Применение полной или частичной (только кромок) закалки свариваемого материала от субкритических температур $680...700^{\circ}\text{C}$ перед сваркой и высокого отпуска при оптимальной температуре после сварки.

7. Использование экспрессного метода определения участка сварного соединения, металл которого наиболее склонен к водородной хрупкости, по максимальной твердости HB.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. На основе анализа литературных данных установлено, что:

- наводороживание металла сварных конструкций происходит при взаимодействии с большим количеством естественных и технологических сред;
- изучение водородной хрупкости сварных соединений целесообразно проводить независимо от коррозионного разрушения, поскольку разрушение под влиянием водорода наступает раньше;
- в наибольшей степени влияние водорода проявляется при нормальных и умеренно низких температурах (до $-100...40^{\circ}\text{C}$) и малых скоростях деформирования (до $0,67 \cdot 10^{-4}$ М/с).

2. Прямыми микроскопическими исследованиями показано, что:

- местами сегрегаций и диффузии водорода являются "внутренние" поверхности раздела - границы зерен (чаще стык трех зерен), блоков, структурных составляющих и включений окислов, сульфидов и др., факелы пластической деформации и скопления дислокаций;
- количество путей диффузии водорода линейно зависит от величины суммарной "внутренней" поверхности, а интенсивность - от состояния этой поверхности (по границам крупных зерен интенсивность диффузии выше, чем по границам мелких);
- водород в коллекторах и в матрице находится в состоянии динамического равновесия.

3. Обосновано и введено понятие "критической концентрации" водорода в металле, сущность которого состоит в том, что при увеличении содержания водорода в металле его физико-механические свойства зависят от концентрации лишь до определенного предела - "критической концентрации", при закритических концентрациях свойства металла квазипостоянны, а следовательно не зависят от растворимости и проницаемости водорода, что делает результаты испытаний образцов сопоставимыми и экстремальными, соответствующими условиям эксплуатации конструкций; предложена адсорбционно-диффузионная модель влияния водорода на свойства сталей, заключающаяся в том, что при деформировании наводороженного металла протекают те же стадии повреждаемости, что и в ненаводороженном, но наступают они при меньшей степени пластической деформации; способствуя образованию дислокаций, водород на ранних стадиях деформирования пластифицирует, а на поздних - охрупчивает металл вследствие повышения плотности дислокаций.

4. Обнаружены неоднородности растворимости и проницаемости водорода в различных зонах сварного соединения (на стали Ст.3 раст-

воримость изменяется в 3...8 раз и на стали 30ХГСА - в 20 раз, а проницаемость - соответственно в 8 и 10 раз), которые управляются неоднородностями: химической, структурной, упруго-пластического состояния, а также наличием градиентов температуры, напряжений и др. Показано, что:

- технологические факторы (механическая, термическая и др. виды обработки), увеличивающие подвижность и уменьшающие растворимость водорода в перлитных незакаливающихся сталях, повышают их водородную хрупкость и понижают "критическую концентрацию" водорода;

- участок металла зоны термического влияния, подвергшийся термопластическому воздействию процесса сварки, где растворимость водорода минимальна, обладает наибольшей склонностью к водородной хрупкости и твердостью и определяется по измерению твердости НВ.

5. Показано, что:

- а) под влиянием водорода эффективная деформация ϵ_i^p снижается значительно, чем под влиянием предварительной пластической деформации и деформационного старения, а при совместном влиянии названных факторов, закалки и водорода деформация ϵ_i^p снижается на порядок и более вследствие суперпозиции отрицательных эффектов действия; на основании этого предложено использовать деформацию ϵ_i в качестве критерия оценки реакции сталей на присутствие водорода; критерии J_1 и J_2 (определяемые по изменению пластичности) для оценки водородного охрупчивания сталей при плоском напряженном состоянии;

- б) водород повышает чувствительность к концентрации напряжений деформированных и деформационно состаренных и закаленных сталей в 2...3 раза по сравнению с основным металлом.

6. Неоднородности растворимости и проницаемости водорода в зонах сварного соединения указывает на наличие в нем в присутствии водорода неоднородности физико-механических свойств; экспериментально показано, что:

- скорость охлаждения металла при температуре наименьшей устойчивости аустенита мало влияет на свойства незакаливающихся (Ст.3, Х21Н5Т) и существенно влияет на свойства закаливающихся сталей (30ХГСА, Х16Н6);

- в закаленном металле значительно снижаются прочность и пластичность;

- рост зерна в околосварной зоне стали Ст.3 повышает склон-

ность сварных соединений к водородной хрупкости (стали 09Г2С и 10Г2С1 не склонны к такой хрупкости).

На основе этих исследований даны рекомендации по выбору материала, способа и режимов сварки.

7. Пластическая деформация и деформационное старение понижают растворимость водорода в стали, что свидетельствует о существенном влиянии этих факторов на физико-механические свойства сварных соединений в присутствии водорода; экспериментально показано, что:

- малая пластическая деформация (до 2,5%) уменьшает, а большая деформация (до 10%) и деформационное старение увеличивают (особенно с понижением температуры испытания) склонность к хрупкому разрушению (при -20°C образцы с боковыми надрезами из стали 09Г2С обеих серий разрушались хрупко, излом кристаллический);

- высокий отпуск повышает пластичность этих образцов, но в присутствии водорода она остается в 1,5...2,0 раза ниже, чем у основного металла;

- предварительная закалка металла от субкритических температур $680...700^{\circ}\text{C}$, увеличивающая эффективную концентрацию азота и углерода в α -растворе, снижает влияние деформационного старения и повышает эффективность высокого отпуска при оптимальной температуре.

8. Наличие выраженной взаимосвязи проницаемости водорода и направления прокатки листа указывает на зависимость физико-механических свойств сварных соединений в присутствии водорода от анизотропии проката; разработана методика и показано, что:

- в сочетании с накопленной при сварке пластической деформацией и деформационным старением анизотропия механических свойств металла существенно повышает водородную хрупкость металла зоны термического влияния и это влияние максимально в том случае, когда направления прокатки и накопленной пластической деформации перпендикулярны направлению действующего усилия (у стали 10Г2С1 при -60°C K_c понижается в 2 раза);

- вдоль направления прокатки по местам скопления водорода трещина развивается в 8...10 раз быстрее, чем в металле шва.

На основе этих исследований предложена модель влияния водорода на свойства металла при наличии анизотропии физико-механических свойств проката.

9. Разработаны мероприятия, обеспечивающие повышение стойкости сварных соединений против водородной хрупкости:

- для шва - применение автоматической сварки под слоем кремне-марганцовистого флюса или сварки в среде углекислого газа - способов, позволяющих получать металл шва стойким против водородной хрупкости;

- для околосварочной зоны - выбор стали, не склонной к росту зерна, выбор режимов сварки, ограничивающих рост зерна и учет анизотропии проката;

- для зоны термического влияния - применение высокого отпуска при оптимальной температуре после предварительной частичной (только кромок) или полной закалки свариваемого металла от субкритических температур 680...700°C, устраняющей отрицательное влияние накопленной пластической деформации и деформационного старения, а также учет анизотропии проката.

Результаты работы внедрены в исследовательскую и производственную практику ряда организаций и предприятий.

Содержание диссертации опубликовано в следующих работах.

1. Дубровин И.Ф., Суворин В.Я. Наводороживание титановых сплавов при фрезеровании. - Физико-химическая механика материалов, 1974, № 6, с. 19-22.

2. Зайцев Ю.Н., Фролов В.В., Суворин В.Я. Исследование коррозионной стойкости и водородопроницаемости кованных и переплавленных сталей в связи с задачей повышения эффективности наплавки штампов. - В кн.: Штамповые стали. М.: Машиностроение, 1968, вып. 18, с. 90-106.

3. Суворин В.Я. О кинетике термодиффузионных процессов при сварке. - Известия вузов. Машиностроение, 1965, № 12, с. 31-34.

4. Суворин В.Я. О проведении водорода в зоне термического влияния при сварке. - Изв. вузов. Машиностроение, 1967, № 11, с. 159-164.

5. Суворин В.Я., Шукайло В.И., Фролов В.В. Водородопроницаемость стали 16ГНМА обычной выплавки и переплавленной электрошлаковым способом. - В кн.: Прогрессивная технология в сварочном производстве. Воронеж, 1969, с. 57-62.

6. Суворин В.Я., Шукайло В.И., Петров А.С. и др. Методика и результаты исследования образцов с трещинами применительно к сварным соединениям. - В кн.: Прогрессивная технология в сварочном производстве. Воронеж, 1969, с. 63-72.

7. Суворин В.Я., Черных Е.М., Стрекалов В.А. Аппроксимация кривой нагружения образцов из низкоуглеродистой и низколегированной сталей. М.: ЦИТИХИМТЕМАШ, 1974. - 8 с. (Экспресс-информация. Серия ХИ-9, № 5).

8. Суворин В.Я., Шукайло В.И. Методика и некоторые результаты микроскопических исследований водородопроницаемости в сталях. - М.: ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, 1974. - 6 с. (Экспресс-информация. Серия ХМ-9, № 7).

9. Суворин В.Я., Шукайло В.И. Влияние термического цикла сварки на прочность и пластичность металла околосварочной зоны в присутствии водорода. - В кн.: Автогенное машиностроение. М.: ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, 1974, с. 6-7.

10. Суворин В.Я., Николаев А.Ф. Совместное влияние водорода и деформационного старения на хрупкое разрушение стали 09Г2С. - Тр./ НПО КРИОГЕНМАШ, 1974, вып. 16, Криогенная техника, с. 160-165.

11. Суворин В.Я., Фролов В.В. Влияние водорода на статическую прочность низкоуглеродистой стали. - Изв. вузов. Машиностроение, 1974, № 9, с. 121-125.

12. Суворин В.Я., Николаев А.Ф. Влияние пластической деформации на хрупкое разрушение сталей в присутствии водорода. - Химическое и нефтяное машиностроение, 1975, № 3, с. 28-30.

13. Суворин В.Я., Федотов И.К. О расчете стальных конструкций, наводороживающихся в процессе эксплуатации. - М.: ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, 1975, с. 1-3. (Экспресс-информация. Серия ХМ-9, № 6).

14. Суворин В.Я., Федотов И.К. Об определении предельной пластичности наводороженной стали в условиях сложного напряженного состояния. - М.: ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, 1975, с. 8-12. (Экспресс-информация. Серия ХМ-9, № 6).

15. Суворин В.Я. К вопросу оценки склонности стали к водородной хрупкости по измерению ее твердости. - М.: ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, 1975, - 3 с. (Экспресс-информация. Серия ХМ-9, № 5).

16. Суворин В.Я., Черных Е.М., Федотов И.К. Оценка предельной пластичности наводороженного металла в условиях сложного напряженного состояния. - Тр./ КРИОГЕНМАШ, 1975, вып. 17, Криогенная техника. С. 236-244.

17. Суворин В.Я., Федотов И.К. Влияние водорода на расчетные предельные состояния прочности. - В кн.: Процессы и технология в криогенном машиностроении. Балашиха, 1975, с. 26-31.

18. Суворин В.Я., Черных Е.М., Николаев А.Ф. и др. Влияние накопленной пластической деформации и деформационного старения на хрупкое разрушение сталей Ст.3 и 09Г2С в присутствии водорода. - В кн.: Прогрессивная технология в сварочном производстве. Воронеж, 1975, с. 37-50.

19. Суворин В.Я., Шукайло В.И. Влияние термического цикла сварки

на прочность и пластичность металла околосшовной зоны в присутствии водорода. - В кн.: Прогрессивная технология в сварочном производстве. Воронеж, 1975, с. 51-61.

20. Суворин В.Я., Трофимов В.Т. Как продлить жизнь машин. - Воронеж: Центр.-черн. кн. изд-во, 1975 - 135 с.

21. Суворин В.Я., Черных Е.М., Казаков Э.Д. и др. О прочности стальных конструкций, работающих в условиях наводороживания. - В кн.: Термическая резка и газопламенная обработка металлов. Воронеж: Изд-во ВГУ, 1976, с. 108-122.

22. Суворин В.Я., Черных Е.М., Казаков Э.Д. и др. Выбор материала для сварных конструкций, работающих в наводороживающих средах, и термомеханическая обработка. - В кн.: Термическая резка и газопламенная обработка металлов. Воронеж: Изд-во ВГУ, 1976, с. 123-136.

23. Суворин В.Я. Критерии оценки влияния водорода на свойства сталей в условиях сложного напряженного состояния (в порядке обсуждения). - Химическое и нефтяное машиностроение, 1976, № 3, с. 39-41.

24. Суворин В.Я., Николаев А.Ф., Стрекалов В.А. и др. Влияние водорода на статическую прочность и пластичность низколегированных сталей 09Г2С и 17ГС. - Сварочное производство, 1976, № 8, с. 7-9.

25. 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, 1976, № 12, с. 4-6.

26. Суворин В.Я. Влияние направления прокатки и направления предварительной пластической деформации на склонность к хрупкому разрушению сварных соединений сталей в присутствии водорода. Модель влияния водорода. - В кн.: Повышение стойкости сварных соединений против водородной хрупкости: Тез. докл. Всесоюз. научно-технического семинара. Воронеж, 1977, с. 33-36.

27. Суворин В.Я., Николаев А.Ф., Куркин С.А. и др. Оценка свойств сварных соединений стали Ст.3 в присутствии водорода на основе критического раскрытия трещины. - В кн.: Повышение стойкости сварных соединений против водородной хрупкости: Тез. докл. Всесоюз. научно-технического семинара. Воронеж, 1977, с. 57-59.

28. Суворин В.Я. Чувствительность к концентрации напряжений деформированных и деформационно-состаренных сталей Ст.3 и 09Г2С, содержащих водород. - Автоматическая сварка, 1977, № 5, с. 30-33.

29. Суворин В.Я., Федотов И.К. Повышение стойкости сварных соединений против водородной хрупкости при статических нагрузках. - М.:

ДИНТИХИМНЕФТЕМАШ, 1977. - 52 с.

30. Суворин В.Я. Чувствительность стали 09Г2С к концентрации напряжений при различном содержании водорода. - Физико-химическая механика материалов, 1978, № 3, с. II2-II4.

31. Суворин В.Я., Николаев А.Ф., Фролов В.В. и др. Исследование свс. ств сварных соединений с помощью критического раскрытия трещины. - Изв. вузов. Машиностроение, 1978, № 9, с. I27-I31.

32. Суворин В.Я. Влияние направления прокатки листа стали 10Г2С1 и предварительной пластической деформации растяжением на сопротивление распространению трещин металла зоны термического влияния в присутствии водорода. - Физико-химическая механика материалов, 1978, № 6, с. 29-32.

33. Фролов В.Я., Суворин В.Я. Исследование свойств водорода в сварных соединениях из низкоуглеродистой стали. - В кн.: Автоматизация, механизация и технология процессов сварки. М.: Машиностроение, 1966, с.95-106.

34. Фролов В.В., Суворин В.Я. Поведение водорода в дуговом разряде. - Сварочное производство, 1968, № 2, с.4-6.

35. Фролов В.В., Суворин В.Я., Зайцев Г.Н. Неоднородности в распределении и местах диффузии водорода в сварных соединениях и в металле, переплавленном электрошлаковым способом. - В кн.: Неоднородность сварных соединений и ее влияние на их работоспособность: Краткое излож. докл. тематического координационного совещания. Челябинск, 1968, с.21-22.

36. Фролов В.В., Суворин В.Я., Зайцев В.Н. О некоторых факторах, обеспечивающих высокую стойкость штампов, изготовленных с помощью электрошлакового процесса. - В кн.: Передовая технология в производстве сварных конструкций. Пермь, 1968, с.19-26.

37. Фролов В.В., Суворин В.Я., Шукайло В.И. Неоднородности по растворимости и проницаемости водорода в сварных соединениях. - В кн.: Прогрессивная технология в сварочном производстве. Воронеж, 1969, вып.2, с. 49-56.

ψ $\epsilon_i, \epsilon_p, \epsilon_{ср.р.}, \epsilon_{ср.р.}, \eta, \beta, K_c, W, 1/\alpha_T$

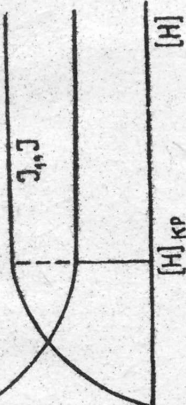


Рис. 1. Схема зависимости свойств металла от концентрации водорода. $[H]_{кр}$ — критическая концентрация

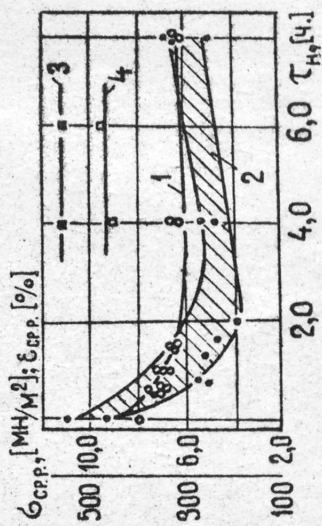


Рис. 2. Зависимость $\epsilon_{ср.р.}$ и $\epsilon_{ср.р.}$ от времени наводороживания. Кривые: 1, 3 — $\epsilon_{ср.р.}$; 2 (поле), 4 — $\epsilon_{ср.р.}$; 2 — сталь 09Г2С; 3, 4 — сталь ГГГС

УЧАСТОК СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ	КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ. ТЕМПЕРАТУРНЫЙ ИНТЕРВАЛ ИССЛЕДОВАНИЙ
СШ	1. СВАРНОЙ ШОВ
	$K_c(K_{1c}), \delta_c, K_f; -60 < T < 20^\circ C$
$> 1100^\circ$	2. ОКОЛОШОВНАЯ ЗОНА
	$\eta, \beta, K_c(K_{1c}), \delta_c; -60 < T < 20^\circ C$
$> A_{c3} + 30^\circ$	3. ЧАСТИЧНОЙ ПЕРЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ
	$\eta, \beta; -60 < T < 20^\circ C$
$> A_{c3} + 30^\circ$	4. ЗАКАЛКИ
	$\epsilon_i, \epsilon_p, \eta, \beta, \epsilon_{ср.р.}, \omega_o (при T_H), 1/\alpha_T; -60 < T < 20^\circ C$
	5. НАКОПЛЕННОЙ ДЕФОРМАЦИИ
	$\epsilon_i, \epsilon_p, W, J, J, \beta, \epsilon_{ср.р.}, \epsilon_{ср.р.}, H_V, K_{1c}, 1/\alpha_T; -60 < T < 20^\circ C$
> 150	6. ДЕФОРМАЦИОННОГО СТАРЕНИЯ
	$\epsilon_i, \epsilon_p, W, J, J, \beta, \epsilon_{ср.р.}, \epsilon_{ср.р.}, H_V, K_{1c}(K_{1c}), \delta_c, 1/\alpha_T; -60 < T < 20^\circ C$
03	7. АНИЗОТРОПИИ ПРОКАТА
	$\epsilon_T, K_c(K_{1c}), \delta_c, K_f; -60 < T < 20^\circ C$

Рис. 3. Исследованные зоны сварного соединения и критерии оценки их свойств