

М174652

Министерство высшего и среднего специального образования СССР

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

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

Канд. техн. наук О. И. СТЕКЛОВ

**СТОЙКОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ
И КОНСТРУКЦИЙ ПРИ КОРРОЗИИ
В НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ**

(Специальность 05.167 — Машины и технология сварочного
производства)

Диссертация написана на русском языке

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

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

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Фролов В. В.,
доктор технических наук, профессор Лившиц Л. С.,
доктор химических наук, Куртепов М. М.

Ведущее предприятие — НИИХИММАШ

Автореферат разослан « »

1972 г.

Защита диссертации состоится « » 1972 г.
на заседании специализированного Совета по машинам и
технологии сварочного производства МВТУ им. Баумана по
адресу: Москва 107005, Бауманская 5

С диссерт
им. Н. Э. Б

е МВТУ

Ваши от
ренные печ

, заве-
адресу.

Ученый

М174652

ВВЕДЕНИЕ

Значительная часть сварных соединений и конструкций работает в коррозионно-активных внешних средах, которые могут оказывать комплексное воздействие на металл: коррозионное (химическое и электрохимическое), сорбционное (адсорбционное и абсорбционное), эрозивно-кавитационное и др.

Применение сварки и смежных процессов позволяет создавать конструкции, надежно работающие в сложных коррозионных условиях. Вместе с тем известны многочисленные и многообразные случаи отказа сварных конструкций, вызванные необратимым изменением металла сварных соединений под воздействием коррозионных сред. Разрушения связаны: а) с повышенной термодинамической и электрохимической неустойчивостью сварных соединений, вызванной теплофизическим и химико-металлургическим воздействием процесса сварки; б) с неправильными предпосылками по выбору материалов, расчету и технологии изготовления сварных конструкций; в) с тенденцией к повышению параметров технологических установок (давления, температуры, агрессивности сред).

Опасность коррозионных разрушений сварных соединений и конструкций сдерживает темпы развития химической, атомной, газовой, нефтяной и других отраслей промышленности, предусмотренные решениями XXIV съезда КПСС и директивами пятилетнего плана.

Несмотря на опасность разрушений и актуальность этой проблемы, вопросам коррозии сварных соединений и конструкций до последнего времени не уделялось должного внимания, поэтому раздел сварочной науки – эксплуатационная прочность сварных соединений и конструкций в активных средах – разработан значительно в меньшей степени, чем, например, технологическая и конструктивная прочность. В настоящее время исследования по коррозии сварных соединений и конструкций проводятся в ряде общесоюзных и отраслевых НИИ, в вузах и на предприятиях: ИЭС им. Патона, НИИХИММАШ, ВИАМ, НИАТ, НИКИМТ, ВНИИСТ и др., МВТУ им. Баумана, ЛКИ, ЗМИ, ВПИ и др. Определенный вклад в развитие этого вопроса внесли ряд советских и зарубежных исследователей: Г.В.Акимов, Г.А.Бельчук, А.Н.Галактионов, И.М.Казеннов, М.М.Кристал, М.М.Куртепов, Н.А.Лангер, Л.К.Замяркин, Б.И.Медовар, Н.Ю.Пальчук, Н.Д.Томашов, Д.Ф.Юрченко, Г.Л.Шварц, И.И.Фрумин, Л.Я.Ягупольская и др., В.Редекер, И.Класс, А.Лероу, Р.Бакер и др. С конца 40-х – начала 50-х годов традиционное внимание проблеме коррозионной стойкости уделялось на кафедре сварки МВТУ им. Баумана (Н.Ю.Пальчук, А.И.Акулов, Д.М.Шашин).

- 1 -

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1174652

Степлов О.И. Стойкость се

ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ

МВТУ
им. Н. Э. Баумана
БИБЛИОТЕКА

Однако, большинство исследований было посвящено решению частных задач для конкретных сплавов и сред. Хотя сварные конструкции работают в условиях сложного напряженного состояния, вызванного наличием собственных, сборочно-монтажных и эксплуатационных упруго-пластических деформаций, разработка научных основ стойкости сварных соединений в напряженном состоянии далека от завершенности. Мало разработаны научно-обоснованные методики лабораторных испытаний сварных соединений, учитывающие специфику напряженного состояния в сварных конструкциях. Следует подчеркнуть, что механизм влияния многих факторов, например, жесткости схемы напряжений, пластической деформации, потенциальной энергии и др. изучен недостаточно или не ясен не только для сварных соединений, но и для основного металла.

Целью диссертационной работы являлась разработка научных основ стойкости сварных соединений и конструкций преимущественно оболочкового типа (емкости, сосуды-реакторы, трубопроводы), выполненных сваркой плавлением, при коррозии в напряженном состоянии.

Задачами, раскрывающими цель работы, являются:

1. Установление особенностей, причин и механизмов коррозионных разрушений сварных соединений и конструкций путем проведения следующих исследований:

1.1. Установление связи между теплофизическим и химико-металлургическим воздействием процесса сварки (ТФХМВ) и склонностью металла сварных соединений к коррозионным разрушениям.

1.2. Исследование влияния основных факторов напряженного состояния: величины, знака, жесткости схемы, концентрации упруго-пластических деформаций на стойкость металлов и их сварных соединений против коррозионных разрушений.

1.3. Анализ характерных механизмов коррозионных разрушений сварных соединений в напряженном состоянии.

2. Разработка методики оценки стойкости сварных соединений и конструкций при коррозии, учитывающей ТФХМВ и напряженное состояние в конструкциях.

3. Обоснование и разработка путей и методов повышения стойкости сварных конструкций.

В соответствии с поставленными задачами работа состоит из четырех разделов:

1. Анализ коррозионных разрушений основного металла в напряженном состоянии.

2. Разработка методики оценки стойкости сварных соединений и конструкций при коррозии.

3. Исследование влияния основных факторов напряженного состояния и механизмов коррозионного растрескивания сварных соединений.

4. Пути и методы повышения стойкости сварных соединений и конструкций против коррозионных разрушений.

Исследуемые материалы (низкоуглеродистые и нержавеющие стали, алюминиевые, титановые и никониевые сплавы), их толщины (0,8+20 мм), конструкции (сосуды и трубопроводы), среды (производственные и для ускоренных испытаний) выбраны исходя из их важности, объема и перспектив применения в химической промышленности, новой технике и других отраслях.

Диссертация содержит 401 страницу, в том числе 33 таблицы, 118 илл. и библиографию 254 наименования.

1. АНАЛИЗ КОРРОЗИОННЫХ РАЗРУШЕНИЙ ОСНОВНОГО МЕТАЛЛА В НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ

Стойкость при коррозии — $\bar{K}$ металлических, в том числе сварных конструкций, определяют три основных условия:

1) Свойства металла — $\bar{M}$, зависящие от исходных, "наследственных" свойств (M_H) и их изменения (M_T) под влиянием технологических процессов M_T при изготовлении конструкций.

2) Напряженное состояние — $\bar{H}$ конструкций, которое характеризуется величиной, знаком, жесткостью схемы, концентрацией, градиентом, цикличностью упруго-пластических деформаций ($G_i, \bar{H}$), запасом и концентрацией потенциальной энергии ($W_i, \bar{H}$), зависящих от конструкции изделия, технологии его изготовления и условий эксплуатации.

3) Воздействие коррозионной среды — $\bar{C}$, которое проявляется в коррозионных, сорбционных, температурных и механических явлениях. Степень влияния определяется составом среды (C_x) и внешними условиями (C_B); температурой, давлением, условиями контактирования с металлом.

Таким образом,
$$\bar{M} + \bar{H} + \bar{C} \rightarrow \bar{K}$$
$$(M_H + M_T) + (G + W) + (C_x + C_B)$$

В зависимости от сочетания и степени влияния основных условий ($\bar{M}$, $\bar{H}$, $\bar{C}$) и факторов, их определяющих (M_H , M_T , G , W , C_x , C_B) возникают различные типы и виды коррозионных разрушений: общая коррозия, когда роль напряженного состояния не велика, ускоренная местная коррозия, коррозионно-усталостные (статические, повторно-статические, циклические) разрушения хрупкого типа, характеризующиеся развитием магистральной трещины при малой величине макропластической деформации.

В работе рассматриваются преимущественно разрушения последнего типа при статическом нагружении (коррозионное растрескивание), как один из наиболее опасных и недостаточно изученных типов коррозионных разрушений металлических конструкций. При коррозионном растрескивании важное значение имеют все три основных условия разрушения ($\bar{M}, \bar{N}, \bar{C}$). Существующие гипотезы и теории коррозионного растрескивания делятся на три основные группы: электрохимические, согласно которым определяющим фактором в растрескивании является электрохимическая коррозия, ускоряемая действием напряжений; механо-электрохимические, по которым определяющим являются механические напряжения при сопутствующем влиянии среды; сорбционно-электрохимические теории, в которых наряду с механическим и коррозионным факторами учитываются адсорбционные и абсорбционные явления.

Очевидно, что преобладающий механизм разрушения зависит от конкретных основных условий ($\bar{M}, \bar{N}, \bar{C}$). Наиболее универсальным, по нашему мнению, является коррозионно-механо-сорбционный механизм, учитывающий совместное и одновременное влияние коррозионных (k) (электрохимических и химических), механических (m) и сорбционных (s) (адсорбционных и абсорбционных) процессов. Однако, роль этих процессов может быть различной при различных внешних условиях и на разных стадиях разрушения. В связи с этим, определяющим может быть и коррозионный, и механический, и сорбционный процесс.

В работе дается качественный анализ коррозионного растрескивания с позиций хрупкого разрушения. Специфичность коррозионного растрескивания, как особого типа хрупкого разрушения, проявляется в характерных скоростях растрескивания.

$K_{o.k.} \ll K_{k.p.} \ll K_{x.p.}$, где $K_{o.k.}$, $K_{k.p.}$, $K_{x.p.}$ - соответственно, скорости общей коррозии, коррозионного растрескивания и хрупкого разрушения без коррозионно-активной среды.

Основным условием хрупкого разрушения является концентрация упруго-пластических деформаций (УПД) в вершине развивающейся трещины. Коррозионная среда оказывает двойное влияние на концентрацию УПД и процесс хрупкого разрушения. На начальной стадии (в инкубационный период) среда способствует концентрации УПД в связи с появлением локальных микрокоррозионных поражений. Однако, на стадии развития трещины вступает в действие механизм "деконцентрации" обусловленный рядом явлений: а) уменьшением радиуса кривизны " ρ " концентратора, вследствие интенсивного анодного растворения вершины трещины, что приводит, согласно условию Инглиса $\sigma_m = \sqrt{2\pi} (2\sigma_p)^{1/2}$ к увеличению критического напряжения (σ_m) развития трещины

(в) и замедлению её ; б) возникновением в вершине магистральной трещины сетки сопутствующих "дочерних" коррозионных трещин; в) увеличенной плотностью концентраторов на единице поверхности при большом числе локальных коррозионных поражений; г) "растворением" концентраторов, вследствие общей коррозии. Таким образом, явление "деконцентрации" УПД определяет специфику коррозионного разрушения, как особого типа хрупкого разрушения. В обоснование этих соображений на титане, обладающем высокой чувствительностью к концентрации напряжений, проведены экспериментальные исследования для случая коррозионно-механо-сорбционного (к-м-с) механизма (бромисто-метаноловые среды) и сорбционно-механо-коррозионного (с-м-к) механизма (соляно-кислые среды). Варьируя составом сред, изменяли соотношение скоростей местной и общей коррозии. Коррозионное растрескивание имеет место при условиях:

$$\sigma_k \gg \sigma_m > \sigma_{кр} (\sigma_{пор}) ; \quad W > W_{кр} ;$$

$$K_{л.к.} (K_c) \gg K_{о.к.} > 0 ; \quad n < n_{кр} < 0$$

где σ_k , σ_m , $\sigma_{кр}$ — напряжения в концентраторе, в основном металл, критические (пороговые). $K_{л.к.}$, $K_{о.к.}$, K_c — скорости локальной и общей коррозии и сорбции, n — число концентраторов.

Помимо коррозионного и сорбционного факторов в работе рассмотрено влияние температуры на изменение упруго-пластического состояния металла и растрескивание.

С учетом коррозионного, сорбционного и температурного влияния среды критериальное уравнение хрупкого разрушения Гриффитса-Орована принимает вид:

$$\sigma_{кр} \gg \sqrt{\frac{2E\psi}{\pi l}} = \sqrt{\frac{2E(\alpha\gamma_0 + \beta\gamma_s + \gamma_r)}{\pi l}}$$

где $\sigma_{кр}$ — критическое напряжение развития трещины, ψ — энергия образования единицы поверхности, γ_0 , γ_r — истинная поверхностная энергия и энергия пластической деформации без влияния среды, γ_s — энергия "деконцентрации", α , β , γ_s — коэффициенты, учитывающие, соответственно, влияние адсорбции, абсорбции и температуры. Рассмотрена также применимость других критериальных уравнений хрупкого разрушения в рамках как "энергетического", так и "силового" подходов. Кинетика растрескивания определяется механизмом разрушения. Трещина может развиваться: непрерывно, вследствие анодного растворения вершины трещины, интенсифицированного напряжениями; вследствие образования новых поверхностей при механическом упруго-пластическом деформировании, интенсифицированном коррозионной средой; прерывисто путем чередования актов преимущественно коррозионного или механического разрушения.

Стойкость сварных соединений и конструкций при коррозии, как и основного металла, определяется тремя основными условиями: свой-

ствами металла $\bar{M}$, напряженным состоянием $\bar{H}$ и коррозионно-активной средой $\bar{C}$. Отличия и специфические особенности, определяющие стойкость сварных соединений вызваны ТФХМВ сварки (рис.1). Этими особенностями являются:

1. Повышенная восприимчивость металла сварных соединений к воздействию коррозионной среды, которая связана с повышенной макро и микронеоднородностью, термодинамической и электрохимической неустойчивостью сварного соединения.

2. Более сложное и неблагоприятное напряженное состояние, характеризующееся: а) локализацией остаточных упруго-пластических деформаций и потенциальной энергии в сварных соединениях, металл которых обладает повышенной восприимчивостью к коррозии, б) наличием технологических и конструктивных концентраторов напряжений.

Сочетание основных условий ($\bar{M}, \bar{H}, \bar{C}$) и отмеченные обстоятельства определяют типы и виды коррозионных разрушений сварных соединений: общую (равномерную и сосредоточенную) коррозию, местную (структурную, точечную, питтинговую) коррозию, коррозионную усталость (статическую, повторно-статическую, циклическую).

Возникновение и развитие коррозионного разрушения $K(y)$ в той или иной зоне сварного соединения определяется соотношением энергетических факторов $\Xi(y)$ и физико-химических факторов, характеризующих сопротивляемость $R(y)$ металла, т.е. способность противостоять коррозионным и силовым нагрузкам. Условием коррозионного разрушения в определенной зоне сварного соединения является

$K_y = \frac{\Xi(y)}{R(y)} \rightarrow \max$, где энергетический фактор $\Xi(y)$ отражает степень термодинамической неустойчивости, определяемой величиной и распределением электрохимических потенциалов $\psi(y)$ и напряженности $(\sigma \div W)(y)$.

2. РАЗРАБОТКА МЕТОДИК ДЛЯ ОЦЕНКИ СТОЙКОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ И КОНСТРУКЦИЙ ПРИ КОРРОЗИИ В НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ

Решение поставленных задач вызвало необходимость разработки новых методик испытаний, учитывающих специфические особенности сварных соединений и конструкций. Существующие методы оценки стойкости сварных соединений при коррозии не стандартизированы в связи с их недостаточной разработкой.

Оценка коррозионной стойкости сварных соединений и конструкций может производиться на основании: а) лабораторных, стендовых и натурных испытаний образцов; б) стендовых испытаний сварных узлов; в) натурных эксплуатационных испытаний сварных узлов и конструкций.

Лабораторные, стендовые и натурные испытания образцов целесообразно проводить в два этапа: 1) испытания без нагрузки на стойкость против общей и местной коррозии. Эти испытания необходимы, но не достаточны для оценки стойкости металла; 2) оценка стойкости против коррозии в напряженном состоянии при благоприятных результатах испытаний первого этапа.

Актуальной задачей является разработка ускоренных лабораторных методов испытаний, которые отражают условия работы сварных соединений в конструкциях и позволяют оценивать влияние различных технологических и конструктивных факторов сварки.

Содержанием 2-го раздела диссертации является разработка следующих методик:

- методики исследования неоднородности сварных соединений и влияния факторов неоднородности на коррозию;
- методики оценки стойкости при коррозионных испытаниях образцов без нагружения;
- методики коррозионных испытаний в напряженном состоянии.

Методика оценки влияния неоднородности свойств сварных соединений на коррозию. Стойкость сварных соединений против коррозионных разрушений определяется неоднородностью, вызванной теплофизическим и химико-металлургическим воздействием сварки. Основными видами неоднородности, влияющими на коррозионную стойкость, являются: структурно-химическая макро и микронеднородность; неоднородность упруго-пластического состояния; геометрическая неоднородность. Эти виды определяют физическую, механическую и электрохимическую неоднородность. Разработанная методика позволяет оценивать влияние каждого из основных видов неоднородности и их сочетаний на процессы и механизмы коррозионных разрушений и, на основании этого, рекомендовать эффективные меры по повышению стойкости. Методически исследование влияния неоднородности сварных соединений на коррозию разделяется на следующие этапы:

а) Анализ неоднородности сварного соединения как сложной гетерогенной системы, т.е. определение величины и распределения различных видов неоднородности сварных соединений. Для исследования на данном этапе наряду с общепринятыми методами разработаны и усовершенствованы ряд методов: испытание на изгиб, метод ТЭП, электрохимический.

б) Исследование влияния различных видов неоднородности и их сочетаний на коррозионное поведение с целью выявления наиболее опасных видов. На этом этапе в образцах из основного металла дифференцированно воспроизводятся термомеханические процессы, происходящие в различных зонах сварного соединения. Далее, путем сравнитель-

них коррозионных испытаний имитационных образцов выявляется роль каждого из видов неоднородности и их сочетаний на коррозию сварных соединений.

в) Заключительный этап синтезирует результаты предыдущих, предусматривая проведение лабораторных и натурных испытаний сварных образцов и узлов, включающих в себя весь характерный комплекс неоднородности.

Методики оценки стойкости сварных соединений при коррозионных испытаниях. Применительно к коррозионным испытаниям в ненапряженном состоянии усовершенствованы весовой метод оценки коррозионной стойкости и оценка по результатам механических испытаний на изгиб с учетом ТФХМВ. Испытание на изгиб позволяет дифференцированно оценивать несущую и деформационную способность металла во всех зонах сварного соединения до и после коррозии. Перспективными механическими методами являются оценка стойкости по результатам двухосных испытаний на изгиб и растяжение.

В разработанных методиках коррозионных испытаний в напряженном состоянии предусматривается создание напряженного состояния: а) с помощью регулируемого поля остаточных сварочных напряжений с задаваемой жесткостью схемы напряжений от одноосного до двухосного; б) с помощью внешней нагрузки, создаваемой гидравлическим и механическим способами для условий двухосного нагружения и для сравнительных одноосных испытаний; в) путем создания суммарного напряженного состояния от остаточных сварочных напряжений и от внешней нагрузки.

На основании анализа остаточных сварочных упруго-пластических деформаций в различных типах сварных соединений с продольными, крестовыми, параллельными и круговыми швами, исследованных на разных сплавах, установлено, что наиболее полно поставленным требованиям отвечают сварные образцы с круговым швом. Исследовано влияние диаметра шва, размеров и толщины образцов. На основании проведенных исследований для оценки стойкости сварных соединений против коррозионного растрескивания рекомендуется дисковый образец с круговым швом. Образец имеет осесимметричное двухосное поле остаточных упруго-пластических деформаций, величина и жесткость схемы которых может регулироваться диаметром шва и образца, и высокий запас потенциальной энергии. Оптимальные размеры образца: $D_{\text{ср}} = 130-150$ мм, $D_{\text{шва}} = 20-40$ мм, $\delta = 3-6$ мм.

С целью унификации способа внешнего нагружения при испытании различных типов сварных образцов и узлов, имитирующих сварные соединения оболочковых конструкций, разработана общая гидравлическая

и электрическая схема, позволяющая осуществлять статическое и повторно-статическое нагружение образцов и макетов внутренним давлением. В работе развивалась методика испытаний на двухосных изгиб, которая имеет определенные преимущества перед испытанием на двухосное растяжение: меньшие размеры и простота изготовления образца и установки, большая чувствительность испытаний на изгиб к изменению свойств на поверхности металла, вызванного коррозионными процессами. Разработано два вида испытаний на двухосный изгиб с использованием дисковых малогабаритных образцах с заданным собственным напряженным состоянием: а) с "постоянной нагрузкой" с помощью одно и многосекционных установок, позволяющих осуществлять статическое и повторно-статическое нагружение образцов гидравлическим путем, б) испытания с постоянной "деформацией", создаваемой механическим двухосным изгибом.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОСНОВНЫХ ФАКТОРОВ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ И МЕХАНИЗМОВ КОРРОЗИОННОГО РАСТРЕСКИВАНИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Элементы электрохимической термодинамики и кинетики коррозии сварных соединений. В результате ТФХМВ при сварке происходит изменение свойств металла (М) и напряженного состояния (Н). В связи с этим, изменение изобарно-изотермического потенциала Гиббса ΔG и, соответственно, электрохимического потенциала $\Delta \psi$, вызванное ТФХМВ, определится выражением

$$\Delta G_e = \Delta G_e^M + \Delta G_e^H + \Delta G_e^N$$

$$\Delta \psi_e = \Delta \psi_e^M + \Delta \psi_e^H + \Delta \psi_e^N,$$

$\Delta G_e^M, \Delta \psi_e^M, \Delta G_e^H, \Delta \psi_e^H, \Delta G_e^N, \Delta \psi_e^N$ — соответственно, изменения термодинамических и электрохимических потенциалов собственно самого металла, его поверхности и в связи с изменением напряженного состояния (рис.1).

Сварное соединение характеризуется повышенной, по сравнению с основным металлом, термодинамической и, соответственно, электрохимической неоднородностью двух видов:

а) Макроэлектрохимической неоднородностью, обусловленной различием потенциалов в разных зонах сварного соединения. Количество вариантов (N) соотношений усредненных макропотенциалов в характерных зонах сварных соединений, в том числе разнородных металлов, определяется выражением:

$$N = P_n + \sum_{m=2}^n \frac{n!}{m!} \cdot \frac{m!}{(n-m)!} \cdot (n-m+1),$$

где P, C - перестановки и сочетания из числа характерных макропотенциалов "И" в сварном соединении.

б) Локальной электрохимической неоднородностью, обусловленной структурной и химической микрон неоднородностью в пределах каждой зоны, определяемой разбросом потенциала $\Delta\varphi = \Delta\varphi_{\text{max}} - \Delta\varphi_{\text{min}}$, где φ_i - единичное значение потенциала в некоторой точке.

Анодное растворение сварных соединений происходит по гетерогенно-электрохимическому механизму вследствие макроразнообразия (а) и вследствие "само растворения" различных зон сварного соединения (б), которое принципиально возможно по гетерогенно- и гомогенно-электрохимическому и химическому механизмам. В зависимости от неоднородности сварного соединения, природы основного металла и сварного шва, условий коррозии, определяющим будет являться тот или другой механизм коррозии. Результаты электрохимических исследований, проведенных на титановых сплавах (кислые среды) и алюминиевых сплавах (азотнокислые среды), подтверждают изложенные представления.

Наряду с анодными процессами растворения, разрушение сварных конструкций может быть вызвано изменением несущей и деформационной способностей металла под действием реагентов среды, вызывающей сорбционный (адсорбционный и абсорбционный) эффект понижения прочности. Наибольшее влияние на работоспособность конструкций оказывает наводороживание при коррозии, например, титановых сплавов в кислых средах, и сталей во влажных средах, содержащих сероводород.

Исследование влияния основных факторов напряженности I рода (знака, вида, величины, жесткости схемы, потенциальной энергии напряжений I рода) на коррозионное растрескивание сварных соединений. Исследования проводились преимущественно при двухосном напряженном состоянии, характерном для оболочковых конструкций на сплавах с различной чувствительностью к концентрации напряжений, и степенью упрочнения: стали Ст.3сп ($A=63-70 \text{ кг/мм}^2$, $n=0,16$), Х18Н10Т ($A=148 \text{ кг/мм}^2$, $n=0,34$), титановом сплаве ОТЧ ($A=136 \text{ кг/мм}^2$, $n=0,1$). Испытания проводились при внешнем нагружении ($\sigma_{\text{вн}}$), при регулируемом напряженном состоянии, вызванном остаточными сварочными напряжениями ($\sigma_{\text{ост}}$), при суммарных напряжениях - остаточных сварочных и от внешней нагрузки: ($\sigma_{\text{вн}} + \sigma_{\text{ост}}$).

Анализ характера коррозионного растрескивания сварных соединений в различных типах сред (щелочи, кислоты, соли, органические среды) показал: а) в случае равностойкости металла к воздействию коррозионной среды траектория трещины в условиях двухосного рас-

тяжения нормальна эквивалентной результирующей главных растягивающих компонентов ; б) в случае неравностойкости металла к воздействию коррозионной среды направление развития трещины определяется совместным влиянием эквивалентной результирующей главных напряжений и расположением зон с повышенной восприимчивостью к коррозионному воздействию.

Увеличение напряжений (как $\sigma_{\text{м}}$, так и $\sigma_{\text{ост}}$) способствует ослаблению и нарушению защитных пленок, вызывает увеличение концентрации упруго-пластических деформаций в микротрещинах и в вершине развивающейся трещины, интенсифицирует протекание механических и, связанных с концентрацией деформаций, коррозионных и сорбционных процессов, что приводит, в итоге к ускорению коррозионного растрескивания (рис.2).

Зависимость инкубационного периода растрескивания $t_{\text{инк}}$ (времени до появления коррозионной трещины) от действующих растягивающих напряжений I рода описывается приближенным уравнением типа:

$$t_{\text{инк}} \approx A \cdot e^{\frac{B}{\sigma - \sigma_{\text{пор}}}} = A \cdot e^{\frac{B}{\sigma_{\text{м}} + \sigma_{\text{ост}} - \sigma_{\text{пор}}}}$$

где $\sigma_{\text{пор}}$ - критические "пороговые" напряжения, ниже которых растрескивание при данных условиях не происходит, A - временной коэффициент, B - коэффициент напряженности, зависящие от свойств металла (M), напряженного состояния (N) и среды ($\bar{C}$).

Остаточные сварочные напряжения, суммируясь по закону суперпозиции с напряжениями от внешней нагрузки, резко ускоряют процесс растрескивания как для металлов, обладающих высокой деформационной способностью и степенью упрочнения, так и для металлов с относительно низкими значениями этих показателей. В связи с существенной ролью остаточных напряжений (как при наличии, так и при отсутствии внешней нагрузки) оценивалась их релаксация в инкубационном периоде и при растрескивании. При выдержке сварных соединений в течение времени, меньшего инкубационного, а также при равномерной общей коррозии, существенного снятия и перераспределения остаточных сварочных напряжений не происходит. Таким образом, остаточные сварочные напряжения в течение всего инкубационного периода являются потенциальным источником разрушения. Резкое изменение напряженного состояния установлено на стадии развития коррозионной трещины, в случае интенсивной сосредоточенной общей коррозии и при наводороживании гидридообразующих металлов.

С целью предотвращения трещин в течение эксплуатационного периода ($t_{\text{экспл}} < t_{\text{инк}}$) в конструкциях, которые эксплуатируются в средах, вызывающих растрескивание, необходимо снятие остаточных напряжений, исходя из следующих критериев: а) остаточ-

ние напряжения следует снимать до уровня, меньшего величины пороговых напряжений в данной среде с учетом эксплуатационных напряжений, т.е. $\sigma_{ост} \leq \sigma_{пор} - \sigma_{вн}$.

б) недопустимость при обработке (термической, механической, термо-механической), направленной на снятие остаточных напряжений, появления неблагоприятных структурных и фазовых изменений в металле, повышающих его восприимчивость к растрескиванию.

В работе установлено влияние жесткости схемы напряженного состояния на коррозионное растрескивание. Сущность этого явления заключается в интенсификации основных совместных и сопряженных механических, коррозионных и сорбционных процессов коррозионного растрескивания с увеличением жесткости схемы. Для сварных соединений с жесткой схемой собственных напряжений (круговые швы малых диаметров, крестовые швы) характерна большая величина напряжений I и II рода и выше запас потенциальной энергии.

Из анализа влияния потенциальной энергии, которая определялась аналитически с учетом экспериментального распределения напряжений, вытекает: а) в конструкциях, работающих под давлением, общий запас потенциальной энергии от нагрузки ($W_{экспл}$) значительно превышает запас собственной потенциальной энергии от технологических операций ($W_{техн}$). Однако, удельное значение W_i технологической энергии, в частности, остаточных сварочных напряжений, значительно выше эксплуатационной $W_{экспл} > W_{техн}$; $W_{i\text{экспл}} < W_{i\text{техн}}$. Очевидно, "технологическая" потенциальная энергия $W_{техн}$, и, в первую очередь $W_{свар}$, ответственна за начальный этап развития трещин. "Эксплуатационная" потенциальная энергия $W_{экспл}$ ответственна за развитие магистральных трещин, приводящих к аварийному исходу.

Анализ влияния технологической пластической деформации на коррозионное растрескивание металлов и их сварных соединений.

Основными видами технологической пластической деформации в сварных соединениях и конструкциях являются: а) остаточные сварочные пластические деформации, возникающие при сварке в процессе формирования сварного соединения; б) сборочно-монтажные деформации при изготовлении конструкций. В работе приведен анализ влияния технологических деформаций, как основного источника напряженности II рода (σ_{II}^-, W_{II}^-). Изучено влияние холодной и высокотемпературной деформации и неоднородности её распределения на коррозионное растрескивание сварных соединений сталей Ст.3, Х18Н10Т, титана, без наличия собственных напряжений I рода и при наличии последних.

Пластическая деформация влияет на напряженное состояние ($\bar{\Pi}$) I-го и II рода и на чувствительность металла ($\bar{M}$) к растрескиванию. Влияние пластической деформации как холодной, так и высокотемпературной не однозначно. Это влияние может быть отрицательным и положительным в зависимости от конкретных условий: природы металла, степени деформации, деформационно-силовой схемы, коррозионной среды. Неоднозначное влияние технологической пластической деформации, как основного источника напряженности II рода при коррозионном растрескивании металлов, обусловлено, по-видимому, следующими обстоятельствами: а) увеличение степени деформации повышает плотность дислокаций и скрытую энергию деформации. Это увеличивает склонность металла как к механическому разрушению, так и, вследствие повышения химической активности, к коррозионному; б) второе обстоятельство связано со степенью неоднородности пластической деформации в пределах зерен и межзеренной, и со степенью концентрации напряженности II рода. Можно предположить, что при данном общем уровне скрытой энергии деформации, вероятность растрескивания тем больше, чем больше неоднородность и концентрация $\bar{\sigma}_I$, W_I и вероятность растрескивания тем меньше, чем больше "деконцентрированы" факторы напряженности II рода. В целом, влияние напряженности I рода более значительно по сравнению с влиянием напряженности II рода, вызванной пластической деформацией.

С целью повышения стойкости против растрескивания на стали Ст.3 и сплаве АМгб исследовано влияние местного пластического деформирования по деформационно-силовой схеме сжатия путем холодной и теплой прокатки и высокоскоростного импульсного деформирования. Рассмотренные методы снимают остаточные сварочные напряжения и повышают стойкость против растрескивания в широком диапазоне технологических режимов.

Влияние технологических концентраторов напряжений. Анализ коррозионных разрушений трубопроводов и емкостей показал, что коррозионное разрушение зависит от геометрической неоднородности сварных соединений и связано, в основном, с двумя типами дефектов формы шва: непроварами и усилением корня шва, контактирующих с коррозионной средой. Концентраторы напряжений способствуют коррозионному разрушению не только в средах, вызывающих коррозионное растрескивание (например, стали Ст.3 в щелочах), но и в большинстве других сред, где металл приходится в состоянии, близком к пассивному и склонен к местной коррозии.

Концентрация упруго-пластических деформаций приводит к разблагораживанию потенциала в вершине концентратора, вследствие нару-

шения защитной пленки и протекания локальной пластической деформации. Это, в свою очередь, вызывает интенсификацию коррозионного процесса. При наличии глубоких непроваров на явление концентрации накладывается эффект щелевой коррозии. На основании исследований, проведенных А.И. Антиповым, применительно к стыковым сварным соединениям трубопроводов из стали Х18Н10Т для сред на основе азотной кислоты, установлены критические напряжения в непроварах, где происходит резкое разблагораживание потенциала металла (рис.3). Для получения эксплуатационных показателей коррозии сварные узлы трубопроводов с определенными типами дефектов испытывались в специально спроектированном стенде при повторно-статическом нагружении с имитацией 9-ти летнего срока эксплуатации. Глубина коррозии "h" оценивалась по результатам металлографических исследований, которые были обработаны статистически. Установлены корреляционные зависимости $h = f(T, \sigma_k, t, c)$ как при раздельном влиянии каждого фактора, так и (с определенной доверительной вероятностью) при их совместном действии. Коэффициенты корреляции ζ , учитывающие влияние соответствующего параметра на глубину коррозии, располагаются по своей величине в последовательности: $\zeta_T = 0,538$; $\zeta_{\sigma_k} = 0,326$; $\zeta_t = 0,264$; $\zeta_c = 0,113$. Здесь T, σ_k, t, c - соответственно, время эксплуатации, напряжения в непроваре, глубина непровара, зазор между свариваемыми кромками.

В средах, вызывающих общую коррозию, влияние концентрации уменьшено вследствие явления "деконцентрации".

Некоторые механизмы коррозионного растрескивания сварных соединений. В заключение 3-го раздела диссертации рассмотрены некоторые характерные механизмы коррозионного растрескивания сварных соединений.

Коррозионное растрескивание Ст.3 сп и её сварных соединений в нитратах и щелочах происходит по коррозионно-механо-сорбционному (к-м-с) механизму межкристаллитного типа. Анализ растрескивания сварных конструкций в нитратах и щелочах показал, что разрушение происходит в характерных участках: а) в зоне максимальных остаточных напряжений; б) в дефектах формы шва; в) в околосшовной зоне. С целью выявления вида неоднородности, ответственного за растрескивание, применена описанная ранее методика. Стойкость стали Ст.3 сп при испытании в кипящих нитратах резко уменьшается с увеличением напряжений (при $\sigma > \sigma_{\text{нпр}} \sim 0,4 \sigma_T$), существенно увеличивается при нагреве металла по характерным термическим циклам сварки (при $T_{\text{max}} > 600^\circ\text{C}$); незначительно увеличивается при меньшем нагреве и с увеличением степени пластической деформации (рис.4). Високотемператур-

ная деформация повышает стойкость против растрескивания. (Результаты подробно отражены в диссертации аспиранта В.Д.Репина).

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы: I. При принципиальной схеме (к-м-с)-механизма, основным фактором, вызывающим преимущественное растрескивание сварных соединений в нитратах и щелочах, является неблагоприятное напряженное состояние ($\bar{H}$), связанное с наличием остаточных сварочных напряжений и концентраторов напряжений. Термдеформационный цикл сварки повышает стойкость металла против растрескивания, однако увеличивает общую электрохимическую гетерогенность сварного соединения, и смещает зону разрушения ($\bar{K}(\eta) = \frac{S(\eta)}{R(\eta)} \rightarrow \max$) в область, которая нагревается при сварке ниже A_{C_1} . 2. Исходя из механизма растрескивания, меры по повышению стойкости сварных конструкций стали Ст.3сп в щелочах и нитратах должны быть направлены, в первую очередь, на улучшение напряженного состояния конструкций. Для снятия остаточных напряжений допустимы различные методы термической, механической и термомеханической обработки, при условии, если при этом не образуются вторичные остаточные напряжения I рода.

Коррозионное растрескивание стали X18Ni9Ti и ее сварных соединений в хлоридах происходит по механо-коррозионно-сорбционному (м-к-с) - механизму преимущественно транскристаллитного типа.

Определяющим фактором, вызывающим растрескивание сварных соединений, является, как и для стали Ст.3, наличие остаточных сварочных напряжений. Однако, в отличие от стали Ст.3, основным фактором, повышающим чувствительность металла к растрескиванию является высокотемпературная пластическая деформация ($T=500-900^\circ\text{C}$) и ее неоднородность, вызванная термдеформационным циклом сварки. (Исследования проводились аспирантом А.С.Бадаевым). Условие растрескивания $\bar{K}(\eta) = \frac{S(\eta)}{R(\eta)} \rightarrow \max$ соответствует зона высокотемпературной пластической деформации, достигающей 2% и более. Эта зона характеризуется максимальными остаточными пластическими деформациями, плотностью дислокаций и максимальной искаженностью кристаллической решетки, т.е. напряженностью II рода.

Растрескивание сварных соединений титановых сплавов в кислых средах происходит по сорбционно-механо-коррозионному (с-м-к)-механизму смешанного типа. Определяющим фактором являются сорбционные явления, вызывающие наводороживание металла в процессе коррозии и снижение критических напряжений $\sigma_{кр}$ возникновения и развития трещин, вследствие адсорбционного и абсорбционного эффектов.

Процесс насыщения титана водородом при коррозии определяет

ся поступательным ростом гидридной пленки по закону квадратичной параболы $\delta = 2\sqrt{Dt}$ и диффузией водорода через пленку от ее внутренней поверхности в глубь металла по закону реакционной диффузии в соответствии со вторым уравнением Фика, решение которого для рассмотренного случая имеет вид:

$$c(x,t) = \eta \cdot C_0 [1 - \Phi(\frac{x}{2\sqrt{Dt}})],$$

где Φ - "интеграл ошибок" Гаусса, C_0 - предельно достижимая концентрация водорода при данных условиях ($\sim 3,5$ вес%), D - коэффициент диффузии, η - коэффициент, учитывающий конструкцию и условия контактирования оболочки со средой.

В связи с большей стойкостью против наводороживания основной металл титановых сплавов обладает повышенной стойкостью против охрупчивания и растрескивания по сравнению со сварными соединениями. Причины преимущественного наводороживания сварных соединений при коррозии связаны с ТФХМВ сварки, вызывающим а) структурную неоднородность сварного соединения и б) неоднородность напряженности I и II родов. При полиморфном превращении $\alpha \rightleftharpoons \beta$ на стадии охлаждения в шве и околошовной зоне возникает крупно-игольчатая структура мартенситного типа с высоким уровнем напряженности II рода и дефектами кристаллической решетки, что интенсифицирует процесс наводороживания. Диффузии водорода способствует также меньшая прочность защитной пленки на сварном соединении, чем на основном металле. Наряду с этим неоднородность сварного соединения титана является причиной более интенсивного процесса электрохимической коррозии, сопровождающегося повышенным выделением водорода. Титановые сплавы и их сварные соединения, легированные β -образующими и алюминием, более склонны к наводороживанию и растрескиванию, по сравнению с техническим титаном.

На основании полученных данных: а) недопустима эксплуатация сварных конструкций из титановых сплавов в активных кислых средах; б) для условий, когда металл находится в пассивном состоянии или близком к "граничной пассивности", целесообразно использовать титановые сплавы, не легированные элементами, интенсифицирующими наводороживание; в) необходима разработка методов получения сварных соединений с равновесной структурой, близкой основному металлу; г) изученные особенности наводороживания могут иметь научный и практический интерес не только для титановых сплавов, но и для других конструкционных гидридообразующих металлов (Zr, Nb, Ta).

4. ПУТИ И МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ СТОЙКОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ И КОНСТРУКЦИЙ ПРОТИВ КОРРОЗИОННЫХ РАЗРУШЕНИЙ

В соответствии с рассмотренными основными условиями и особенностями коррозии сварных соединений и конструкций имеются следующие основные направления повышения их стойкости против коррозионных разрушений:

- повышение стойкости металла ($\bar{M}$),
- создание более благоприятного состояния ($\bar{H}$) в сварном соединении и конструкции,
- уменьшение агрессивности среды ($\bar{C}$) или изоляция сварного соединения от среды.

Эти направления могут быть реализованы путем применения общих методов повышения стойкости металлических конструкций и специальных сварочно-технических методов, учитывающих специфику сварных соединений и технологию изготовления сварных конструкций.

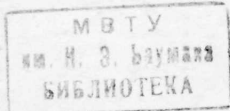
К общим методам относятся: 1) Рациональный выбор и разработка новых свариваемых коррозионно-стойких конструкционных материалов; 2) Рациональное конструирование, технология изготовления и эксплуатация изделий; 3) Применение защитных покрытий; 4) Применение методов торможения коррозии (ингибирование, электрохимическая защита).

В работе рассматриваются сварочно-технические методы (табл. I), в том числе применительно к конкретным конструкциям.

Оценка стойкости, прочности и надежности сварных соединений и конструкций при коррозии. Одним из эффективных путей повышения стойкости, прочности и надежности сварных конструкций при коррозии является разработка научно-обоснованных методов их расчета. Существующие методы несовершенны, так как не учитывается специфическое влияние среды и особенности сварных соединений.

Подход к оценке и расчету стойкости, прочности и надежности должен быть различным в зависимости от типа и вида коррозии и соответствующего доминирующего отказа. В расчетах на прочность возможны следующие варианты: 1) применение методов расчета по допускаемым напряжениям и предельным состояниям (по несущей способности, наибольшей деформации, допускаемому местному повреждению) с учетом изменения несущей и деформационной способности материала, связанной с уменьшением сечения и изменением механических свойств при коррозии; 2. расчеты, учитывающие вероятность отказов при коррозионных разрушениях хрупкого типа.

При первом подходе, применяемом в случае износных отказов при общей и местной коррозии, расчетную величину напряжений в сварных



соединениях, в развитие идей Г.А.Николаева, следует выбирать из условия:

$$\sigma = [\sigma_p]^* = \sigma_{\text{доп}} \cdot \frac{\|K_{\text{с.м.}}\|_6 \cdot \|K_c^k\|_6}{K_{\text{эф}}^k}$$

где $\sigma_{\text{доп}}, [\sigma_p]^*$ - допускаемые напряжения основного металла в исходном состоянии и сварного соединения при коррозии,

$\|K_{\text{с.м.}}\|_6$ - коэффициент снижения прочности сварного соединения по сравнению с основным металлом в исходном состоянии,

$\|K_c^k\|_6$ - коэффициент, характеризующий снижение прочности сварного соединения при коррозии по сравнению с исходным состоянием,

$K_{\text{эф}}^k$ - эффективный коэффициент концентрации при коррозии.

При расчете исполнительной толщины вводится коэффициент $\|K_{\text{с.м.}}\|_6$, учитывающий изменение глубинного показателя коррозии сварного соединения по сравнению с основным металлом.

Если существует вероятность коррозионного растрескивания сварных конструкций, расчет следует производить с учетом условия:

$$\sigma_{\text{сн}} + \sigma_{\text{ост}} = [\sigma_{\text{кр}}]$$

При количественных расчетах стойкости, прочности и надежности необходимы достоверные данные по коэффициентам относительной стойкости с учетом условий эксплуатации сварных конструкций. Получение этих характеристик, которые в настоящее время чрезвычайно ограничены, является важнейшей задачей.

Анализ методов уменьшения склонности металла сварных соединений к коррозии и улучшение напряженного состояния.

Сущность методов I-ой группы (табл. I) заключается в уменьшении термодинамической и электрохимической неустойчивости сварных соединений, характеризуемой разностью обратимых потенциалов катодной и анодной реакций $\Delta\varphi = (\varphi_{\text{к}})_{\text{св.р}} - (\varphi_{\text{а}})_{\text{св.р}}$ (в пределах макро- и микрон зон сварного соединения) и в увеличении общего кинетического торможения системы путем торможения анодного и катодного процессов. Исходя из механизма электрохимической коррозии, условиями равновесия сварных соединений основному металлу для большинства случаев являются: а) $\bar{\varphi}_{\text{шва}}, \bar{\varphi}_{\text{з.т.в.}} \geq \bar{\varphi}_{\text{о.м.}}$, где $\bar{\varphi}_{\text{шва}}, \bar{\varphi}_{\text{з.т.в.}}$

$\bar{\varphi}_{\text{о.м.}}$ - усредненные электрохимические потенциалы шва, зоны термического влияния и основного металла;

б) $\Delta\varphi_{\text{шва(з.т.в.)}} = \varphi_i^{\text{max}} - \varphi_i^{\text{min}} / \text{шва(з.т.в.)} \approx \varphi_i^{\text{max}} - \varphi_i^{\text{min}} / \text{о.м.} \rightarrow \rightarrow \text{min.}$

Первое условие выполняется при правильном выборе присадочных материалов и доли участия основного и присадочного материалов в фор-

Таблица I

Классификация основных сварочно-технических методов повышения стойкости сварных соединений и конструкций против коррозионных разрушений

I. Повышение коррозионной стойкости металла (М) сварных соединений путем регулирования химического состава и структуры	II. Улучшение напряженного состояния в сварных соединениях (Н)
<div data-bbox="63 520 94 647" data-kind="parent" data-rs="2">до сварки</div> <div data-bbox="63 887 94 1015" data-kind="parent" data-rs="2">при сварке</div> 1. Выбор оптимального состава и улучшение свойств основного металла перед сваркой. 2. Регулирование химического состава и структуры шва - подбор рациональных присадочных материалов, проволок, покрытий, флюсов, защитных газов и др. - рациональная конструкция шва. 3. Регулирование термического цикла сварки и условий кристаллизации: - применение рационального метода, способа и режима сварки по погонной энергии и степени концентрации источника тепла, - применение тепловых способов регулирования: дополнительный, предварительный, сопутствующий, последующий подогрев или охлаждение при сварке, - специальные методы: применение присадочных материалов с развитой поверхностью, ультразвуковая обработка и др.	1. Рациональное конструирование сварных соединений и узлов - правильный расчет, - уменьшение размеров зон ост.свар.напряжениями, уменьшение величины напряжений, жесткости их схемы и др., - исключение конструктивных концентраторов напряжений, - избежание наложения швов в высоконапряженных зонах конструкций. 2. Уменьшение общей и местной напряженности. - сварка без технологических концентраторов напряжений (без дефектов формы шва), - рациональная последовательность наложения швов).
<div data-bbox="63 1078 94 1158" data-kind="parent" data-rs="2">после сварки</div> 4. Улучшение свойств и снятие остаточных сварочных напряжений и деформаций термической, механической, термомеханической, механотермической, ультразвуковой и другой обработкой. Создание сжимающих напряжений на поверхности.	

мировании шва, зависящих от конструкции соединения и режимов сварки. Являясь главным, правильный выбор основного и присадочного материала и конструкции шва еще не решает проблемы стойкости сварного соединения в целом, так как ТФХМВ может вызывать понижение коррозионной стойкости зоны термического влияния.

Для термически стабильных сплавов целесообразно применение методов и технологии сварки с минимальной погонной энергией. Однако, влияние методов и режимов сварки плавлением относительно невелико, например, (как показано в работе) при атмосферной коррозии стали 3, и титана в кислых средах.

Для сплавов, подверженных структурным и фазовым изменениям под действием термического цикла, способы и режимы сварки плавлением оказывают существенное влияние на коррозионную стойкость сварных соединений. В связи с тем, что с увеличением скорости охлаждения степень неравновесности металла увеличивается, а степень неоднородности имеет максимум при некоторых критических скоростях охлаждения, стойкость против коррозии изменяется не монотонно (рис.5).

В качестве структурно-чувствительного сплава в диссертации рассмотрены причины коррозии сварных соединений, влияние методов сварки (Э.Л.С., АрДС и диффузионной) и термической обработки циркониевого сплава $Zr + 2,5\% Nb$. (В исследованиях участвовали аспирант Р.С.Лучкин и инженер В.Н.Тюрин). Проведенные исследования с использованием методики оценки влияния неоднородности сварных соединений показали, что определяющим фактором, вызывающим склонность сварных соединений сплава $Zr + 2,5\% Nb$ к коррозии в пароводяных средах, является структурная и химическая неоднородность металла, связанная с термическим циклом сварки. Влияние остаточных упруго-пластических деформаций является сопутствующим. Поэтому, повышение стойкости сварных соединений из этого сплава достигается в первую очередь, уменьшением структурно-химической неоднородности.

Меры по улучшению напряженного состояния с целью повышения стойкости против коррозии (группа II табл. I) как "до сварки" на стадии конструирования, так и "в процессе сварки" на стадии изготовления должны предусматривать:

а) уменьшение величины остаточных сварочных упруго-пластических деформаций, жесткости их схемы и концентрации. В соответствии с проведенными исследованиями для обеспечения этого условия в основном следует придерживаться принципа рассредоточения термомеханических полей при сварке;

б) применение конструкций и технологии, обеспечивающих получение сварных соединений без конструктивных и технологических кон-

центраторов напряжений. Лучшими типами соединений являются стыковые, выполненные без дефектов формы шва. При недостаточной эффективности рассмотренных методов необходимо применение послесварочных методов повышения стойкости. (табл. I).

Пример практического применения результатов исследований на декомпозирах глиноземного производства. В сварной аппаратуре глиноземного производства, в том числе в декомпозирах (сварные цилиндрические сосуды емкостью $\approx 1000 \text{ м}^3$ из стали Ст.3сп), рассмотренных в качестве характерного конкретного примера, реализуются основные условия, вызывающие явление коррозионного растрескивания; низкоуглеродистая сталь ($\bar{M}$), склонная к растрескиванию в щелочной среде ($\bar{C}$), в контакте с которой эксплуатируются аппараты; наличие двухосного напряженного состояния ($\bar{n}$) с растягивающими компонентами остаточных напряжений и от внешней нагрузки. Величина остаточных напряжений в сварных соединениях, определенная экспериментально на аппаратах, близка и превышает предел текучести стали Ст.3сп и пороговые напряжения стали в щелочной среде ($\sigma_{ост} \geq \sigma_T \approx \sigma_{пор}$). В связи с этим, около 97,4% разрушений приходится на сварные соединения, преимущественно в монтажных швах.

Исходя из механизма и особенностей растрескивания сварных соединений низкоуглеродистых сталей в щелочах и нитратах (рис.4), одним из наиболее перспективных и экономичных путей повышения стойкости является улучшение напряженного состояния путем снятия остаточных напряжений до уровня $\sigma_{ост} \approx \sigma_{пор} - \sigma_{en} \approx 0,5 \sigma_T$.

Анализ влияния различных методов, способов и режимов показал, что при всех вариантах сварки плавлением коррозионное растрескивание не устраняется, так как не устраняется главное энергетическое условие – собственное напряженное состояние. Более эффективным является сварка без дефектов формы для любых методов. В этой связи следует отдать предпочтение механизированным способам.

Положительные результаты получены при использовании прокатки и высокоскоростного импульсного деформирования. Однако, наиболее радикальным методом улучшения напряженного состояния является высокий отпуск (рис.5), обеспечивающий деконцентрацию и снятие напряженности I и II родов, повышение пластических свойств и стойкости металла. Поэтому главные усилия были направлены на обоснование режимов, разработку метода и промышленное внедрение отпуска декомпозиеров, которое проводилось совместно с трестом Урал – цветметремонт (В.Г.Леенсон), Всесоюзным алюминиево-магниевым институтом (В.И.Артемьев) на Богословском алюминиевом заводе (Гл.

инж. Н.Л.Устич).

Исходя из требований: а) устранение вероятности коррозионного растрескивания сварных соединений в щелочных растворах; б) повышение стойкости металла; в) сохранение устойчивости аппарата в процессе проведения отпуска; г) экономичность — отработаны режимы и метод местного отпуска по кольцевой схеме. Внедрение метода для снятия напряжений в монтажных кольцевых стыках и во всем аппарате при непрерывном перемещении кольцевой нагревательной установки дало значительный экономический эффект.

ВЫВОДЫ

1. Рассмотрены особенности коррозии основного металла в напряженном состоянии:

а) Предложена и рассмотрена обобщенная схема коррозионных разрушений металлических, в том числе сварных, конструкций. Схема определяет влияние основных условий разрушения — свойств металла ($\bar{M}$) напряженного состояния ($\bar{H}$), среды ($\bar{C}$) — и учитывает совместное действие коррозионного, механического и сорбционного факторов.

б) Проведен качественный анализ коррозионного растрескивания с позиций хрупкого разрушения. Специфические особенности коррозионного растрескивания, как особого вида хрупкого разрушения, определяются явлением "деконцентрации" упруго-пластических деформаций под воздействием коррозионно-активных сред. Изучено влияние величины и жесткости схемы напряжений, соотношений скоростей общей и локальной коррозии, местных и общих сорбционных процессов, плотности концентраторов и температурного фактора. Предложены качественные зависимости, описывающие термодинамические условия и кинетику коррозионного растрескивания.

2. Принципиальные особенности коррозии сварных соединений и конструкций в напряженном состоянии определяются теплофизическим и химикометаллургическим воздействием (ТХМВ) процесса сварки. Основными особенностями являются:

а) Повышенная склонность металла сварных соединений к коррозии, вызванная термодинамической и электрохимической неустойчивостью и неоднородностью свойств.

б) Более сложное и неблагоприятное напряженное состояние, определяемое величиной, жесткостью схемы и концентрацией собственных сварочных упруго-пластических деформаций и геометрической неоднородностью сварных соединений.

Установлена связь между ТХМВ сварки как процессом, определяющим изменение коррозионной восприимчивости и напряженного сос-

тояния металла, и коррозионной стойкостью сварных соединений.

3. Изучено влияние основных факторов напряженности, вызванной остаточным напряженным состоянием и от внешней нагрузки, на процессы коррозионного разрушения сварных соединений;

а) Траектория коррозионных трещин в условиях двухосного напряженного состояния определяется результирующей главных нормальных растягивающих напряжений и характером расположения зон с повышенной восприимчивостью к коррозионному воздействию.

б) Инкубационный период и время коррозионного растрескивания металлов и их сварных соединений определяется величиной, жесткостью схемы, концентрацией и потенциальной энергией напряжений. Остаточные напряжения суммируются с напряжениями от внешней нагрузки.

в) Концентрация упруго-пластических деформаций в дефектах формы шва (непровары, резкие переходы и др.) вызывает интенсивное разблагораживание электрохимического потенциала и ускоренную коррозию в корне дефекта.

4. Изучено влияние технологической пластической деформации (от внешних нагрузок и собственных сварочных) на растрескивание сварных соединений. Влияние пластической деформации, как низкотемпературной, так и высокотемпературной, неоднозначно. Оно может быть положительным или отрицательным в зависимости от природы металла и среды, степени деформации и деформационно-силовой схемы пластического деформирования. Предложены методы повышения стойкости местной деформацией сжатием с помощью прокатки и высокоскоростного импульсного деформирования.

5. Рассмотрен ряд характерных механизмов и установлены причины коррозионных разрушений сварных соединений в напряженном состоянии:

а) Коррозионное растрескивание сварных соединений стали СтЗ в щелочах и нитратах происходит по коррозионно-механо-сорбционному (к-м-с) механизму межкристаллитного типа. Основным фактором, вызывающим преимущественное растрескивание сварных соединений, является неблагоприятное напряженное состояние, связанное с наличием собственных напряжений и технологических концентраторов.

б) Коррозионное растрескивание сварных соединений стали Х18Н10Т в кипящих хлоридах происходит по механо-коррозионно-сорбционному (м-к-с) механизму преимущественно транскристаллитного типа. Повышенная чувствительность сварных соединений к растрескиванию зависит от остаточной высокотемпературной деформации при определяющей роли величины и концентрации напряженности I рода.

в) Коррозионное растрескивание сварных соединений титановых сплавов в кислых средах происходит по сорбционно-механо-коррозионному (с-м-к) механизму в связи с интенсивным наводороживанием сварных соединений в процессе коррозии. Более интенсивное наводороживание, охрупчивание и растрескивание сварных соединений связано с наличием неблагоприятной игольчатой структуры мартенситного типа, с повышенным выделением водорода в процессе коррозии и наличием остаточных напряжений.

г) Определяющим условием коррозионного разрушения сварных соединений циркониевого сплава $Zr + 2,5\% Nb$ в пароводяных средах является структурно-химическая неоднородность, вызванная термомеханическим циклом сварки. Влияние напряженного состояния является сопутствующим.

6. Разработаны методики оценки коррозионной стойкости, учитывающие специфические особенности сварных соединений и условия реального нагружения:

а) Методика для оценки влияния неоднородности сварных соединений на коррозионное разрушение.

б) Методики коррозионных испытаний без нагрузки по результатам весовых, механических и электрохимических испытаний с учетом неоднородности свойств сварных соединений.

в) Методика оценки стойкости сварных соединений против коррозионного растрескивания с применением дисковых образцов с круговым швом с регулируемым двухосным полем упруго-пластических деформаций.

г) Методика, позволяющая оценивать коррозионную стойкость сварных образцов и узлов с заданным остаточным упруго-пластическим состоянием с одновременным приложением двухосной внешней статической и повторно-статической нагрузки.

д) Проведен анализ методов испытаний при основных видах одноосной внешней нагрузки: изгибе, растяжении и кручении. Испытания при постоянной нагрузке более целесообразны по сравнению с испытаниями при постоянной деформации.

7. Разработана классификация и дано обоснование путей и методов повышения стойкости сварных соединений и конструкций при коррозии в напряженном состоянии.

а) Показан принципиальный подход к расчету прочности для различных типов коррозионных разрушений сварных соединений. Оценку и расчет стойкости, прочности и надежности сварных конструкций при коррозии следует производить с учетом влияния среды на несущую способность материала и вероятность местных повреждений, в том числе, хрупкого вида и с учетом особенностей коррозии сварных соединений.

б) Дан анализ влияния методов, способов и режимов сварки плавлением на коррозионную стойкость термически стабильных и нестабильных металлов и сплавов.

в) Помимо общих рекомендаций по повышению стойкости сварных конструкций против коррозионных разрушений разработаны пути и методы для конкретных конструкций. В качестве характерного примера практического внедрения результатов проведенных исследований рассмотрены пути повышения стойкости декомпозиоров глиноземного производства.

Материалы диссертации отражены в следующих публикациях (по тематике):

1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

1. Стеклов О.И. Повышение стойкости сварных соединений и конструкций против коррозионных разрушений. М., НИИИнформтяжмаш, IO-70-II, 1970.

2. Стеклов О.И. Прочность сварных соединений в условиях коррозии. Справочник по сварке, т.Ш, Машиностроение, 1970.

3. Стеклов О.И., Акулов А.И. О влиянии остаточных сварочных напряжений и вида напряженного состояния на коррозионное растрескивание сварных соединений. ж."Автоматическая сварка", 1965, № 2.

4. Стеклов О.И. Надежность сварных конструкций при работе в коррозионных средах. Сб."Надежность сварных соединений и конструкций". М., "Машиностроение", 1967.

5. Стеклов О.И., Бадаев А.С. Влияние неоднородности пластической деформации на коррозионное растрескивание сварных соединений. ж."Сварочное производство", 1969, № 2.

6. Стеклов О.И., Репин В.Д. Остаточные сварочные напряжения в емкостных конструкциях. "Монтажные и специальные работы в строительстве", 1970, № II.

7. Стеклов О.И. Атмосферная коррозия сварных стыковых соединений. Сб. докладов III Всесоюзной конференции по сварке в строительстве, М., НТО "Строитель", 1971.

8. Стеклов О.И. Траектория коррозионной трещины при двухосном плоском напряженном состоянии ФХММ, т.7, 1971, № 5.

9. Стеклов О.И. К влиянию жесткости схемы напряженного состояния на коррозионное растрескивание. "Защита металлов", 1972, № 3.

10. Стеклов О.И. Влияние остаточных сварочных напряжений на коррозионные разрушения сварных соединений. ж."Сварочное производство", 1972, № 5.

II. Стеклов О.И. Оценка стойкости, прочности и надежности сварных соединений и конструкций при коррозии. Тезисы докладов к Все-

союзному научно-техническому совещанию по защите от коррозии оборудования глиноземного производства, Ленинград, ВАМИ, II-III мая, 1972.

П. ПО МЕТОДИКЕ

12. Стеклов О.И. Об оценке стойкости напряженных сварных конструкций против коррозионных разрушений. Сб. "Прочность сварных конструкций", М., Машиностроение, 1966.

13. Стеклов О.И. К методике испытания сварных соединений на изгиб. "Известия высших учебных заведений", Машиностроение, 1966, № 9.

14. Стеклов О.И., Лозин Ю.И. Об оценке коррозионной стойкости сварных соединений электрохимическими методами. Сб. Остаточные напряжения и прочность сварных соединений и конструкций, М., Машиностроение, 1969.

15. Стеклов О.И., Бадаев А.С. К методике испытаний на коррозию под напряжением при одноосном изгибе с "постоянной деформацией", "Заводская лаборатория", 1970, № 8.

16. Стеклов О.И., Лучкин Р.С. Применение метода термopotенциала для исследования неоднородности свойств сварных соединений, "Сварочное производство", 1970, № 12.

17. Стеклов О.И. Образцы для оценки стойкости сварных соединений против коррозионного растрескивания, "Автоматическая сварка", 1971, № 9.

III. КОРРОЗИОННАЯ СТОЙКОСТЬ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Титановые сплавы

18. Стеклов О.И. Коррозионная стойкость напряженных сварных соединений титановых сплавов. Сб. "Высокопроизводительные методы сварки в химическом и нефтяном машиностроении", М., ЦИНТИХимнефтемаш, 1965.

19. Стеклов О.И. Коррозионные свойства сварных соединений технического титана в соляной кислоте при пониженных температурах. М., ЦИНТИХимнефтемаш. "Технология химического и нефтяного машиностроения", 1965, № 3.

20. Стеклов О.И. Стойкость сварных соединений титановых сплавов против коррозионного растрескивания и межкристаллитной коррозии. М., ЦИНТИХимнефтемаш, "Технология химического и нефтяного машиностроения", 1965, № 6.

21. Стеклов О.И. Стойкость сварных соединений титана, выполненных аргоно-дуговой сваркой, против коррозионного растрескивания. Сб. "Сварка в среде защитных и активных газов", М., МДНП, 1965.

22. Стеклов О.И., Акулов А.И. Влияние режима сварки на кор -

розионные свойства сварных соединений титана ВТИ-1. "Сварочное производство", 1965, № 12.

23. Стеклов О.И. Влияние водорода в процессе коррозии на свойства сварных соединений титана. "Сварочное производство", 1967, № 2.

24. Стеклов О.И. О применении дополнительного охлаждения при сварке титана. "Сварочное производство", 1970, № 9.

Сталь типа Х18Н10Т

25. Стеклов О.И., Бадаев А.С. Коррозионное растрескивание сварных соединений стали Х18Н10Т. М., НИИИНФОРМАТМАШ, IO-69-II, 1970.

26. Стеклов О.И., Бадаев А.С., Замирякин Л.И. Влияние неоднородности сварных соединений нержавеющей сталей типа 18-10 на коррозионное растрескивание. Сб. Остаточные напряжения и прочность сварных конструкций. М., Машиностроение, 1969.

27. Стеклов О.И., Антипов А.И. Влияние усиления корня шва на коррозионную стойкость сварных соединений стали Х18Н10Т в азотной кислоте. "Автоматическая сварка", 1972, № 6.

28. Стеклов О.И., Антипов А.И. Влияние концентрации упруго-пластических деформаций на коррозию сварных соединений из стали Х18Н10Т в азотной кислоте. ФХММ, 1972, № 4.

Сталь 3.

29. Сборник "Щелочная хрупкость и повышение стойкости аппаратуры глиноземного производства". Под редакцией к.х.н. В.И.Артемьева и к.т.н. О.И.Стеклова. М., Цветинформация, 1971.

Стеклов О.И. Напряженное состояние сварных соединений декомпозируют.

Стеклов О.И., Репин В.Д., Артемьев В.И., Гусева Г.М. Влияние сварочных пластических деформаций на щелочную хрупкость сварных соединений стали Ст.3.

Стеклов О.И., Артемьев В.И., Леенсон В.Г., Репин В.Д., Новокрещенов А.И., Желобова Е.П. Обоснование режима, метода, и промышленное опробование местного отпуска декомпозируют по кольцевой схеме.

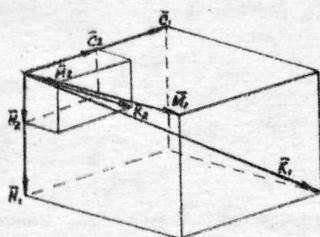
30. Стеклов О.И., Репин В.Д., Артемьев В.И., Желобова Е.П., Гусева Г.М. О "низкотемпературном" отпуске крупногабаритных сварных емкостей. ФХММ. т.7, 1971, № 2.

Цирконий

31. Стеклов О.И., Лучкин Р.С. Экспериментальное исследование остаточных упруго-пластических деформаций стыковых сварных соединений сплава циркония с 2,5% ниобия. "Автоматическая сварка", 1972, № 2.

32. Стеклов О.И., Тюрин В.Н., Лучкин Р.С., Плишевский М.И.
Исследование неоднородности свойств и коррозионной стойкости свар-
ных соединений сплава циркония с 2,5% ниобия. "Сварочное производ-
ство", 1972, № 4.

Работа в целом и отдельные ее части неоднократно доложены и
обсуждены на Всесоюзных, зональных и городских конференциях, сове-
щаниях и семинарах, а также в ряде организаций.



$$\bar{M} + \bar{N} + \bar{C} \rightarrow \bar{K}$$

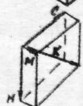
$$(M_H + M_T) + (\sigma_{IE} + W_{IE}) + (C_x + C_a) \rightarrow \bar{K}$$



$$\bar{M} + \bar{C} \rightarrow \bar{K}$$



$$\bar{M} + \bar{N} \rightarrow \bar{K}$$



$$\bar{N} + \bar{C} \rightarrow \bar{K}$$

Векторная схема влияния свойств металла $\bar{M}$,
напряженного состояния $\bar{N}$ и среды $\bar{C}$ на склон-
ность $\bar{K}$ металла к разрушению

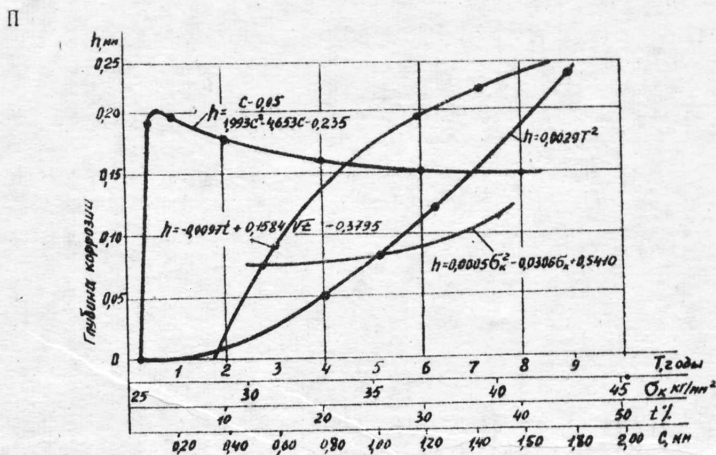
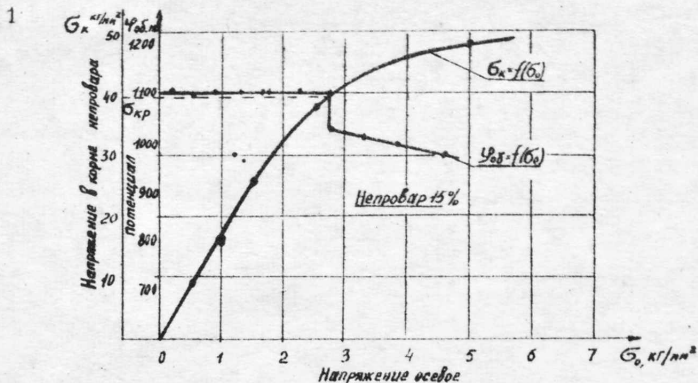


Рис. 3. Влияние неспавара на коррозию сварных соединений стали X18H10T в концентрированной азотной кислоте.

1. Зависимость напряжений σ_k и электродного потенциала ϕ_c в корне неспавара от напряжений σ_c .
- II. Зависимость глубины коррозии h от времени эксплуатации T , напряжения в корне неспавара σ_c , глубины неспавара c и ширины неспавара S .

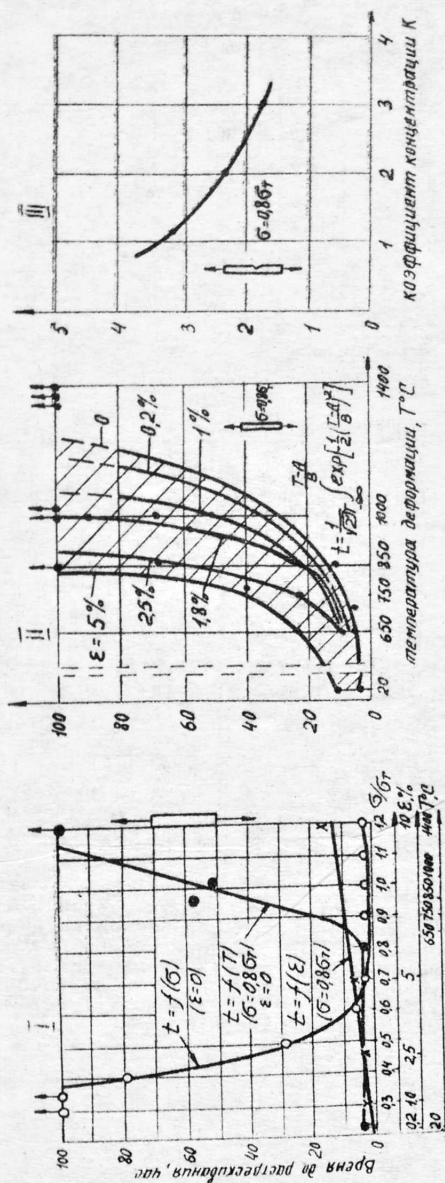


Рис. 4 Влияние основных факторов термодформационного цикла и концентрации напряжений на коррозионное растрескивание стали Ст.3 сп в кипящем растворе нитратов 45% $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 + 35\% \text{NH}_4\text{NO}_3$.

- I. Влияние растягивающих напряжений $t=f(\sigma)$, нагрева $t=f(T)$ и деформации $t=f(\epsilon)$ на время до растрескивания.
- II. Влияние характерных термодформационных циклов - зависимость времени до растрескивания от максимальной температур нагрева при разной степени пластической деформации.
- III. Зависимость времени до растрескивания от концентрации напряжений.

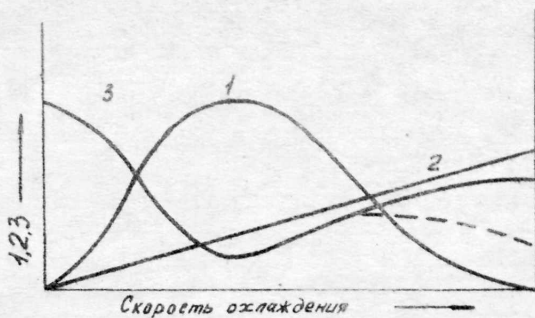


Рис.5. Схема влияния скорости охлаждения на степень неоднородности (1), степень неравновесности (2) и стойкость против коррозии (3).

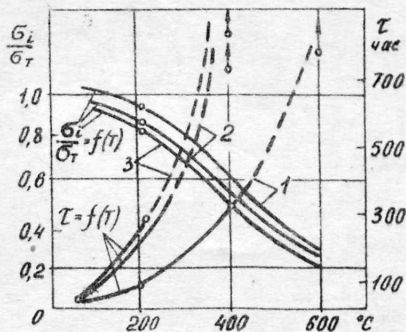


Рис.6. Влияние режима отпуска сварных соединений стали СтЗсп на уровень снятия остаточных напряжений (σ_c/σ_T) и время до растрескивания τ в кипящих растворах нитратов 45% $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ + 35% NH_4NO_3 .
Время отпуска 1-0,5 час, 2-1 час, 3-2 часа.