

М249508

Министерство высшего и среднего специального образования СССР

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

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

ПЕРУНОВ Борис Всеволодович

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСТРЕСКИВАНИЯ
СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ МАЛОУГЛЕРОДИСТЫХ
СТАЛЕЙ В УВЛАЖНЕННОМ СЕРОВОДОРОДЕ

Специальность 05.04.05 — Технология и машины
сварочного производства

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

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

Научный руководитель —
доктор технических наук, и. о. профессора СТЕКЛОВ О. И.

Официальные оппоненты:
доктор технических наук, профессор ФРОЛОВ В. В.,
кандидат химических наук, доцент ТИМОНИН В. А.

Ведущее предприятие —
Физико-Механический Институт Академии Наук УССР

Автореферат разослан « »

Защита диссертации состоитс
на заседании специализи
нологии сварочного пр
ресу: Москва, 107005, 2

Ваши отзывы на с
ные печатью, просим

С диссертацией мо
им. Н. Э. Баумана.

Ученый секретар
доктор технических на

М 249508

Одна из узловых задач современного народного хозяйства — ускоренное развитие газовой промышленности. Это обусловлено тем, что природный газ стал в настоящее время одним из главных видов топлива и химического сырья для ряда важнейших отраслей промышленности, и широкое его применение оказывает большое влияние на прогресс народного хозяйства в целом. Огромное значение в таких условиях приобретает освоение газоконденсатных месторождений, расположенных недалеко от центров газопотребления. Однако, ввод в строй некоторых месторождений, газ которых содержит увлажненный сероводород, оказывается исключительно сложной задачей. Вследствие физико-химических взаимодействий в водном растворе сероводорода на поверхности труб происходит интенсивное наводороживание металла. При длительном действии на такой металл остаточных технологических и рабочих напряжений происходит замедленное водородное разрушение (ЗВР). Большая часть обнаруженных водородных трещин располагается в сварных соединениях. Эффективное повышение стойкости сварных соединений против ЗВР возможно только после ответа на вопрос: какой именно технологический фактор ответственен за ускоренное по сравнению с основным металлом ЗВР сварного соединения. Выработке метода получения необходимой информации и определению принципиальных путей повышения стойкости сварных соединений против ЗВР и посвящена предлагаемая работа.

Работа состоит из пяти глав и выводов, содержит 146 страниц, в том числе II таблиц, 43 иллюстрации и библиографию 84 наименования.

Глава I. ВВЕДЕНИЕ

Проблеме водородного разрушения сталей посвящено очень много работ советских и зарубежных исследователей: Г.Карпенко, Р.Крипьякевича, И.Василенко, В.Фролова, Н.Прохорова, Н.Петча, А.Тетелмена, Э.Паркера, А.Трояно и других. К настоящему времени накоплено большое количество интересных данных о влиянии водорода на различные свойства металлов. На основе этих данных создано много оригинальных теорий. Однако, результаты экспериментов не всегда согласуются между собой, а теоретические положения иногда слишком сложны для их использования при решении технических задач. Хотя в практике известны случаи, когда некоторые исследователи добивались позитивных результатов на основном металле, точных, логически обоснованных



8056724

ных принципов улучшения стойкости сварных соединений до сих пор нет. Используемые методы исследования не позволяют дифференцированно оценить влияние теплового, деформационного, механического и металлургического факторов, присущих сварке, на стойкость против ЗВР. Вопрос об ответственном факторе термдеформационного цикла пока не находит однозначного ответа.

Потребности газовой промышленности ставят конкретную задачу — повысить стойкость сварных соединений против ЗВР. Определяя объем и пути получения необходимой информации, необходимо принимать во внимание два обстоятельства:

1. Наводороживаемый металл, а тем более сварное соединение, представляют собой плохо организованную систему.

2. Процесс ЗВР протекает во времени и должен описываться кинетическими характеристиками.

В соответствии с вышеизложенными задачи работы были сформулированы следующим образом:

1. Разработать методику испытаний материала на замедленное водородное разрушение, позволяющую количественно оценить роль главных технологических факторов.

2. Установить доминирующие факторы ускорения водородного разрушения сварных соединений.

3. Наметить принципиальные пути повышения стойкости сварных соединений против ЗВР.

Глава II. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Метод исследования складывается из трех взаимосвязанных элементов: критерия, описывающего поведение системы; способа получения критерия, техники и технологии эксперимента; тактики, т.е. количества и качества опытов, позволяющих получать необходимую информацию с наименьшими затратами.

Исходным пунктом исследования является выбор обоснованного критерия. Необходимо было выбрать такую физическую характеристику, легко доступную для экспериментального определения, которая бы имела хорошую корреляцию с процессом развития водородных трещин. В большинстве случаев для оценки действия водорода используют результаты механических испытаний. По изменению исходных свойств в процессе наводороживания судят о степени разрушения. Нами был поставлен специальный эксперимент для определения возможности оценки ки-

ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ

М И Т У
им. Н. В. Баумана
БИБЛИОТЕКА

нетики ЗВР по результатам статических испытаний. Образцы выдерживали в увлажненном сероводороде в напряженном и ненапряженном состоянии. Напряжения создавали постоянной нагрузкой в рычажном устройстве или постоянным изгибом в скобах. После выдержки в среде образцы разрушали с записью диаграмм. Было установлено, что существенные изменения пластичности, механической характеристики наиболее подверженной влиянию поглощаемого водорода, происходит только в первые часы наводороживания. Путем микроскопии было показано, что эти изменения обусловлены водородным охрупчиванием и почти не связаны с развитием трещин. Использование предельной пластичности в качестве критерия склонности металла к ЗВР нецелесообразно, т.к. одному и тому же значению предельной пластичности при разрушении может соответствовать различный запас долговечности материала.

Нами была предпринята попытка оценить склонность материала к ЗВР по долговечности образца заданных размеров, экспонируемого при постоянной нагрузке в увлажненном сероводороде. Выясняли: какой из фаз разрушения определяется долговечность образца — инкубационной или субкритической? Для оценки кинетики разрушения использовался метод, разработанный в нашей лаборатории. Продолжительность работы материала до разрушения представляет собой сумму длительностей инкубационной и субкритической фаз. В агрессивной среде при равных исходных напряжениях экспонируют до разрушения образцы с различной площадью поперечного сечения. При одинаковых начальных скоростях субкритического роста трещин сечение более тонкого образца будет ослабляться с большей интенсивностью. Уровень напряжений в тонком образце будет возрастать быстрее. Путь, который необходимо пройти трещине до того, как напряжения в сечении достигнут критического уровня, вероятно, тоже будет меньше. Видно, что продолжительность субкритической фазы в более тонком образце должна быть меньше. Экстраполируя размеры образца к нулю, мы, неограниченно сокращая длительность субкритической фазы, выделяем начальную задержку разрушения — инкубационную фазу. Эксперимент проводился на листовой стали Ст3 в состоянии поставки. Было установлено, что при уменьшении размеров образца долговечность уменьшается. Ее изменение в условиях нашего эксперимента описывается линейной зависимостью. Начальная задержка разрушения, полученная при экстраполяции, невелика в сравнении с общей долговечностью.

Определяющую роль в работоспособности образца играет толщина поперечного сечения. Вероятно, фронты повреждений распространяются параллельно плоскости катаного листа. Сделанные из эксперимента выводы были подтверждены результатами микроскопии продольных шлифов рабочей части образца. Было установлено, что разрушение образцов толщиной более 2 мм протекает в три стадии:

1. Проводороживание сечения образца до некоторого необходимого уровня;

2. Развитие в отдельных сечениях вдольстрочечных трещин, ориентированных в направлении оси образца;

3. Соединение параллельных расщелений общей магистральной трещиной; вторая и третья фазы разрушения составляют 70-80% общего времени до разрушения. Это позволяет считать долговечность используемого образца толщиной 3 мм характеристикой склонности металла к распространению ЗВР.

Выработке критерия стойкости металла против ЗВР и изучению его кинетического характера предшествовали работы по определению технологии сравнительных испытаний. Процесс испытаний, начиная от получения образца, кончая его разрушением в результате длительного нагружения в увлажненном сероводороде, разбили на этапы, обуславливающие физические свойства материала образца и его поверхности. Для сокращения числа опытов при отсеивающих экспериментах использовали метод случайного баланса. Принимая во внимание результаты ранжирования взятых под подозрение факторов, мы решили проводить сравнительные испытания на склонность к ЗВР плоских образцов в чистом сероводороде, непрерывно барботирующем через слой воды на дне рабочей камеры. Перед установкой образцы зачищали наждачной бумагой и обезжиривали в четыреххлористом углероде.

Тактика эксперимента по определению тех наихудших условий, которые реализуются в быстро разрушающихся сварных соединениях, и поиск тех наилучших условий, которые должны быть созданы в стойких сварных соединениях, определяется главными принципами изучения плохо организованных систем. При решении задач в диффузных системах исследователь сознательно отказывается от детального разграничения всех сложным образом переплетенных процессов. Критерий в этих случаях связывают с факторами при помощи математической модели. Вид модели определяется целью, в нашем случае цель - получение разделя-

ной оценки роли факторов и их взаимодействий:

$$p_i = b_0 x_0 + \sum_{k=1}^n \sum_{r=1}^{c_k} (b_{M_r^k} \cdot \prod_{j \in M_r^k} x_j) \quad , \quad (1)$$

где M_r^k — одна из групп по k номерам факторов с индексом группы r ;

p_i — значение критерия в i -опыте, проводимом при определенных значениях факторов $x_1, x_2, \dots, x_n$.

Некоторые изменения, внесенные нами в традиционную систему кодирования факторов, применяемую в экстремальных задачах, определяют вид коэффициентов полинома, каждый из которых количественно характеризует вклад фактора или взаимодействия в результат опыта на фоне свойств исходного материала:

$$b_{M_r^k} = (-1)^k p_0 + \sum_{\ell=1}^k \sum_{t=1}^{c_k} (-1)^{(k-\ell)} \cdot p_{N_t^\ell} \quad , \quad (2)$$

где p_0 — стоимость исходного материала,
 k — порядок взаимодействия.

Входящие в (2) параметры (их индексы составляют группу M_r^k) определяют план эксперимента для получения раздельной оценки роли факторов и эффекта их совместного присутствия.

Используя выработанный критерий, технику его определения и тактический план получения дифференцированной оценки роли факторов, мы изучали поведение сварных соединений в увлажненном сероводороде.

Основным способом получения информации о склонности к ЗВР различных зон сварного соединения является испытание образца из основного материала, в рабочей части которого на специальном устройстве имитируется термдеформационный цикл. Результаты таких испытаний позволяют установить связь между параметрами термдеформационного цикла и стойкостью металла против ЗВР.

Испытание образцов — имитаторов рассматривается, как средство для выявления факторов, оказывающих сильное влияние на склонность металла к ЗВР. Второй этап исследования должен заключаться во всесторонней проверке гипотезы относительно установленных доминирующих факторов в условиях наибольшего для сформулиро-

ванной гипотезы риска. В нашем случае логично проверить результаты имитационных испытаний на реальных сварных соединениях или их фрагментах. Пригодность плоских образцов с поперечным швом для надежного выявления наименее стойкой зоны и определения влияния существенных условий сварки на стойкость сварного соединения против ЗВР устанавливалась экспериментально. Было показано, что вероятность разрушения в любой зоне рабочей части плоского образца из макроднородного материала одинакова. Следовательно, при испытании на ЗВР сварных соединений разрушения будут располагаться в наименее стойкой зоне.

Глава III. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Используемый нами критерий — долговечность образца — является сравнительным, при помощи его можно выстроить материалы в ряд, один за другим, но нельзя судить количественно о их работоспособности. Для того, чтобы представить хотя бы приблизительно реальные соотношения, необходимо иметь данные о поведении части тех же материалов в реальных условиях. В нашем случае целесообразно использовать в качестве одного из эталонов сталь повышенной прочности типа X-60 импортной поставки с добавками ванадия, ниобия и титана, скверное поведение сварных соединений из которой известно. Наряду со сталью типа X-60 мы исследовали стойкость сварных соединений из малоуглеродистой стали Ст3. Имеются сведения о том, что малоуглеродистые, мягкие стали обнаруживают достаточно высокую стойкость в средах, содержащих увлажненный сероводород.

Задачей первой стадии эксперимента мы считали поиск доминирующих факторов, тех, которые ответственны за резкое понижение стойкости против ЗВР у сварных соединений. Исчисляли на ЗВР образцы-имитаторы зон сварного соединения. В качестве факторов были взяты отдельные элементы сварочного термо-деформационного цикла:

охлаждение с высокими ($100 + 200^{\circ}\text{C}/\text{сек}$) скоростями из области структурных превращений (920°C) (кодированное обозначение $-X_3$);

пластическое деформирование растяжением в диапазоне от 1,00 до 7,5 % (кодированное обозначение $-X_1$);

старение при 280°C в течение 10-15 минут (кодированное обозначение X_2).

Результат эксперимента и его интерпретация в виде полиномиальной модели представлена на рисунке 1. Каждый из компонентов векторы

наблюдений представляет собой результат опыта. Компоненты вектора — оценки соответствуют количественному вкладу отдельного фактора или взаимодействия факторов в общий результат процесса. Индексы в обозначениях коэффициентов полинома указывают номера факторов, роль которых оценивает данный коэффициент. Видно, что наибольшую неблагоприятную роль играет структурное состояние. Неравномерная структура, являющаяся в нашем случае следствием интенсивного охлаждения с высоких температур ($T > A_3$), обнаруживает очень низкую стойкость против ЗВР (наибольший отрицательный компонент вектора — оценки). В то же время влияние пластической деформации (B_1), низкого отпуска (B_2), деформационного старения (B_{12}) статистически незначимо. Вывод о неблагоприятном влиянии структурного фактора находится в согласии с данными по разрушению сварных соединений в реальных условиях. Большая часть обнаруженных трещин находится в районе зоны сплавления подварочного шва с основным металлом.

Выдвинув гипотезу о доминирующей роли структурного фактора, мы подвергли ее проверке в широком диапазоне физических условий. Во-первых, было установлено, что уменьшение наибольшей температуры нагрева ниже точки ($A_3 - 150$) в цикле с резким охлаждением приводит к резкому увеличению стойкости против ЗВР обеих сталей. Во-вторых, уменьшение скорости охлаждения также изменяет склонность металла к ЗВР. Оба эти результата подтверждают вывод об отрицательном влиянии структуры. В-третьих, исследовали влияние механических напряжений на стойкость против ЗВР материала в исходном состоянии и после имитации цикла с неблагоприятным фактором X_3 . Результат представлен на рисунке 2. Сталь типа X-60, исходная стойкость которой высока, теряет после имитированного термо-деформационного цикла, включающего фактор X_3 , сопротивляемость ЗВР во всем интервале напряжений. Сталь Ст3, исходная стойкость которой ниже, чем у стали типа X-60, меньше и в более узком диапазоне напряжений реагирует на действие имитированного сварочного цикла. Испытания образцов со сварным швом показали еще большее различие в поведении мягкой стали Ст3 и стали повышенной прочности типа X-60. Образцы вырезали из сварных соединений, выполненных ручной дуговой сваркой при обычных технологических условиях и с интенсивным послесварочным охлаждением. Все сварные образцы из стали типа X-60 разрушались за короткое время по шву и зоне термического влияния. Даже обычные сварочные скорости охлаждения приводили к образованию в зоне влияния

структуры, нестойкой против ЗВР. Сварные соединения из стали Ст3 с послесварочным переохлаждением разрушались также по шву и зоне термического влияния. Долговечность их соответствовала долговечности имитатора X_3 . Разрушение же сварных образцов из стали Ст3, выполненных в обычных условиях, происходит по основному металлу. Стойкость стали Ст3 под действием нормального для ручной дуговой сварки термического цикла не ухудшается.

Эксперименты, проведенные по изучению влияния термодформационного цикла сварки на стойкость против ЗВР стали Ст3 и стали повышенной прочности типа X-60 позволяют назвать две основные причины понижения сопротивляемости сварных соединений в увлажненном сероводороде:

1. Неблагоприятное структурное состояние в зоне термического влияния, являющееся результатом неравновесного охлаждения из области структурных превращений;

2. Повышенный уровень механических напряжений в зоне сварного соединения за счет остаточных сварочных деформаций и концентрации напряжений в районе возможных дефектов.

Преобладающее значение в снижении стойкости против ЗВР для материалов, сопротивляемость которых резко чувствительна к структурному состоянию (сталь типа X-60), играют условия охлаждения из области структурных превращений; для материалов, менее подверженных воздействию структурного фактора (Ст3), превалирующую роль играют дополнительные механические напряжения.

Глава IV. ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ СТОЙКОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В УВЛАЖНЕННОМ СЕРОВОДОРОДЕ

Анализ полученной экспериментальной информации позволяет нам определить пути повышения стойкости сварных соединений малоуглеродистых сталей в средах, содержащих увлажненный сероводород.

Для сварных конструкций, наводороживаемых в процессе эксплуатации, необходимо применять специально подобранные материалы. Критерием оптимальности являются: во-первых, стойкость основного металла против ЗВР, она определяется техническими условиями отрасли и измеряется долговечностью образцов из основного металла; во-вторых, устойчивость против ЗВР при охлаждении из области структурных превращений с наибольшей скоростью охлаждения, присущей используемо-

му методу сварки. По результатам испытаний сварных образцов можно сказать, что в отношении второго критерия малоуглеродистая сталь СтЗ значительно лучше стали повышенной прочности типа X-60. Ручная дуговая сварка стали СтЗ в нормальных технологических условиях не уменьшает стойкости против ЗБР в зоне влияния по сравнению с исходным состоянием основного материала.

Необходимым условием повышения стойкости сварного соединения против ЗБР является снижение уровня остаточных сварочных напряжений. Однако, методы повышения стойкости, основанные только на уменьшении величины напряжений, например, путем холодной пластической деформации шва и околошовной зоны, видимо нельзя считать достаточно эффективными. В сварном соединении в результате неконтролируемых отклонений технологического режима всегда может оказаться материал с незначительным сопротивлением водородному разрушению. В этом случае интенсивное трещинообразование в сварном соединении будет продолжаться под действием одних рабочих напряжений.

Наиболее целесообразным методом повышения стойкости против ЗБР является местный отпуск сварных соединений. При высоком отпуске не только снижаются остаточные сварочные напряжения, но и восстанавливаются свойства металла на "ухудшенных" неравновесным охлаждением участках. Проработка режимов термообработки в лабораторных условиях на образцах показала, что нижний температурный предел и период восстановления сопротивления ЗБР у мягкой стали СтЗ значительно ниже (400°C), чем у стали типа X-60 (550°C). Следовательно, применение стали СтЗ в равных технологических условиях гарантирует более надежный результат.

Параллельно изучалась возможность использования замеров твердости в качестве приемочного критерия после термообработки. Было установлено, что нестойкое против ЗБР структурное состояние — результат неравновесного охлаждения из области структурных превращений — хорошо идентифицируется по уровню твердости. Для исследованных сталей изменение твердости составило около 80-100 НВ. Однако, после отпуска при температуре и времени, достаточных для восстановления сопротивляемости и снятия остаточных напряжений, наблюдается лишь небольшое понижение твердости. Материалу с высокой стойкостью соответствует достаточно высокая твердость — около 200 НВ. Применяемый сегодня приемочный уровень твердости HB180 для шва и зоны термического влияния может приво-

доть к забракованию вполне пригодных стыков труб. Доведение твердости в этих случаях до регламентируемого значения при ограниченных температурах нагрева приводит к существенному увеличению длительности термообработки. Более целесообразным с точки зрения гарантии результатов отпуска возможно является надежная система регистрации параметров режима термообработки и ужесточенный пооперационный контроль.

Глава У. КИНЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСТРЕСКИВАНИЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ НАПРЯЖЕНИЙ И СРЕДЫ

Использованный нами экспериментальный метод в сочетании с принятым способом интерпретации результатов дает возможность получить сравнительную оценку стойкости материалов и их состояний, но не позволяет количественно прогнозировать работоспособность материала во времени при воздействии агрессивной среды. Характеристики, получаемые при сравнительных испытаниях образцов весьма условны, они не могут переноситься на реальные конструкции. Такое положение связано в первую очередь с отсутствием математической модели замедленного трещинообразования под действием напряжений и среды. Нами делается попытка создания кинетической модели растрескивания в условиях комплексного воздействия.

Физической основой модели является линейная механика разрушения. В уравнение Гриффитса вводятся дополнительные члены, учитывающие изменение свойств материала (удельная эффективная энергия) и ситуации в вершине трещины (притупление за счет растворения, деконцентрации при коррозионном ветвлении, накопление газообразного водорода высокого давления в замкнутой трещине). Принимая некоторые упрощающие допущения (линейность взаимодействия материала со средой во времени) мы получаем количественные зависимости скорости роста трещины, как отношения длины отдельного скачка ко времени на его подготовку и долговечности материала от уровня механических напряжений. Рассчитанные по выведенным формулам функции имеют хорошую сходимость с распространенными способами аппроксимации экспериментальных результатов. Предложенная кинетическая модель не только включает в себя известные основные черты замедленного коррозионного разрушения, например, K_{13} , K_{1acc} , но и выводит новые, ранее неизвестные параметры состояния: P — обобщенная характеристика взаимодействия, σ_R — предельные напряжения и другие.

Разработка специального эксперимента для получения этих величин, количественно определяющих процесс развития трещин под действием напряжений и среды, может послужить основой способа прогнозирования работоспособности реальных конструкций по результатам лабораторных испытаний образцов.

О Б Щ И Е В Ы В О Д Ы

I. Разработана методика исследования склонности металла и сварного соединения к замедленному водородному разрушению:

I.1. Предложен способ раздельной оценки роли факторов при комплексных воздействиях, основанный на статистических методах планирования эксперимента. Результаты опытов представляются в виде полиномиальной модели, коэффициенты которой соответствуют вкладу отдельных факторов и их взаимодействий в общий результат процесса. Особенность предложенного метода заключается в одностороннем, асимметричном изменении факторов от нулевого уровня. План эксперимента и расчетные формулы построены таким образом, что каждый из компонентов вектора — оценки имеет необходимый физический смысл.

I.2. Сконструировано оборудование и определена экспериментально с использованием плана случайного баланса технология сравнительных испытаний в среде увлажненного сероводорода при постоянной нагрузке, позволяющая получать воспроизводимые результаты по замедленному водородному разрушению.

I.3. Обосновано применение критерия — общей долговечности образца, характеризующей склонность материала к распространению водородного разрушения.

I.4. Показано, что использование изменения механических характеристик при наводороживании в качестве критерия склонности к замедленному водородному разрушению неэффективно. Большую часть периода разрушения механические характеристики почти не изменяются, и, следовательно, не имеют достаточной корреляции с процессом трещинообразования.

I.5. Усовершенствована методика испытания образцов-имитаторов зон сварного соединения: сконструировано лабораторное оборудование для получения упрощенных термодеформационных циклов, разработана программа эксперимента, позволяющего оценить индивидуальную роль факторов и их взаимодействий.

2. В результате испытания образцов - имитаторов из малоуглеродистой стали Ст3 и стали повышенной прочности типа X-60 на замедленное водородное разрушение;

установлены главные факторы, определяющие повышенную склонность сварных соединений к водородному разрушению - интенсивное охлаждение из области структурных превращений, приводящее к образованию неравновесной структуры, и повышенный уровень механических напряжений в сварном соединении за счет остаточных деформаций и концентрации напряжений в районе дефектов и неблагоприятной геометрии шва;

предложен необходимый критерий пригодности стали для изготовления сварных конструкций, эксплуатируемых в наводороживающих средах - устойчивость против водородного разрушения после охлаждения со сварочной скоростью с температуры, превышающей точку A_1 ;

установлено, что мягкая малоуглеродистая сталь Ст3 по выработанному критерию лучше стали повышенной прочности типа X-60, теряющей под действием сварки сопротивление ЗВР почти во всем диапазоне механических напряжений;

установлена ограниченная эффективность мероприятий по повышению стойкости, основанных на одном устранении остаточных напряжений, в реальных сварных соединениях всегда может присутствовать материал с незначительной сопротивляемостью ЗВР;

установлены ориентировочные границы режимов высокого отпуска, снижающего остаточные сварочные напряжения и восстанавливающего сопротивление водородному разрушению в зоне неравновесных структур - часовая выдержка при температуре 550-680°C.

3. Разработана кинетическая модель растрескивания под действием напряжений и среды. Математический аппарат основан на соотношениях линейной механики разрушения и некоторых дополнительных условиях, отражающих действие агрессивной среды на стабильную трещину. Количественные характеристики, полученные с использованием модели, имеют хорошую сходимость с распространенными способами аппроксимации экспериментальных зависимостей долговечности материала от уровня нагрузки. Реализация специальных экспериментальных методов, позволяющих определять необходимые, введенные моделью характеристики растрескивания, может дать возможность прогнозирования работоспособности несущих конструкций в агрессивных средах по результатам лабораторных испытаний образцов.

Материалы диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Предотвращение коррозионного растрескивания сварных переходных патрубков ГТ-700-5. Газовая промышленность. с. 29-30, № 2, 1974.

2. Оценка влияния технологических факторов на зарождение и развитие коррозионных трещин. Физико-химическая механика материалов № 3, 1974, с. 10-13.



Рис. 1 Поиск доминирующего фактора (сталь типа X-60)

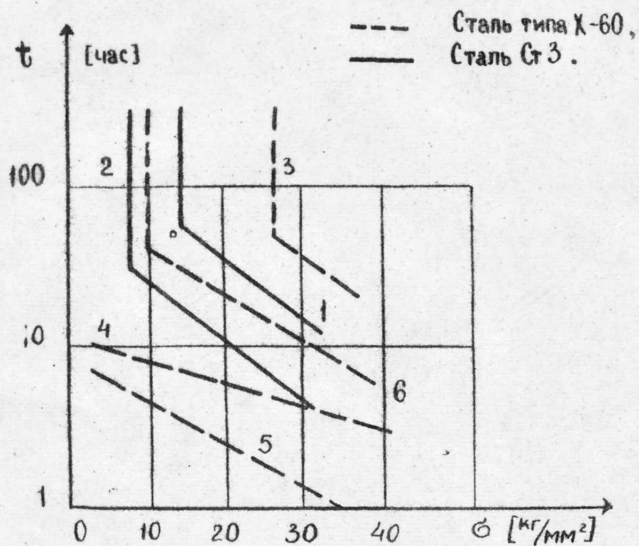


Рис. 2 Сопоставление поведения Ст3 и стали типа X-60
 1,3 - состояние поставки; 2,4 - имитатор X_3 ;
 1,6 - сварное соединение; 2,5 - переохлажденное
 сварное соединение.