

ОРДЕНОВ ЛЕНИНА И ДРУЖБЫ НАРОДОВ АКАДЕМИЯ НАУК  
УКРАИНСКОЙ ССР  
ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ им. Г. В. КАРПЕНКО

*На правах рукописи*

УДК 539.4:620.17:620.193

**РАТЫЧ**  
Любомир Владимирович

# **МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ МЕТАЛЛОВ В КОРРОЗИОННЫХ СРЕДАХ**

Специальности:

01.02.04 — Механика деформируемого твердого тела,  
05.17.14 — Химическое сопротивление материалов  
и защита от коррозии

**Автореферат**  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук



00815710 (M)

Работа выполнена в физико-механическом институте им. Г. В. Карпенко АН УССР.

**Официальные оппоненты:** член-корреспондент АН СССР, доктор технических наук, профессор Н. А. МАХУТОВ; доктор технических наук, профессор И. И. ВАСИЛЕНКО; доктор технических наук А. В. ПРОКОПЕНКО.

**Ведущая организация** — Научно-исследовательский физико-химический институт им. Л. Я. Карпова (НИФХИ) г. Москва.

Защита состоится « 11 » декабрь 1991 г. в 15 часов на заседании специализированного совета ДР 016.42.99 при Физико-механическом институте им. Г. В. Карпенко Академии наук Украинской ССР.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института.

Автореферат разослан « 04 » ноябрь 1991 г.

Ученый секретарь  
специализированного совета  
доктор технических наук,  
старший научный сотрудник

Г. Н. НИКИФОРЧИН

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Во второй половине XX века одной из особо важных проблем в науке о прочности стала оценка работоспособности конструкций при наличии в них трещины. Актуальность этой проблемы усиливалась в связи с многочисленными случаями хрупкого разрушения крупногабаритных сварных конструкций (морские суда, мосты, резервуары и др.), обусловленными, как показала экспертиза, исходными или возникшими в процессе эксплуатации трещинами и физико-химическими свойствами рабочей среды. Классические методы расчетов на прочность и долговечность оказались недостаточными для решения данной проблемы. Это стало возможным в рамках нового научного направления в науке о прочности материалов, получившего название механики разрушения, которая, как известно, включает принципиально новые концепции и методологии оценки напряженно-деформированного состояния тела около вершины трещины и предусматривает введение новых характеристик материала – сопротивляемости материала распространению в нем трещины или его трещиностойкости.

В результате интенсивных теоретических и экспериментальных исследований проблема оценки работоспособности конструкций с трещинами при статическом и циклическом нагружениях в невзаимодействующих с металлом средах практически получила в основном свое разрешение. Этого, однако, нельзя сказать относительно конструкций, контактирующих с коррозионной средой.

В настоящее время в механике коррозионного разрушения используют концепции и подходы механики разрушения в инертных средах, а химически или физически активные среды рассматривают как один из факторов, который каким-то образом влияет на трещиностойкость материала. Поэтому методология определения характеристик коррозионной трещиностойкости не претерпела существенных изменений, и результаты исследований в коррозионной среде при статическом и циклическом нагружениях по аналогии с инертной средой представляют соответственно диаграммами статической и циклической коррозионной трещиностойкости материала. При этом не учитывается, что такие диаграммы должны характеризовать уже систему металл-среда. Кроме того, тщательными исследованиями установлено, что при существующих методиках испытаний на коррозионную трещиностойкость эти диаграммы неинвариантны, так как дополнительно зависят

от исходного уровня коэффициента интенсивности напряжений и длины трещины – параметров, уже учитываемых при их построении. Установлено, что для одной и той же системы металл–среда в зависимости от исходных значений этих параметров может быть получен довольно широкий (более чем на порядок) диапазон изменения скорости роста трещины в коррозионной среде. Поэтому оценка работоспособности конструкций по таким неинвариантным диаграммам статической и циклической коррозионной трещиностойкости материала становится ненадежной, неоднозначной и необъективной, что создало кризисную ситуацию при решении данной проблемы в начале 80-х годов. Одновременно возник вопрос о правомочности использования принципов линейной механики разрушения для оценки коррозионной трещиностойкости материала. Сомнения еще более усилились в связи с появившимися в литературе данными, указывающими на существенное отличие электрохимических условий в вершине трещины от условий на поверхности образца, что не учитывается при проведении испытаний на коррозионную трещиностойкость.

Таким образом, оценка коррозионной трещиностойкости материалов стала одной из наиболее важных научных задач инженерной практики расчетов конструкций на долговечность в коррозионной среде.

Целью работы являлось решение чрезвычайно существенной проблемы механики коррозионного разрушения – создание физически обоснованных методов оценки коррозионной трещиностойкости конструкционных материалов, которые обеспечили бы объективное и однозначное определение характеристик коррозионной трещиностойкости материала при статическом и циклическом нагружениях для расчетов конструкций на долговечность в коррозионной среде.

Для выполнения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи.

1. Установить причины неинвариантности диаграмм статической и циклической коррозионной трещиностойкости материала и с их учетом сформулировать новый подход к оценке коррозионной трещиностойкости материала, который устранял бы такую неинвариантность диаграмм.

2. Разработать новые методики испытаний на коррозионную трещиностойкость и необходимые для их реализации средства, которые обеспечивали бы объективное и однозначное определение характеристик коррозионной трещиностойкости материала при статическом и циклическом нагружениях с учетом режимов эксплуатации.

3. Изучить тенденции изменения электрохимических условий в вершине стационарной и развивающейся трещины в процессе испытаний на коррозионную трещиностойкость различных систем металл-среда и установить их взаимосвязь с характеристиками коррозионной трещиностойкости материала.

4. Дать количественную оценку вклада механизмов локального анодного растворения и водородного охрупчивания в увеличение скорости роста усталостной трещины в коррозионной среде.

5. Разработать физически обоснованную методику ускоренного построения базовых диаграмм циклической коррозионной трещиностойкости материалов для расчетов конструкций на долговечность в коррозионной среде.

6. Определить характеристики циклической коррозионной трещиностойкости отечественных марок корпусных сталей и их сварных соединений с учетом экстремальных эксплуатационных условий для оценки работоспособности корпуса ВВЭР.

7. Создать методологию оценки эффективности ингибиторной защиты изделий от коррозионно-механического разрушения при наличии в них трещины.

Научная новизна работы. Предложен новый подход к оценке коррозионной трещиностойкости конструкционных материалов, в соответствии с которым скорость роста трещины в коррозионной среде определяется не только напряженно-деформированным состоянием около вершины трещины, но и интенсивностью физико-химических процессов взаимодействия среды с металлом в вершине трещины. Сформулирована расчетная модель системы "металл-водная среда" и установлены параметры, характеризующие ее: коэффициент интенсивности напряжений, водородный показатель среды и электродный потенциал металла. В рамках этой модели определены необходимые условия для получения инвариантных данных о коррозионной трещиностойкости материалов, которые затем экспериментально подтверждены на ряде систем металл-водная среда при испытаниях на статическую и циклическую коррозионную трещиностойкость, — это постоянство электрохимических условий в вершине трещины.

Впервые для многих марок сталей, алюминиевого и титанового сплавов исследованы и обобщены закономерности изменения значений водородного показателя среды и электродного потенциала металла в вершине стационарной статически нагруженной и развивающейся циклически нагруженной трещины в зависимости от различных факторов (длины трещины, коэффициента интенсивности напряжений, потенци-

ала внешней поляризации, химического состава материала, частоты нагружения, температуры среды, состава и концентрации ингибитора коррозии различного принципа действия, концентрации кислорода). На основании результатов этих исследований предложены формулы для описания тенденций изменения этих электрохимических характеристик в вершине коррозионно-усталостной трещины, а также дана оценка вероятности водородной деполяризации в вершине трещины для исследуемых систем металл-среда с учетом рассмотренных факторов.

Впервые установлена непосредственная взаимосвязь между скоростью роста коррозионно-усталостной трещины и электрохимическими условиями в ее вершине и на примере многих систем металл-водная среда показано, что каждому участку диаграммы циклической коррозионной трещиностойкости исследуемого материала соответствуют вполне определенные тенденции изменения электрохимических характеристик в вершине коррозионно-усталостной трещины.

Сформулированы расчетные модели для приближенной количественной оценки вклада механизмов локального анодного растворения и водородного орупчивания металла в окрестности вершины трещины в увеличение скорости ее роста в коррозионной среде.

Разработана новая методология построения базовых диаграмм циклической коррозионной трещиностойкости материалов для расчетов конструкций на долговечность в коррозионной среде.

Предложена концепция количественной оценки эффективности ингибиторной защиты изделий при наличии в них трещины. Показано, что изменением электрохимических условий в вершине трещины в более благоприятную сторону путем электрохимической и ингибиторной защиты можно добиться существенного повышения циклической коррозионной трещиностойкости материала.

Практическая ценность работы. Разработаны методики испытаний на статическую и циклическую коррозионную трещиностойкость при постоянных напряженно-деформированном состоянии и электрохимических условиях в вершине трещины, а также с учетом их изменения. Предложены новые образцы для испытаний на коррозионную трещиностойкость и измерительные капилляры для определения значений водородного показателя среды и электродного потенциала металла в вершине трещины. Проведена K-тарировка предложенных образцов с одним и двумя отверстиями по скоростям роста усталостной трещины на воздухе и определены поправочные коэффициенты для вычисления коэффициентов интенсивности напряжений в образцах, изготовленных

из стали, алюминиевого и титанового сплавов. Создано специальное оборудование для испытаний на статическую и циклическую коррозионную трещиностойкость в условиях осевого растяжения и чистого изгиба с учетом различных эксплуатационных факторов, в том числе и повышенных температур (до 523 К) при давлении до 5 МПа.

Разработаны также методики: выбора оптимальной марки стали для работы в коррозионной среде на основании инвариантных диаграмм циклической коррозионной трещиностойкости материала; оценки вклада механизмов локального анодного растворения и водородного охрупчивания в окрестности вершины трещины в увеличение скорости ее роста в коррозионной среде; построения базовой диаграммы циклической трещиностойкости материала для расчетов конструкций на долговечность в коррозионной среде; определения оптимальной концентрации ингибитора и потенциала внешней поляризации для защиты изделий от коррозионно-механического разрушения в рамках заданного ресурса.

Впервые для различных систем сталь-водная среда, в том числе отечественных корпусных сталей и их сварных соединений в реакторной воде борного регулирования, получены обширные данные о циклической коррозионной трещиностойкости материала при постоянных электрохимических условиях в вершине трещины, а также с учетом их изменения.

Построены базовые инвариантные диаграммы циклической коррозионной трещиностойкости корпусных сталей 15Х2МФА и 15Х2НМФА, сварного шва марки Св-10ХМФТ, сварного соединения "антикоррозионная наплавка-корпусная сталь" и стали 34ХН1М с учетом экстремальных электрохимических условий и некоторых наиболее важных эксплуатационных факторов.

Решен ряд конкретных практических вопросов, в том числе: обоснован выбор ингибитора комплексного действия для защиты контура системы охлаждения; определена работоспособность насосных штанг из сталей 15ХНМФ и 20Н2М в зависимости от их диаметра, размера дефекта, допустимых напряжений и состава среды; произведена оценка работоспособности дисков паровых турбин из стали 34ХН1М в условиях фазового перехода с учетом возникшего дефекта.

Результаты исследований циклической коррозионной трещиностойкости ряда систем металл-среда, выполненных в рамках нового подхода, внедрены на предприятиях Атоммаша, Минсудпрома, Минхиммаша и Миннефтемаша.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Новый подход к определению коррозионной трещиностойкости конструкционных материалов во взаимодействующих с ним средах.

2. Расчетная модель роста трещины в системе металл-водная среда и модели количественной оценки вклада механизмов локального анодного растворения и водородного охрупчивания металла в ускоренное развитие усталостной трещины в водной среде.

3. Методики испытаний на статическую и циклическую коррозионную трещиностойкость при постоянных напряженно-деформированном состоянии и электрохимических условиях в вершине трещины, а также с учетом их изменения; образцы, средства для электрохимических исследований в вершине трещины и оборудование для таких испытаний.

4. Электрохимические критерии и методика количественной оценки вклада механизмов локального анодного растворения и водородного охрупчивания в прирост скорости роста усталостной трещины в коррозионной среде.

5. Физически обоснованная методика построения базовых диаграмм статической и циклической коррозионной трещиностойкости материалов для расчетов конструкций на долговечность в коррозионной среде.

6. Методология количественной оценки эффективности ингибиторной защиты изделий при наличии в них трещины, а также методика выбора оптимальных параметров электрохимической и ингибиторной защиты.

7. Установленные на основании результатов исследования ряда систем металл-водная среда, в том числе корпусных сталей и их сварных соединений в реакторной воде борного регулирования, общие закономерности изменения электрохимических характеристик в вершине коррозионно-усталостной трещины и их взаимосвязь с диаграммами циклической коррозионной трещиностойкости материала.

Публикации и апробация работы. По теме диссертации опубликовано 46 работ в журналах и сборниках, получено 9 авторских свидетельств на изобретения. Под руководством автора защищены 3 кандидатские диссертации. Наиболее важные положения работы докладывались на следующих научных форумах: на VI и VIII Всесоюзных конференциях по усталости металлов (Москва, 1972 и 1982); на IV научно-технической конференции "Повышение циклической прочности материалов методами поверхностного пластического деформирования (Пермь, 1974); на Всесоюзном симпозиуме "Прикладные вопросы ме-

ханики разрушения в машиностроении" (Ленинград, 1977); на УП и УШ Всесоюзных конференциях по коллоидной химии и физико-химической механике материалов (Минск, 1977; Ташкент, 1983); на I Республиканской конференции по коррозии и противокоррозионной защите металлов (Львов, 1980); на VI, VII и IX Международных коллоквиумах "Механическая усталость металлов" (Киев, 1981; Мишкольц, 1983; Братислава, 1987); на зональной научно-технической конференции Урала "Циклическая прочность и повышение несущей способности изделий" (Пермь, 1981); на II Всесоюзном съезде по теории машин и механизмов (Одесса, 1982); на научно-технической конференции "Опыт научно-исследовательских организаций, предприятий и строек по антикоррозионной защите материалов" (Минск, 1983); на Всесоюзном совещании "Защита нефтепромышленного оборудования от коррозии в условиях сероводородной агрессии" (Волгоград, 1984); на конференции "Применение методов механики разрушения в расчетах строительных металлических конструкций на крупную прочность и долговечность" (Красноярск, 1984); на Всесоюзной конференции "Защита от коррозии в химической промышленности" (Черкассы, 1985); на I и III Всесоюзных симпозиумах по механике разрушения (Житомир, 1985 и 1990); на научно-технической конференции "Современные методы борьбы с коррозией в машиностроении" (Ереван, 1987); на X и XI Международных конгрессах по коррозии (Мадрас, 1987; Флоренция, 1990); на У Всесоюзном симпозиуме "Малоцикловая усталость - критерии разрушения и структуры материалов" (Волгоград, 1987); на I Всесоюзной конференции "Механика разрушения материалов" (Львов, 1987); на Всесоюзной научно-технической конференции "Прогрессивные методы и средства защиты металлов и изделий от коррозии" (Москва, 1988); на 24-й сессии Научного совета "Новые процессы получения и обработки металлических материалов" (Киев, 1988); на II Всесоюзном совещании "Физико-химические основы действия ингибиторов коррозии металлов" (Москва, 1989); на Международном совещании специалистов из стран-членов МАГАТЭ "Докритический рост трещин" (Москва, 1990).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, семи глав, общих выводов, библиографии, содержит 298 страниц машинописного текста, 166 рисунков, 30 таблиц, список литературы из 570 наименований.

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении изложена сущность проблемы, связанной с оцен-

кой работоспособности предназначенных для работы в коррозионной среде конструкций при наличии в них трещины. Рассмотрены этапы решения этой проблемы как советскими, так и зарубежными учеными в рамках научного направления – механики разрушения.

В первой главе изложены основные концепции линейной механики разрушения и осуществлен анализ полученных в ее рамках результатов исследований трещиностойкости конструкционных материалов. При этом особое внимание уделено трещиностойкости материалов в коррозионной среде. Рассмотрены проблемы, возникающие в механике коррозионного разрушения. С учетом проведенного литературного обзора предшествовавших данной работе исследований сформулированы цели и основные задачи диссертации.

Во второй главе проанализированы причины неинвариантности диаграмм статической и циклической коррозионной трещиностойкости материалов; изложена сущность нового подхода к определению скорости роста трещины в деформируемом теле, взаимодействующим с коррозионной средой; сформулирована расчетная модель системы металл-водная среда, для которой определены условия, обеспечивающие инвариантность диаграмм коррозионной трещиностойкости материалов; описаны новые методики испытаний на коррозионную трещиностойкость, а также образцы и средства для их реализации; рассмотрены задачи и перспективы дальнейших исследований.

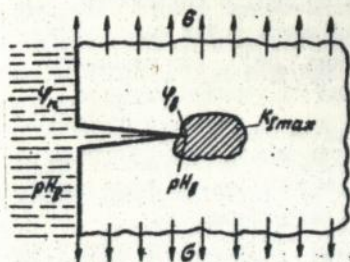
Установлено, что неинвариантность диаграмм коррозионной трещиностойкости материалов обусловлена несоблюдением идентичности электрохимических условий в вершине трещины по мере ее развития при существующих методиках испытаний. В связи с этим предложен новый подход к оценке коррозионной трещиностойкости материалов, в соответствии с которым скорость роста трещины в коррозионной среде определяется параметрами, характеризующими не только напряженно-деформированное состояние в вершине трещины (например, максимальным значением коэффициента интенсивности напряжений  $K_{I, max}$ ), но и физико-химические процессы во времени  $t$  и состояние поверхности разрушения  $S$  в вершине трещины (соответственно параметрами  $A_n(t)$  и  $B_m(s)$ ):

$$\psi_c = [C_i; K_{I, max}; A_1(t), A_2(t), \dots, A_n(t); B_1(s), B_2(s), \dots, B_m(s)], \quad (I)$$

где  $C_i$  – характеристики трещиностойкости материала.

В частности, для системы металл-водная среда (рис. I) предложена модель, согласно которой электрохимические процессы взаимодействия водной среды с металлом интегрально описываются

значениями водородного показателя среды  $\rho H$  и электродного потен-



циала металла  $\psi$  на поверхности ( $\rho H_n, \psi_n$ ) и в вершине трещины ( $\rho H_B, \psi_B$ ), а зона предразрушения

Рис. I. Схематическое представление основных факторов, определяющих зону предразрушения материала, деформируемого в водной среде.

материала, деформируемого в водной среде, определяется тремя параметрами:  $K_{I,max}$ ,  $\rho H_B$  и  $\psi_B$ . В этом случае уравнение (I) для вычисления скорости роста трещины примет вид:

$$v_c = f(C_i, K_{I,max}; \rho H_B, \psi_B). \quad (2)$$

Необходимым условием для построения инвариантных диаграмм статической и циклической коррозионной трещиностойкости материала является обеспечение в процессе испытаний на коррозионную трещиностойкость постоянства электрохимических характеристик в вершине трещины, т.е.  $\rho H_B = const$  и  $\psi_B = const$ .

Дальнейшие исследования показали, что коррозионная трещиностойкость зависит не от абсолютных значений  $\rho H_B$  и  $\psi_B$ , а от электрохимических критериев  $\Delta\psi_a$  и  $\Delta\psi_B$ , характеризующих интенсивность механизмов локального анодного растворения и водородного охрупчивания металла в окрестности вершины трещины, и поэтому уравнение (2) следует представлять в виде:

$$v_c = f(C_i, K_{I,max}; \beta_a, \Delta\psi_a; \beta_B, \Delta\psi_B), \quad (3)$$

где  $\beta_a$  и  $\beta_B$  - характеристики системы металл-водная среда при действии механизмов локального анодного растворения и водородного охрупчивания.

Для реализации выдвинутых концепций нового подхода разработаны методики, которые обеспечивают проведение испытаний на статическую и циклическую коррозионную трещиностойкость при постоянных напряженно-деформированном состоянии и электрохимических условиях в вершине трещины, а также с одновременным измерением электрохимических характеристик на поверхности образца и в вершине коррозионно-усталостной трещины по мере ее развития. Особенностью этих методик является наличие в образцах одного или двух отверстий в плоскости трещины для установки капилляров для

измерения  $pH_g$  и  $\varphi_g$ . Для испытаний тонколистовых материалов предложены круглый образец и прямоугольный образец с накладками. Все электрохимические исследования обеспечиваются тремя конструктивными вариантами капилляров: для измерения  $pH_g$ , для измерения  $\varphi_g$  и для измерения  $\varphi_g$  при отсосе среды из вершины трещины.

С учетом специфики исследований в жидких средах и применяемых для этой цели образцов разработан ряд новых конструктивных вариантов установок для испытаний чистым изгибом и осевым растяжением при обычных и высоких скоростях нагружения.

Разработанные в рамках нового подхода методики открывают широкие возможности в области исследований статической и циклической коррозионной трещиностойкости конструкционных материалов, а также создают необходимые предпосылки для изучения физико-химических процессов в вершине трещины при разрушении материалов в коррозионной среде с целью разработки эффективных методов защиты конструкций от коррозионно-механического разрушения.

В третьей главе дан обзор существующих методик исследования электрохимических условий в вершине трещины и полученных по ним результатов за последние двадцать лет; представлены и обобщены новые данные о тенденциях изменения  $pH_g$  и  $\varphi_g$  для стационарной и развивающейся трещины в зависимости от различных факторов (химического состава стали, исходного уровня коэффициента интенсивности напряжений и  $pH_g$ , частоты нагружения, температуры среды, потенциала внешней поляризации, состава и концентрации ингибитора и др.); изучена взаимосвязь электрохимических условий в вершине коррозионно-усталостной трещины со скоростью ее роста; установлены наиболее важные факторы, определяющие тенденцию изменения  $pH_g$  и  $\varphi_g$ , и дана оценка вероятности водородной депольаризации водной среды в вершине коррозионно-усталостной трещины при статическом и циклическом нагружениях в зависимости от исследуемых факторов.

Тенденции изменения  $pH_g$  и  $\varphi_g$  исследованы на образцах из сталей различных марок, а также титанового и алюминиевого сплавов в дистиллированной воде и 3%-м растворе  $NaCl$ . При этом, в частности, установлено:

- электрохимические характеристики в вершине стационарной и развивающейся трещины существенно отличаются от их значений на поверхности образца и непрерывно изменяются в процессе испытаний и по мере развития трещины;
- существует единая закономерности изменения хронограмм

$\rho H_B$  для стационарной статически нагруженной трещины у всех исследуемых систем металл-среда, заключающаяся в понижении его значений с последующим циклическим затуханием и стабилизацией на определенном уровне при сохранении или незначительном повышении  $\rho H_x$ ;

- каждой системе металл-среда присущи свои характерные особенности изменения хронограмм  $\psi_B$  и  $\psi_x$  при сохранении более положительного значения  $\psi_x$ ;

- электрохимические характеристики по длине статически нагруженной стационарной трещины изменяются по закону

$$\begin{aligned} \rho H_x &= \rho H_{nc} [1 - (x/l)^{n_1} \exp(-n_2(x/l))]; \\ \psi_x &= \psi_{nc} [1 + (x/l)^{m_1} \exp(m_2(x/l))], \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\rho H_{nc}$ ,  $\psi_{nc}$  и  $\rho H_x$ ,  $\psi_x$  - соответственно значения  $\rho H$  и  $\psi$  на поверхности образца и в точке, удаленной от нее на расстояние  $x$ ;  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $m_1$  и  $m_2$  - параметры системы металл-среда;

- для развивающейся циклически нагруженной трещины по мере ее роста  $\rho H_B$  в зависимости от исходного уровня и исследуемой системы металл-среда может как повышаться, так и понижаться, а  $\psi_B$  только смещаться в катодную сторону;

- существует следующая тенденция изменения электрохимических характеристик в вершине коррозионно-усталостной трещины: на непрерывное уменьшение во времени их значений при ее закрытии накладываются соответствующие переменные величины, амплитуда которых возрастает и зависит от размаха коэффициента интенсивности напряжений цикла, т.е.

$$\begin{aligned} \rho H_B^0(N) &= \rho H_B^3(\tau) + \Delta \rho H_B(\Delta K_I); \quad \tau = \tau(N); \quad \Delta K_I = \Delta K_I(N); \\ \psi_B^0(N) &= \psi_B^3(\tau) + \Delta \psi_B(\Delta K_I); \quad \tau = \tau(N); \quad \Delta K_I = \Delta K_I(N), \end{aligned} \quad (5)$$

где  $\rho H_B^0$ ,  $\psi_B^0$  и  $\rho H_B^3$ ,  $\psi_B^3$  - соответственно значений  $\rho H$  и  $\psi$  в момент открытия и закрытия трещины;  $\tau$  - время;  $N$  - число циклов нагружения;  $\Delta K_I$  - размах коэффициента интенсивности напряжений;

- для данной системы металл-среда существует минимальное значение  $\rho H_B^{\min}$  как для стационарной, так и для развивающейся (для развивающейся трещины оно ниже, чем для стационарной) трещины, которое можно считать определенной характеристикой элект-

рохимических условий системы;

- путем наложения потенциала внешней поляризации или введения ингибирующих добавок можно изменить электрохимические условия в вершине стационарной и развивающейся трещины в более благоприятную сторону по сравнению с исходными для данной системы металл-среда;

- основными факторами, которые определяют значение и тенденцию изменения электрохимических характеристик в вершине стационарной трещины являются продолжительность взаимодействия среды с металлом  $\bar{t}$  и ее температура  $T_c$ , коэффициент интенсивности напряжений  $K_I$ , длина трещины  $\ell$ , потенциал внешней поляризации  $\varphi_n$ , состав и концентрация ингибирующих добавок  $C_u$ , включая кислород, а для развивающейся коррозионно-усталостной трещины также частота нагружения  $f$  и скорость образования новой поверхности разрушения  $v_c$ ;

- в общем виде тенденцию изменения электрохимических характеристик в вершине развивающейся коррозионно-усталостной трещины с учетом определяющих ее факторов можно представить в виде

$$f[\rho_{H_2}(N)] = f_1[\rho_{H_2}(\bar{t}, K_I, T_c, \varphi_n, C_u)] + f_2[\Delta\rho_{H_2}(\Delta K_I, v_c, f)]; \quad (6)$$

$$f[\varphi_3(N)] = f_3[\varphi_3(\bar{t}, K_I, T_c, \varphi_n, C_u)] + f_4[\Delta\varphi_3(\Delta K_I, v_c, f)];$$

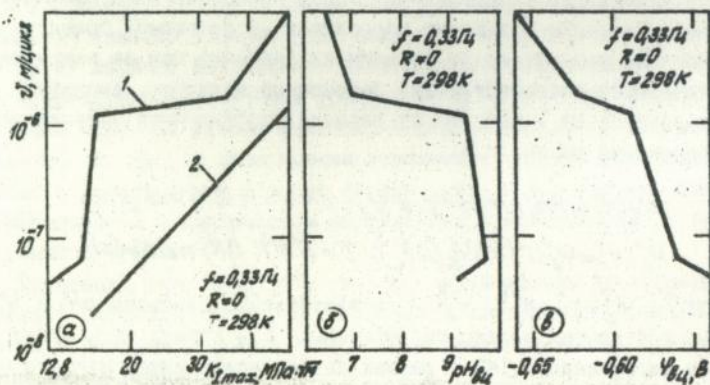


Рис.2. Диаграммы циклической трещиностойкости стали 40X в дистиллированной воде (1а) и на воздухе (2а), а также зависимости скорости роста коррозионно-усталостной трещины  $v_c$  от  $\rho_{H_2}$  (б) и  $\varphi_3$  (в).

- для данной системы металл-среда любому значению скорости роста усталостной трещины в коррозионной среде  $v_c$  (рис.2) соот-

ветствуют вполне определенные значения  $\rho_{H_2}$  и  $\chi_0$ , а каждому участку диаграммы циклической коррозионной трещиностойкости материала (рис.2а)— вполне определенные тенденции изменения этих электрохимических характеристик (рис.2б и рис.2в).

В четвертой главе сформулированы расчетные модели и предложены электрохимические критерии для количественной оценки интенсивности механизмов локального анодного растворения и водородного охрупчивания, обуславливающих ускоренный рост коррозионно-усталостной трещины в водных средах; предложены формулы для определения скорости роста усталостной трещины в деформируемом металле при воздействии коррозионной среды и изложена методика количественной оценки вклада локального анодного растворения и водородного охрупчивания в ее значение.

На основании анализа литературных и собственных данных установлено, что главными механизмами развития трещины при статическом нагружении и ускоренного ее роста при циклическом нагружении являются локальное анодное растворение и водородное охрупчивание. С учетом этого предложена модель ускоренного роста трещины в водных средах, в соответствии с которой приближенно прирост скорости роста усталостной трещины  $\Delta v_c$  равен сумме приростов  $\Delta v_a$  и  $\Delta v_b$ , обусловленных механизмами локального анодного растворения и водородного охрупчивания. Основываясь на графическом представлении диаграмм циклической трещиностойкости в водной и инертной средах в логарифмической системе координат, это предположение запишем в виде:

$$\lg v_c - \lg v = \lg \Delta v_a + \lg \Delta v_b, \quad (7)$$

где  $v_c$  и  $v$  — соответственно скорости роста усталостной трещины в водной и инертной средах.

Таким образом, приближенно для перисовского участка диаграммы циклической трещиностойкости материала в рамках данного модельного представления скорость роста усталостной трещины в водной среде

$$v_c = v \cdot \Delta v_a \cdot \Delta v_b, \quad (8)$$

где значения приростов скорости роста усталостной трещины  $\Delta v_a$  и  $\Delta v_b$  определяются из следующих соображений.

Известно, что при локальном анодном растворении вершина трещины является анодом, а поверхность образца — катодом и электрод-

ный потенциал  $\varphi_B$  смещен в отрицательном направлении относительно потенциала  $\varphi_A$  (рис.3а). При этом разность потенциалов  $\Delta\varphi_A = \varphi_A - \varphi_B$  определяет силу тока локального анодного растворения и, следовательно, скорость растворения в вершине трещины и может быть принята в качестве электрохимического критерия интенсивности этого механизма. Поэтому, если прирост скорости роста усталостной трещины в водной среде  $\Delta v_A$  определяется скоростью анодного растворения металла в вершине, то в первом линейном приближении на основании закона Фарадея в конечном результате получим:

$$\Delta v_A = \beta_A \cdot \Delta\varphi_A, \quad (9)$$

где  $\beta_A$  - коэффициент, характеризующий исследуемую систему металл-среда в случае реализации механизма локального анодного рас-

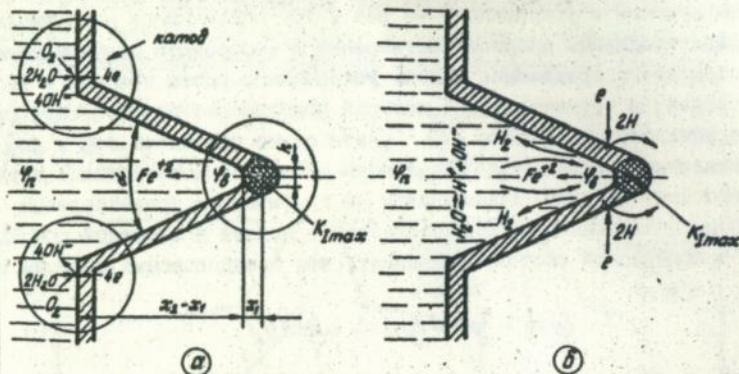


Рис.3. Электрохимические модели развития трещины в водной среде по механизмам локального анодного растворения (а) и водородного охрупчивания (б).

творения и зависящий от плотности и атомной массы, заряда перешедшего в раствор катиона, постоянной Фарадея, геометрических параметров трещины, электропроводности среды и напряженно-деформированного состояния в окрестности вершины трещины.

Известно, что прирост скорости роста усталостной трещины в водной среде по механизму водородного охрупчивания  $\Delta v_B$  вызывается водородом, образовавшимся в трещине в результате электрохимических процессов и диффундирующим из нее в металл в направлении зоны максимальных растягивающих напряжений (рис.3б). Ве-

личина  $\Delta V_B$  регламентируется количеством диффундирующего водорода, которое зависит от его концентрации и степени заполнения поверхности в окрестности вершины трещины, коэффициента диффузии, а также времени экспозиции. Из-за эвентуального выделения в атмосферу части образовавшегося в окрестности вершины трещины водорода трудно установить в общем случае, как это может быть сделано при локальном анодном растворении, количественную взаимосвязь между этими величинами. Тем не менее, если рассматривать одну и ту же систему металл-среда, то концентрацию водорода в зоне разрушения можно считать пропорциональной интенсивности образования электролитического водорода в вершине трещины. Поэтому, если ее оценить в первом приближении с помощью величины  $\Delta \varphi_B = \varphi_* - \varphi_B$ , характеризующей сдвиг электродного потенциала  $\varphi_B$  относительно потенциала равновесного водородного электрода  $\varphi_* = -14 - 59,1 \rho H_B$  и рассматривать ее как электрохимический критерий интенсивности механизма водородного охрупчивания, то прирост  $\Delta V_B$  в конечном счете может быть представлен в виде

$$\Delta V_B = \beta_a \cdot \Delta \varphi_B, \quad (10)$$

где  $\beta_B$  - коэффициент, характеризующий исследуемую систему металл-среда в случае водородного охрупчивания и зависящий от количества электролитического водорода и степени заполнения им поверхности в окрестности вершины трещины, коэффициента диффузии водорода, его количества и времени экспозиции, критической концентрации водорода в зоне максимальных растягивающих напряжений и напряженно-деформируемого состояния в окрестности вершины трещины.

Таким образом, на основании электрохимических характеристик в вершине трещины и на поверхности образца можно дать количественную оценку вклада механизмов локального анодного растворения и водородного охрупчивания в увеличение скорости роста усталостной трещины в коррозионной среде, а также определить ее значение по формулам, которые в пределах парисовского участка диаграммы циклической трещиностойкости материала на воздухе запишутся в виде

$$\begin{aligned} v_c &= C_i (K_{I \max})^n (\beta_a \cdot \Delta \varphi_a \cdot \beta_B \cdot \Delta \varphi_B) \quad \text{или} \\ v_c &= 10^{-7} (K_{I \max} / K_{I_n})^n (\beta_a \cdot \Delta \varphi_a \cdot \beta_B \cdot \Delta \varphi_B), \end{aligned} \quad (11)$$

где  $K_{I*}$  - значение характеристики циклической трещиностойкости материала на воздухе при скорости роста усталостной трещины  $v' = 10^{-7}$  м/цикл.

Для определения коэффициентов  $\beta_a$  и  $\beta_b$  разработаны специальные методики.

Изложенную методологию впервые использовали для количественной оценки вклада механизмов локального анодного растворения и водородного охрупчивания в увеличение скорости роста усталостной трещины для стали 40X в дистиллированной воде в зависимости от коэффициента интенсивности напряжений и частоты нагружения (рис. 4). В исследуемом диапазоне изменения коэффициента интенсивности напряжений прирост скорости роста усталостной трещины для системы сталь 40X-дистиллированная вода обусловлен в основном водородным охрупчиванием, интенсивность которого возрастает с понижением частоты нагружения.

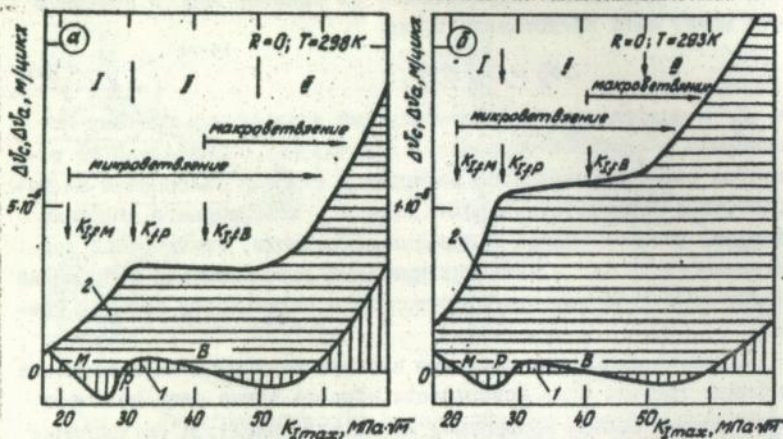


Рис. 4. Вклад механизмов локального анодного растворения (1) и водородного охрупчивания (2) в прирост скорости роста усталостной трещины для стали 40X в дистиллированной воде при частотах нагружения  $f_1 = 0,33$  Гц (а) и  $f_2 = 0,10$  Гц (б).

В пятой главе : примере ряда систем металл-среда доказывается, что только при соблюдении постоянства электрохимических условий в вершине развивающейся трещины в процессе испытаний на коррозионную трещиностойкость обеспечивается инвариантность диаграмм статической и циклической коррозионной трещиностойкости материала; исследуется влияние исходного уровня  $\rho H_g$  и потенци-

ала внешней поляризации, а также состава и концентрации ингибирующих добавок на циклическую трещиностойкость материала; описана методика выбора оптимальной марки материала на основании его инвариантных диаграмм; изложена принципиально новая методика построения базовых диаграмм циклической коррозионной трещиностойкости конструкционных материалов для расчетов конструкций на долговечность при их работе в коррозионной среде; приведены результаты решения в рамках предложенного подхода некоторых практических вопросов.

Испытания на коррозионную трещиностойкость ряда систем металл-среда показали (рис.5), что в случае постоянных на поверхности образца и неконтролируемых в вершине трещины электрохимичес-

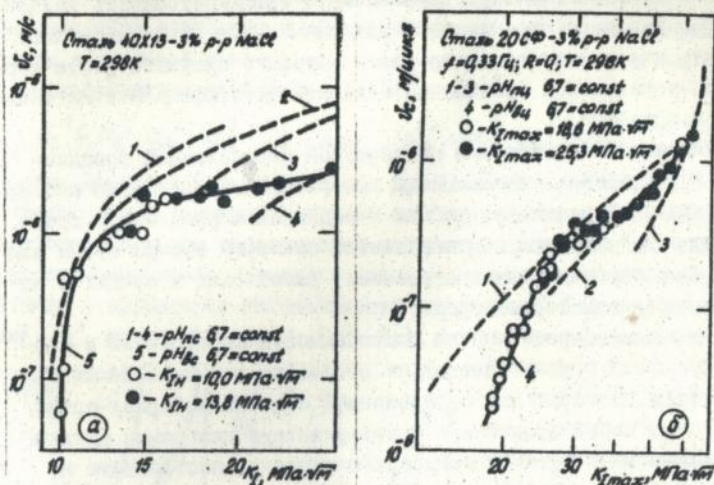


Рис.5. Неинвариантные (1а-4а и 1б-3б) и инвариантные (5а и 5б) диаграммы статической коррозионной трещиностойкости стали 40X13 (а) и циклической коррозионной трещиностойкости стали 20CФ (б) в 3%-м растворе NaCl.

ких условиях диаграммы статической и циклической коррозионной трещиностойкости материала при различных исходных значениях коэффициента интенсивности напряжений существенно отличаются между собой и имеют тенденцию к сближению только на верхнем участке диаграммы, где механический фактор, как известно, доминирует. При этом наблюдается закономерность: чем выше исходный коэффициент интенсивности напряжений, тем больше коррозионная трещино-

стойкость стали. Поэтому такие диаграммы неинвариантны и они неоднозначно характеризуют коррозионную трещиностойкость материала. В случае соблюдения постоянства электрохимических условий в вершине трещины диаграммы статической и циклической коррозионной трещиностойкости материала не зависят дополнительно от исходного коэффициента интенсивности напряжений и, следовательно, могут считаться инвариантными. Только такие диаграммы однозначно характеризуют коррозионную трещиностойкость исследуемого материала и пригодны для оценки ресурса работы элементов конструкции в коррозионной среде.

Многочисленными исследованиями установлено, что путем изменения исходного значения  $\rho N_s$ , величины потенциала внешней поляризации и концентрации ингибирующих добавок можно контролировать не только циклическую коррозионную трещиностойкость материала, но и характер его исходной диаграммы, т.е. создавать либо устранять участок плато, в пределах которого скорость роста коррозионно-усталостной трещины не зависит от коэффициента интенсивности напряжений.

Инвариантные диаграммы циклической коррозионной трещиностойкости материала использованы при разработке методики выбора его оптимальной марки для работы в заданной коррозионной среде. Эффективность методики подтверждается примером выбора стали для деталей газоперекачивающих агрегатов, работающих в средах с высоким содержанием сероводорода.

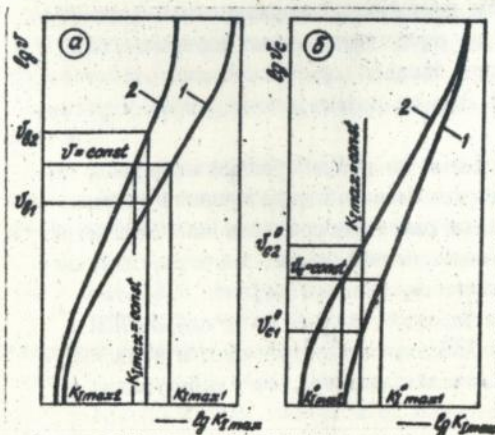
В настоящее время оценка долговечности конструкций в коррозионной среде осуществляется на основании так называемых базовых кривых, которые для определенной системы материал-среда представляют собой предельную неинвариантную диаграмму циклической коррозионной трещиностойкости материала, построенную по максимальным скоростям роста коррозионно-усталостной трещины, получаемым известными методиками испытаний на циклическую коррозионную трещиностойкость, но без учета электрохимических условий в вершине трещины. Для ее построения необходимо большое количество экспериментальных данных, поэтому создание такой кривой для новых материалов, а также за ограниченный период времени не реально. Кроме того, по мере накопления новой информации их следует пересматривать, как это периодически делается в отношении базовой кривой материалов для сосудов высокого давления.

Более совершенной и корректной является методология постро-

ения базовой кривой или базовой диаграммы статической и циклической коррозионной трещиностойкости материала с помощью его инвариантных диаграмм, учитывающих экстремальные эксплуатационные и электрохимические условия в вершине коррозионно-усталостной трещины. В соответствии с предложенной методологией скорость роста коррозионно-усталостной трещины на базовой диаграмме циклической коррозионной трещиностойкости материала  $v_c^K$  равна скорости ее роста в испытываемом образце  $v_c^0$  при экстремальных эксплуатационных условиях (по частоте нагружения, коэффициенте асимметрии и форме цикла, температуре) и постоянных электрохимических условиях в вершине трещины, соответствующих условиям на поверхности, т.е.  $\rho H_B = \rho H_A$ , с учетом возможных изменений напряженно-деформированного состояния и электрохимических условий в вершине трещины в реальной конструкции по сравнению с испытываемым образцом посредством коэффициентов  $\alpha^t$  и  $\alpha^g$ :

$$v_c^K = v_c^0 \cdot \alpha^t \cdot \alpha^g \quad \text{или} \quad v_c^K = v_c^0 \cdot \alpha_{\text{г}}^t \cdot \alpha_{\text{г}}^g \quad (12)$$

В основу данной методики положено предположение, что обусловленное переходом к толщинам реальной конструкции изменение напряженно-деформированного состояния не оказывает существенного влияния на электрохимические условия в вершине трещины при одинаковом значении коэффициента интенсивности напряжений. Поэтому коэффициент  $\alpha^t$  можно определить (рис. 6а), исходя из диаграмм циклической трещиностойкости



материала на воздухе, построенных по результатам испытаний образцов базовой  $t_0$  и соответствующей усло-

Рис. 6. Инвариантные диаграммы циклической трещиностойкости материала на воздухе (а) и в водной среде (б) при разных толщинах образца  $t$  (1а и 2а) и значениях  $\rho H_B$  (1б и 2б).

виям плоской деформации максимальной  $t_{max}$  толщины

$$\alpha_k^t = \sqrt{v_{2g}} / \sqrt{v_{1g}} \text{ при } K_{I,max} = const \text{ или } \alpha_k^t = K_{I,max} / K_{I,max,2} \text{ при } \dot{v} = const \quad (I3)$$

и считать, что эта величина будет такой же и в случае воздействия среды. Коэффициент  $\alpha^3$  вычисляется (рис.6б) на основании инвариантных диаграмм циклической коррозионной трещиностойкости материала, построенных по результатам испытаний образцов толщиной  $t_0$  в заданной среде с  $\rho H_n$  и в среде с  $\rho H_n = \rho H_g^{min}$ , имитирующей экстремальные электрохимические условия в вершине развивающейся трещины:

$$\alpha_k^3 = \sqrt{v_{2g}^0} / \sqrt{v_{1g}^0} \text{ при } K_{I,max} = const \text{ или } \alpha_k^3 = K_{I,max}^0 / K_{I,min,2}^0 \text{ при } \dot{v} = const \quad (I4)$$

Значения коэффициентов  $\alpha^t$  и  $\alpha^3$  следует определять для каждого участка исходной инвариантной диаграммы циклической коррозионной трещиностойкости материала.

Практически построение базовой диаграммы циклической коррозионной трещиностойкости материала осуществляется путем смещения его исходной инвариантной диаграммы, построенной по результатам испытаний образцов базовой толщины  $t_0$  при экстремальных эксплуатационных условиях и при  $\rho H_g = \rho H_n = const$ , сначала на величину  $lg \alpha^t$ , чтобы учесть влияние толщины реальной конструкции, а затем на величину  $lg \alpha^3$ , чтобы учесть влияние экстремальных электрохимических условий в вершине коррозионно-усталостной трещины. Такое смещение необходимо сделать для каждого участка исходной инвариантной диаграммы циклической коррозионной трещиностойкости материала и затем по смещенным точкам построить огибающую кривую, которая и будет базовой диаграммой для расчетов конструкции на долговечность при ее работе в конкретной коррозионной среде.

С использованием построенных по разработанным методикам инвариантных и базовых диаграмм циклической коррозионной трещиностойкости материала дана оценка работоспособности насосных штанг из сталей 15Х2НМФ и 20Н2М в зависимости от их диаметра, величины допускаемых приведенных напряжений, размера дефекта и состава рабочей среды, а также диска паровой турбины из стали 34ХН1М в зоне фазового перехода после 146 тыс.ч эксплуатации в зависимости от возможного места образования трещины, ее конфигурации и размера.

В шестой главе представлены результаты испытаний на цикли-

ческую коррозионную трещиностойкость корпусных сталей 15Х2МФА и 15Х2НМФА и их сварных соединений в реакторной воде борного регулирования при постоянных электрохимических условиях в вершине развивающейся трещины, а также с учетом их изменения; построены инвариантные и базовые диаграммы циклической коррозионной трещиностойкости исследуемых материалов с учетом некоторых наиболее важных эксплуатационных факторов; на основании результатов исследования закономерностей изменения электрохимических характеристик в вершине стационарной и развивающейся трещины дана оценка склонности материалов к водородному охрупчиванию.

Впервые разработана и осуществлена программа обширных экспериментальных исследований циклической коррозионной трещиностойкости отечественных корпусных сталей и их сварных соединений в реакторной воде борного регулирования с учетом наиболее важных эксплуатационных факторов. По результатам испытаний построены инвариантные диаграммы циклической коррозионной трещиностойкости сталей 15Х2МФА и 15Х2НМФА, сварных швов марок Св-10ХМФА и Св-13Х2МТ, основных материалов и зон их сплавления сварного соединения "антикоррозионная наплавка-корпусная сталь" в зависимости от категории прочности стали, частоты нагружения, коэффициента асимметрии и температуры среды, а также базовые диаграммы для этих материалов с учетом экстремальных эксплуатационных и электрохимических условий в вершине трещины для оценки работоспособности корпуса водо-водяного энергетического реактора. Также впервые изучены тенденции изменения  $pH_3$  и  $\varphi_3$  в вершине стационарной статически нагруженной и развивающейся циклически нагруженной трещины в испытываемых материалах.

В результате проведенных исследований, в частности, установлено:

- циклическая коррозионная трещиностойкость стали с повышением категории прочности понижается, а с увеличением коэффициента асимметрии цикла - возрастает;
- циклическая коррозионная трещиностойкость сварного шва марки Св-10ХМФА не уступает трещиностойкости стали 15Х2МФА;
- циклическая коррозионная трещиностойкость зон сплавления сварного соединения расположена в диапазоне, ограниченном ее значениями для основных материалов, которые образуют соединение;
- для корпусных сталей и их сварных соединений существует взаимосвязь между электрохимическими характеристиками в вершине

развивающейся трещины и скоростью ее роста (рис.7);

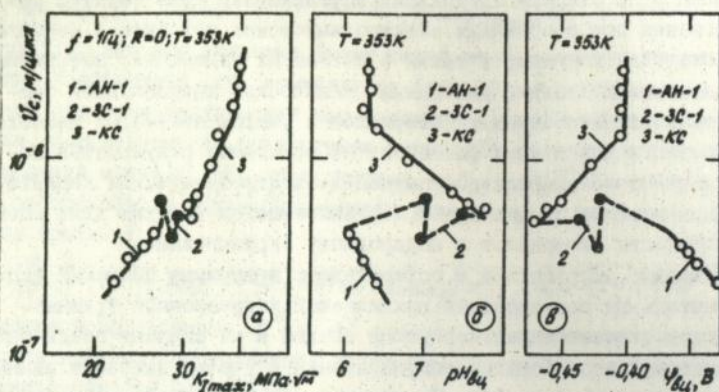


Рис.7. Диаграмма циклической коррозионной трещиностойкости сварного соединения "антикоррозионная наплавка-корпусная сталь" в реакторной воде борного регулирования (а), а также зависимости скорости роста коррозионно-усталостной трещины  $v_c$  от  $\rho_{M_b}$  (б) и  $\chi_B$  (в).

- диаграмма циклической коррозионной трещиностойкости сварного соединения состоит из соответствующих участков диаграмм основных материалов и зон их сплавления, образующих соединение (рис.7а);

- корпусная сталь 15Х2МФА категории прочности КП-90, как и сварной шов марки Св-10ХМФТ, при длительном воздействии среды подвержены водородному охрупчиванию в большей степени, чем сталь категории прочности КП-45, а зоны сплавления менее стойки против водородного охрупчивания по сравнению с основными материалами; опасность водородного охрупчивания в сварном соединении возрастает с увеличением глубины трещины и коэффициента асимметрии цикла.

В седьмой главе изложены результаты обширных исследований влияния состава и концентрации ингибиторов коррозии различного принципа действия на электрохимические условия в вершине стационарной и развивающейся трещины, а также на циклическую коррозионную трещиностойкость стали 40Х в дистиллированной воде; предложены усредненные электрохимические параметры оценки эффективности ингибиторной защиты изделий при наличии в них трещины, с учетом которых разработана методика выбора ингибиторов по их воздействию на механизмы локального анодного растворения и водо-

родного охрупчивания; изложены методики определения оптимальной концентрации ингибитора в зависимости от его состава, размера трещины и коэффициента интенсивности напряжений.

Исследованиями тенденций изменения электрохимических характеристик в вершине трещины при испытаниях стали 40Х в дистиллированной воде, ингибированной ингибиторами коррозии различного принципа действия, установлено, что повышение ее циклической коррозионной трещиностойкости обусловлено снижением интенсивности процессов локального анодного растворения и водородного охрупчивания. Поэтому для оценки эффективности ингибиторов можно использовать электрохимические критерии  $\Delta\varphi_a$  и  $\Delta\varphi_b$ . Однако непосредственная оценка исследуемых ингибиторов, как это показано на примере нитрита натрия (рис.8), связана с большими трудностями из-за изменения электрохимических характеристик

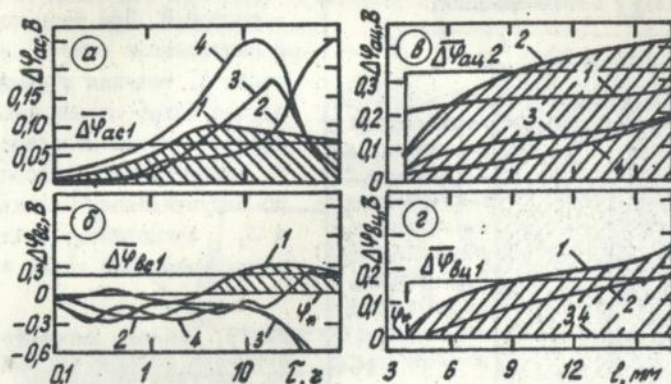


Рис.8. Изменение критериев  $\Delta\varphi_a$  (а и в) и  $\Delta\varphi_b$  (б и г) в вершине стационарной трещины от времени  $\tau$  (а и б) и развивающейся трещины от ее длины  $l$  (в и г) при защите стали 40Х в дистиллированной воде нитритом натрия различной концентрации  $C_u$ : 1 - 0 моль/л; 2а, 2б - 0,04 моль/л; 2в, 2г - 0,03 моль/л; 3 - 0,10 моль/л; 4 - 0,15 моль/л.

$\Delta\varphi_a$  и  $\Delta\varphi_b$  с течением времени или числа циклов нагружения по весьма сложному закону. Поэтому нами предложены усредненные электрохимические параметры оценки эффективности ингибиторной защиты по механизму локального анодного растворения

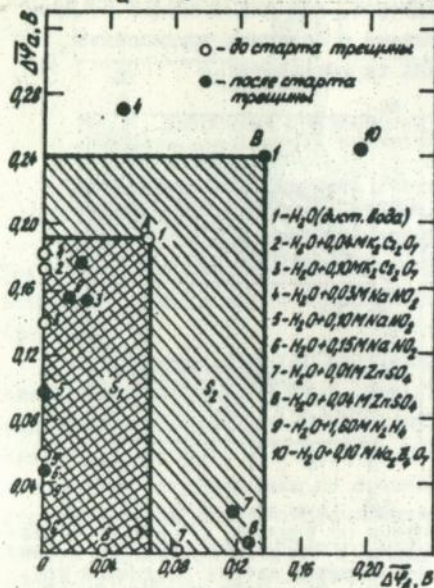
$$\overline{\Delta\varphi}_{ac} = \frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} [\Delta\varphi_{ac}(\tau)] d\tau \quad \text{или} \quad \overline{\Delta\varphi}_{ac} = \frac{1}{N_0} \int_0^{N_0} [\Delta\varphi_{ac}(N)] dN. \quad (15)$$

и по механизму водородного охрупчивания

$$\overline{\Delta\varphi}_{\text{вс}} = \frac{1}{\tau_0} \int_0^{\tau_0} [\Delta\varphi_{\text{вс}}(\tau)] d\tau \quad \text{или} \quad \overline{\Delta\varphi}_{\text{вс}} = \frac{1}{N_0} \int_0^{N_0} [\Delta\varphi_{\text{вс}}(N)] dN, \quad (16)$$

где  $\tau_0$  – время испытаний при статическом нагружении;  $N_0$  – заданное число циклов при циклическом нагружении.

Предложенные параметры позволяют с новых позиций подойти к решению вопроса выбора ингибиторов. Если представить результаты количественной оценки эффективности ингибиторной защиты стали 40X в дистиллированной воде при наличии трещины в плоскости с координатами  $\Delta\varphi_A - \Delta\varphi_B$  (рис.9), то исследуемая система изобразится на



ней до старта коррозионно-усталостной трещины точкой А, а при ее распространении – точкой В. При этом точка В расположена выше и правее точки А, так как в данном случае более интенсивны процессы локального анодного растворения и водородного охрупчивания. Площади  $S_1$  и  $S_2$ , заключенные между осями координат точек А и

Рис.9. Влияние ингибиторов коррозии различного принципа действия на систему сталь 40X–дистиллированная вода до старта (область  $S_1$ ) и при росте (область  $S_2$ ) коррозионно-усталостной трещины.

В, есть области необходимой защиты системы от локального анодного растворения и водородного охрупчивания соответственно до старта и при развитии коррозионно-усталостной трещины. Поэтому, если добавка (компонент) среды вызывает смещение точек А и В к точке О пересечения осей координат, то она является ингибитором соответственно старта или роста коррозионно-усталостной трещины, если в противоположную сторону, то стимулятором. Идеальным ингибитором коррозионно-механического разрушения при наличии трещины окажется добавка, вызывающая смещение точек А и В в точку О. Добавки,

сдвигающие точки А и В на ось  $0 - \overline{\Delta\varphi_B}$ , будут ингибиторами локального анодного растворения, а на ось  $0 - \overline{\Delta\varphi_A}$  — ингибиторами водородного охрупчивания. Поскольку водородное охрупчивание более опасный вид коррозионно-механического разрушения, чем локальное анодное растворение, то ингибиторам водородного охрупчивания следует отдавать предпочтение. Однако с экономической точки зрения не всегда целесообразно стремиться к выбору идеального ингибитора, даже путем изменения его концентрации.

Диаграммы  $\overline{\Delta\varphi_A} - \overline{\Delta\varphi_B}$  могут быть использованы при определении оптимальной марки и структуры металла для работы в заданной среде, а также при выборе наименее агрессивной среды для конкретного материала с трещинами. Усредненные электрохимические параметры положены в основу методики выбора оптимальной концентрации ингибитора, сущность которой проиллюстрирована на примере нитрита натрия (рис. 10). При этом за оптимальную принимается такая кон-

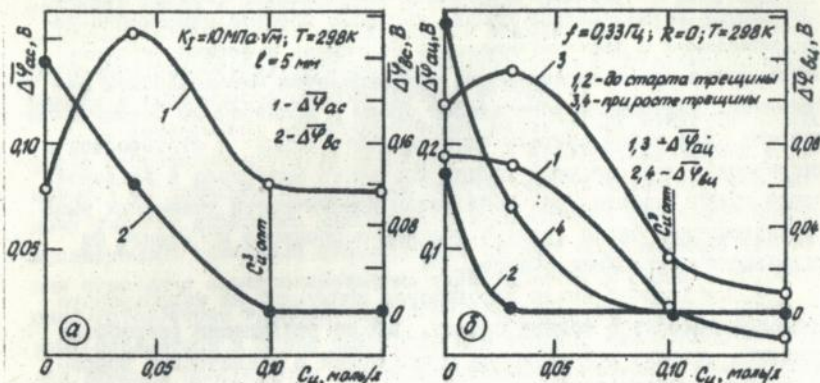


Рис. 10. Изменение усредненных электрохимических параметров  $\Delta\varphi_A$  и  $\Delta\varphi_B$  в зависимости от концентрации нитрита натрия  $C_{NaNO_2}$  для стационарной (а) и развивающейся (б) трещины при защите стали 40Х в дистиллированной воде.

центрация ингибитора, выше которой электрохимические параметры  $\Delta\varphi_A$  и  $\Delta\varphi_B$  изменяются незначительно.

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Проведенные исследования и обобщения заложили основу нового научного направления в механике коррозионного разрушения металлов — коррозионной трещиностойкости металлов, базирующейся на оригинальных концепциях и методиках. В рамках этого научного

направления получены принципиально важные результаты и сделаны следующие выводы.

1. На примере ряда систем металл-среда доказано, что при несоблюдении постоянства электрохимических условий в вершине трещины в процессе испытаний на коррозионную трещиностойкость диаграммы статической и циклической коррозионной трещиностойкости исследуемого материала неинвариантны.

2. Предложен новый подход к оценке коррозионной трещиностойкости металлов, в соответствии с которым скорость роста трещины в деформируемом материале при воздействии коррозионной среды определяется параметрами, характеризующими не только напряженно-деформированное состояние материала около вершины трещины, но и физико-химические процессы во времени и состояние вновь образующихся поверхностей разрушения в окрестности вершины трещины.

3. Сформулирована расчетная модель наиболее распространенных систем металл-водная среда, согласно которой напряженно-деформированное и электрохимическое состояния в вершине трещины описываются тремя параметрами: коэффициентом интенсивности напряжений, водородным показателем среды и электродным потенциалом металла. Для такой системы однозначность данных о статической и циклической коррозионной трещиностойкости материала в заданной среде обеспечивается при соблюдении идентичности указанных выше характеристики около вершины трещины в процессе испытаний на коррозионную трещиностойкость.

4. Предложена новая методология испытаний на коррозионную трещиностойкость в водных средах. Для ее реализации разработан комплекс методик исследования статической и циклической коррозионной трещиностойкости в условиях осевого растяжения и чистого изгиба с обеспечением постоянства напряженно-деформированного и электрохимического состояний около вершины трещины, а также с учетом их изменения. Предложены новые геометрии образцов (круглый, прямоугольный и компактный с отверстиями для измерительных капилляров, прямоугольный с накладками) и средства для электрохимических исследований в вершине трещины. Созданы новые высокоэффективные и простые в эксплуатации конструктивные варианты испытательных машин на коррозионную трещиностойкость осевым растяжением и чистым изгибом с учетом различных эксплуатационных факторов, в том числе повышенных температур (до 523 К) при давлении до 5 МПа. Разработана методика стабилизации напряженно-де-

формированного состояния в окрестности вершины трещины в прямоугольных образцах с краевой трещиной в условиях чистого изгиба. По данным разработкам получено 8 авторских свидетельств Госкомизобретений СССР на изобретения.

5. Для многих марок сталей, алюминиевого и титанового сплавов получены неизвестные ранее данные о закономерностях изменения водородного показателя среды и электродного потенциала металла в вершине стационарной и развивающейся трещины в процессе испытаний на коррозионную трещиностойкость. Исследовано также влияние на эти электрохимические характеристики длины трещины, коэффициента интенсивности напряжений, потенциала внешней поляризации, температуры среды, химического состава материала, частоты нагружения, состава и концентрации ингибитора и др. Установлены наиболее важные факторы, определяющие тенденцию изменения водородного показателя среды и электродного потенциала металла, и дана оценка вероятности водородной деполяризации водной среды в вершине коррозионно-усталостной трещины при статическом и циклическом нагружении в зависимости от исследуемых факторов.

6. Установлена непосредственная взаимосвязь между скоростью роста коррозионно-усталостной трещины и электрохимическими условиями в ее вершине. На примерах многих систем показано, что каждому участку диаграммы циклической коррозионной трещиностойкости исследуемого материала соответствуют вполне определенные тенденции изменения электрохимических характеристик в вершине коррозионно-усталостной трещины. При этом доказано, что путем изменения этих параметров в более благоприятную сторону наложением потенциала внешней поляризации или варьированием составом и концентрацией ингибирующих добавок можно существенно (до уровня трещиностойкости на воздухе) повысить коррозионную трещиностойкость материала.

7. Разработана методология количественной оценки вклада механизмов локального анодного растворения и водородного охрупчивания в ускоренный рост коррозионно-усталостной трещины в водных средах. Сформулированы приближенные расчетные модели и предложены электрохимические критерии такой оценки. Впервые на примере системы сталь 40X-дистиллированная вода определен вклад механизмов локального анодного растворения и водородного охрупчивания в увеличение скорости роста усталостной трещины в среде с изменением коэффициента интенсивности напряжений и понижением частоты

нагрузки.

8. Предложена новая методология построения базовых диаграмм циклической коррозионной трещиностойкости материала для расчетов конструкций на долговечность в коррозионной среде. Она основана на использовании инвариантных диаграмм, построенных с учетом экстремальных эксплуатационных и электрохимических условий в вершине трещины.

9. Впервые проведены обширные исследования циклической коррозионной трещиностойкости отечественных корпусных сталей 15Х2МФА и 15Х2НМФА, а также их сварных соединений в реакторной воде борного регулирования с учетом воздействия наиболее важных эксплуатационных факторов. Построены инвариантные диаграммы их циклической коррозионной трещиностойкости с учетом этих факторов, а также базовые диаграммы для расчетов на долговечность. Исследованы тенденции изменения водородного показателя среды и электродного потенциала металла в вершине стационарной и развивающейся трещины для этих же материалов и на основании полученных данных произведена оценка их склонности к водородному охрупчиванию.

10. Разработана методология количественной оценки эффективности ингибиторной защиты изделий при наличии в них трещины. Предложены усредненные электрохимические параметры такой оценки, которые также использованы при обосновании нового принципа классификации ингибиторов и разработке методик выбора ингибитора и его оптимальной концентрации для защиты изделий при наличии в них трещины (получено авторское свидетельство Госкомизобретений СССР на изобретение).

Публикации по материалам диссертационной работы

1. Ярема С.Я., Полутранко И.Б., Ратыч Л.В. Зависимость скорости распространения усталостной трещины от степени разрежения воздуха // Физ.-хим. механика материалов. - 1973. - 9, № 3. - с. 18-23.
2. Машина с инерционным силовозбудителем для усталостных испытаний при резонансных частотах / Л.В.Ратыч, С.Я.Ярема, И.Б.Полутранко и др. // Там же. - 1973. - 9, № 5. - С.91-93.
3. Ярема С.Я., Ратыч Л.В., Попович В.В. Диаграммы усталостного разрушения стали 65Г различных термообработок // Там же. - 1975. - II, № 3. - С. 45-51.
4. Ярема С.Я., Ратыч Л.В. Захваты для крепления плоских образ-

- цов при растяжении сосредоточенными силами // Завод. лаб. - 1975. - 4I, № 4. - С. 500-501.
5. Панасюк В.В., Ратыч Л.В., Дмытрах И.Н. Испытательная машина для исследования кинетики усталостной трещины в образцах при чистом изгибе // Физ.-хим. механика материалов. - 1978. - I4, № 5. - С. 63-67.
  6. Методика исследования кинетики усталостной трещины в водных средах при повышенных температурах и давлениях / Л.В.Ратыч, В.И.Похмурский, Ю.М.Зафийовский и др. // Там же. - 1979. - I5, № 5. - С. 78-82.
  7. Ратыч Л.В., Пусяк С.А., Саница М.П. Машина для исследования кинетики трещины при малоциклового усталости в водных средах // Машины и стенды для определения физико-механических свойств материалов. - Львов, 1980. - С. 51-56. (Препр. / АН УССР. Физ.-мех. ин-т; № 23).
  8. Ротационный копер / В.В.Панасюк, С.Я.Ярема, Л.В.Ратыч, З.М.Манюк // Методы и средства оценки трещиностойкости конструкционных материалов. - Киев: Наук. думка, 1981. - С. 174-176.
  9. Дмытрах И.Н., Панасюк В.В., Ратыч Л.В. Методика стабилизации напряженно-деформированного состояния около вершины усталостной трещины в образцах при чистом изгибе // Там же. - С. 220-226.
  10. Машина на растяжение-сжатие для усталостных испытаний при резонансных частотах / Л.В.Ратыч, С.Я.Ярема, И.Б.Полутранко и др. // Там же. - С. 234-238.
  11. Дмытрах И.Н., Панасюк В.В., Ратыч Л.В. Установка для исследования кинетики усталостной трещины в образцах при чистом изгибе в жидких средах // Там же. - С. 275-278.
  12. Ратыч Л.В., Пусяк С.А., Варна Р.А. Испытательная установка для исследования кинетики усталостной трещины в водных средах средних параметров // Там же. - С. 278-282.
  13. Панасюк В.В., Ратыч Л.В., Дмытрах И.Н. К вопросу определения электрохимического состояния в развивающейся трещине при исследовании трещиностойкости материала в коррозионной среде // Физ.-хим. механика материалов. - 1982. - I8, № 3. - С. 42-49.
  14. Панасюк В.В., Ратыч Л.В., Дмытрах И.Н. О некоторых задачах исследования циклической трещиностойкости в жидких средах // Там же. - 1982. - I8, № 6. - С. 42-49.
  15. Панасюк В.В., Ратыч Л.В., Дмытрах И.Н. Определение циклической

- трещиностойкости конструкционных материалов в коррозионной среде // Докл. АН СССР. - 1983. - 269, № I. - С. 109-112.
16. Панасюк В.В., Ратыч Л.В., Дмытрах И.Н. Зависимость скорости роста усталостной трещины в водной коррозионной среде от электрохимических условий в вершине трещины // Физ.-хим. механика материалов. - 1983. - 19, № 4. - С. 33-37.
  17. Панасюк В.В., Ратыч Л.В., Дмытрах И.Н. О некоторых методических особенностях исследования циклической трещиностойкости конструкционных материалов в жидких средах // Механическая усталость металлов. - Киев: Наук. думка, 1983. - С. 284-292.
  18. Панасюк В.В., Ратыч Л.В., Дмытрах И.Н. К теории циклической трещиностойкости конструкционных материалов в коррозионных средах // Publ. Techn. Univ. Heavy Ind., Ser. C.Mach'inery. - 1983. - 38, № I-4. - P. 123-138.
  19. Дмытрах И.Н., Ратыч Л.В. Методика испытаний и построения диаграмм циклической трещиностойкости конструкционных материалов в коррозионной среде при малоциклового усталости // Малоцикловая усталость - механика разрушения, живучесть и материалоемкость конструкций. - М.: ЦНПОМашпрома, 1983. - Вып.2. - С. 21-23.
  20. Ратыч Л.В., Дмытрах И.Н. Расчетно-экспериментальная методика определения долговечности элементов конструкций в коррозионной среде // Там же. - С. 112-114.
  21. Об условиях в вершине трещины при испытаниях материалов в коррозионной среде / Л.В.Ратыч, И.Н.Дмытрах, С.А.Пусяк, О.В.Куров // Защита металлов. - 1984. - 20, № I. - С. 85-90.
  22. Panasyuk V.V., Ratysh L.V., Dmytrakh I.N. Fatigue crack growth in corrosive environments // Fatigue Engng Mater. and Struct. - 1984. - 7, N 1. - P. 1-11.
  23. Панасюк В.В., Ратыч Л.В., Дмытрах И.Н. Методика определения электрохимического состояния в вершине трещины при испытаниях конструкционных материалов на трещиностойкость в коррозионных средах // Завод. лаб. - 1984. - 50, № 7. - С.56-59.
  24. Об электрохимических условиях в вершине трещины при испытаниях на коррозионную трещиностойкость балочных образцов из стали I5X2MФА в водной среде / Л.В.Ратыч, И.Н.Дмытрах, Б.Т.Тимофеев и др. // Физ.-хим. механика материалов. - 1984. - 20, № 3. - С. 69-76.
  25. Ратыч Л.В., Барна Р.А., Долотова Т.С. Циклическая коррози-

- онная трещиностойкость сталей для газоперекачивающих агрегатов // Там же. - 1984. - 20, № 4. - С. 29-34.
26. Ратыч Л.В. Коррозионная трещиностойкость конструкционных материалов: состояние и перспективы развития исследований // Там же. - 1984. - 20, № 5. - С. 6-16.
27. Панасюк В.В., Ратыч Л.В., Грабовский Р.С. Новая методика испытаний на статическую коррозионную трещиностойкость сталей // Применение методов механики разрушения в расчетах строительных металлических конструкций на крупную прочность и долговечность. - Красноярск, 1984. - С. 83-84.
28. Панасюк В.В., Ратыч Л.В., Дмытрах И.Н. Циклическая трещиностойкость металлов в коррозионных средах // Успехи механики. - 1984. - 7, № 3. - С. 37-50.
29. Диаграммы циклической коррозионной трещиностойкости некоторых корпусных сталей / В.В.Панасюк, Л.В.Ратыч, Ю.И.Звездин и др. // Физ.-хим. механика материалов. - 1985. - 21, № 3. - С. 37-45.
30. Ратыч Л.В., Слободян И.М. Влияние ингибиторов на электрохимические условия при испытаниях образцов из стали 40X на статическую коррозионную трещиностойкость // Там же. - 1985. - 21, № 4. - С. 32-37.
31. Повышение долговечности металлоконструкций в нейтральных средах с помощью ингибитора комплексного действия / Ю.И.Бабей, Л.В.Ратыч, З.В.Слободян, И.Н.Дмытрах // Там же. - 1985. - 21, № 6. - С. 51-56.
32. Исследование трещиностойкости и напряженного состояния гибов котельных труб из стали 20 / В.Г.Зеленский, В.Р.Бейзерман, Л.В.Ратыч и др. // Эксплуатационная надежность металла оборудования тепловых электростанций. - М.: Энергоатомиздат, 1987. - С. 50-58.
33. Влияние водной среды на коррозионную трещиностойкость реакторных материалов / В.А.Игнатов, Ю.И.Звездин, В.Т.Тимофеев, В.А.Федорова, Л.В.Ратыч, С.А.Пусяк // Машиностроение. - 1985. - № 4. - С. 15-23.
34. Трещиностойкость металла шва в коррозионной среде при циклическом нагружении / И.Н.Дмытрах, Л.В.Ратыч, В.Т.Тимофеев, Т.А.Чернаенко // Вопр. судостроения. Сер. Сварка. - 1985. - № 39. - С. 43-49.
35. Панасюк В.В., Ратыч Л.В., Дмытрах И.Н. Определение базовых

- диаграмм циклической коррозионной трещиностойкости сталей с учетом экстремальных электрохимических условий в трещине // Докл. АН СССР. - 1986. - 286, № 5. - С. 1128-1131.
36. Панасюк В.В., Ратыч Л.В., Слободян И.М. Методика оценки эффективности ингибиторной защиты сталей от коррозионно-механического разрушения // Физ.-хим. механика материалов. - 1986. - 22, № 3. - С. 3-15.
37. Ратыч Л.В., Слободян И.М. Влияние ингибиторов на электрохимические условия в вершине трещины при циклическом нагружении стали 40X // Там же. - 1986. - 22, № 6. - С. 68-75.
38. Ратыч Л.В., Слободян И.М. Влияние ингибиторов на циклическую коррозионную трещиностойкость стали 40X // Там же. - 1987. - 23, № 1. - С. 7-13.
39. Циклическая коррозионная трещиностойкость сварного соединения "антикоррозионная наплавка - корпусная сталь" Л.В.Ратыч, И.Н.Дмытрах, Б.Т.Тимофеев, Р.И.Вовк // Там же. - 1987. - 23, № 5. - С. 46-52.
40. Panasyuk V.V., Ratysh L.V., Dmytrakh I.N. The role of electrochemical situation at the crack tip in corrosion cracking and corrosion fatigue of metals // Corrosion Sci. and Engng, Bulletin Electrochem. - 1987. - 2, N 6. - P. 553-557.
41. Панасюк В.В., Ратыч Л.В., Дмытрах И.Н. Особенности прогнозирования долговечности конструкций с учетом циклической коррозионной трещиностойкости материалов // Девятый международный коллоквиум "Механическая усталость металлов". - ЧССР, Братислава, 1987. - С. 110-114.
42. Ратыч Л.В., Федорович Я.Т. Циклическая коррозионная трещиностойкость материалов и долговечность насосных штанг // Физ.-хим. механика материалов. - 1988. - 24, № 6. - С. 95-100.
43. Ратыч Л.В., Слободян И.М. Критерии ингибиторной защиты сталей от коррозионно-механического разрушения // Защита металлов. - 1989. - 25, № 5. - С. 723-728.
44. Циклическая трещиностойкость теплоустойчивых сталей марки 15X2MФА и сварных соединений из них в водных средах / С.А.Пусяк, Л.В.Ратыч, Б.Т.Тимофеев, В.А.Федорова // Судостроит. пром-сть. Сер. Материаловедение, Сварка. - 1989. - Вып.8. - С. 5-12.
45. Циклічна корозійна тріщиностійкість сталі 34ХНІМ при фазовому переході води / Л.В.Ратич, В.П.Рабінович, І.М.Слободян,

1. В. Єгорова // Физ.-хим. механика материалов. — 1990. — 26, № 5. — С. 40—47.
46. Ратич Л. В., Барна Р. А. Вплив деяких факторів на електрохімічні умови у верхині корозійно-втомної тріщини // Там же. — 1991. — 27, № 1. — С. 17—26.
47. А. с. 222712 СССР, МКИ G01 42k № 34/01. Ротационный копер / В. В. Панасюк, С. Я. Ярема, З. М. Манюк, Л. В. Ратыч. — Оpubл. 22.07.68, Бюл. № 23.
48. А. с. 415546 СССР, МКИ G01 № 1/28; G01n № 3/08. Образец для исследования распространения трещины в листовом материале / С. Я. Ярема, Л. В. Ратыч. — Оpubл. 15.02.74, Бюл. № 6.
49. А. с. 911241 СССР, МКИ G01 № 17/00. Устройство для испытания образцов на трещиностойкость в коррозионной среде / И. Н. Дмытрах, Л. В. Ратыч, В. В. Панасюк. — Оpubл. 07.03.82, Бюл. № 9.
50. А. с. 911242 СССР, МКИ G01 № 17/00. Способ испытания образцов с трещиной на вязкость разрушения в коррозионной среде / В. В. Панасюк, Л. В. Ратыч, И. Н. Дмытрах. — Оpubл. 07.03.82, Бюл. № 9.
51. А. с. 926561 СССР, МКИ G01 № 3/00. Образец для испытания материалов на вязкость разрушения / В. В. Панасюк, Л. В. Ратыч, И. Н. Дмытрах. — Оpubл. 07.05.82, Бюл. № 17.
52. А. с. 934345 СССР, МКИ G01 № 27/52. Электролитический капилляр для электрохимических исследований трещиностойкости материалов / И. Н. Дмытрах, Л. В. Ратыч, В. В. Панасюк. — Оpubл. 07.06.82, Бюл. № 21.
53. А. с. 1100539 СССР, МКИ G01 № 17/00. Устройство для испытания образцов на трещиностойкость в коррозионной среде / Л. В. Ратыч, И. Н. Дмытрах. — Оpubл. 30.06.84, Бюл. № 24.
54. А. с. 1245953 СССР, МКИ G01 № 17/00. Образец для испытания материалов на коррозионное растрескивание / Л. В. Ратыч, И. Н. Дмытрах. — Оpubл. 23.07.86, Бюл. № 27.
55. А. с. 1420503 СССР, МКИ G01 № 27/46. Способ определения оптимальной концентрации ингибитора / В. В. Панасюк, Л. В. Ратыч, И. М. Слободян. — Оpubл. 30.08.88, Бюл. № 32.



Подписано к печ. 15.10.91. Формат 60×84/16. Печать офсет. Бумага офсет. Усл. п. л. 1,86. Усл. кр.-отт. 2,1. Уч.-изд. л. 2,0. Тираж 100 экз. Зак. 3082. Бесплатно.

Областная книжная типография, 290000, Львов, ул. Стефаника, 11.

466 688

Бесплатно.

AB 25.395