

На правах рукописи



ТАРАКАНОВ ПАВЕЛ ВЛАДИМИРОВИЧ

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ  
ВОДОРОДСОДЕРЖАЩЕЙ СРЕДЫ НА СКОРОСТЬ РОСТА ТРЕЩИН  
ПРИ СТАТИЧЕСКОМ И ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ**

Специальность

01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

МОСКВА – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН) г. Москвы.

**Научный руководитель:** доктор технических наук, профессор,  
**Романов Александр Никитович**

**Официальные оппоненты:** **Морозов Евгений Михайлович** доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва;

**Шипков Андрей Анатольевич** кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет МЭИ», г. Москва.

**Ведущая организация:** Государственный научный центр Российской Федерации Акционерное общество «Научно-производственное объединение «Центральный научно-исследовательский институт технологии машиностроения» (АО «НПО «ЦНИИТМАШ»), г. Москва.

Защита диссертации состоится 25.09.2019 г. в 15<sup>00</sup> на заседании диссертационного совета Д 212.125.05 на базе ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, Москва, Волоколамское шоссе, д. 4

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» и на сайте [https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT\\_ID=102815](https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT_ID=102815).

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета

Федотенков Григорий Валерьевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность проблемы.

Значительное число элементов металлоконструкций эксплуатируется в условиях водородсодержащих сред (ракетно-космическая техника, авиация, химическая, нефтехимическая и газовая промышленность, судостроение, металлообработка, энергетическое машиностроение). Опыт их эксплуатации показывает, что такого рода среды ускоряют процессы развития повреждений и приводят к преждевременному выходу из строя таких элементов конструкций.

Водород влияет на механические характеристики материала, такие как: предел прочности, модуль упругости, характеристики пластичности и хрупкости, а также механики разрушения, тем самым ускоряя развитие разрушения.

В связи с тем, что в элементах конструкций возможно наличие как исходных производственно-технологических дефектов (НПТД) типа трещин, не обнаруженных используемыми методами контроля, так и допускаемых техническими требованиями трещин (преимущественно в металлоемких конструкциях), воздействие водорода, концентрирующегося в вершинах трещин, проявляется особенно активно в ускорении роста трещин.

Анализ экспериментальных данных, полученных многими исследователями, также показывает негативное влияние водорода на долговечность и безопасность машин и оборудования.

Повышение надежности, ресурса и безопасности элементов конструкций, находящихся в условиях воздействия водородсодержащих сред, при статическом или циклическом нагружении является одной из важнейших задач современного машиностроения, как с точки зрения разработки уточненных методов оценки исходного ресурса, так и обоснования методов возможности его продления.

В настоящее время накоплен экспериментальный материал и проводятся теоретические исследования, связанные с водородным растрескиванием конструкционных материалов. В первую очередь эти работы связаны с именами таких ученых, как: В.Т. Алымов, А.Е. Андрейкив, Г.В. Карпенко, Ю.Г. Матвиенко, Е.М. Морозов, В.В. Панасюк, В.С. Харин, Р.В. Херцберг, Г.П. Черепанов, Т.Л. Anderson, С.Д. Beachem, Н.К. Birnbaum, Y. Hirose, Т. Mura, Н.Г. Nelson, R.A. Oriani, P. Sofronis, J. Toribio, Т. Wei, С.А. Zapffe и др.

Существующие теоретические работы, посвященные разработке моделей распространения трещин в элементах конструкций при статическом и циклическом нагружении с учетом воздействия водородсодержащих сред, требуют дополнительных исследований в области описания процессов диффузирования водорода, введения соответствующих критериев разрушения, а также разработки моделей и методов на их основе для оценки распространения трещин в различных элементах конструкций.

Разработка уточненных методов оценки ресурса и предельных состояний требует создания соответствующих методик и деформационно-кинетических критериев накопления повреждений с учетом влияния водородсодержащей

среды при статическом и циклическом нагружении, что является актуальной проблемой.

Целью работы является:

Разработка методики оценки роста трещин в элементах конструкций под действием статического и циклического нагружения в условиях водородсодержащей среды для обоснования исходного и продления ресурса в процессе эксплуатации.

Для достижения указанной цели было необходимо решить следующие задачи:

- Разработать математическую модель для оценки концентрации водорода, диффундирующего в вершину трещины из окружающей среды.
- Разработать критерий определения повреждений с отображением роли механики разрушения и кинетики диффузии (концентрации) водорода в вершине распространяющейся трещины на основании полученных данных о влиянии водородсодержащих сред на механические характеристики материалов, а также разработанных ранее критериях разрушения материалов в инертных средах.
- Разработать методику для оценки скорости роста трещин в элементах конструкций из металлических материалов, находящихся под влиянием водородсодержащей среды и статического нагружения.
- Разработать методику для оценки скорости роста трещин в элементах конструкций из металлических материалов, находящихся под влиянием водородсодержащей среды и циклического нагружения.
- Провести верификацию разработанных методик на базе модельных тестовых задач.
- Применить разработанные методики для расчета типовых элементов конструкций с трещинами.
- Разработать подход для проведения инженерных «экспресс-оценок» скорости роста трещин в наводороживаемых элементах конструкций с помощью модифицированных параметров Пэриса.

Научная новизна работы

- Разработана математическая модель для определения концентрации водорода, диффундирующего из окружающей среды в вершину трещины с ненулевой концентрацией водорода вблизи ее вершины и оценки предельной концентрации, при которой происходит хрупкое разрушение.
- Разработана методика для оценки скорости развития трещины при статическом и циклическом нагружении с учетом кинетики диффузии водорода в вершину трещины.
- Впервые предложен многопараметрический критерий прочности, учитывающий влияние механики деформирования и локальное накопление водорода вблизи вершины трещины.
- Предложенная методика определения доминирующего механизма разрушения материала вблизи вершины трещины позволила установить области на кинетической диаграмме роста трещины, которые характеризуются

разрушением преимущественно по механизму водородного охрупчивания или благодаря усталостному накоплению повреждений вблизи вершины трещины.

- Предложена методика по уточнению параметров в известных критериях механики разрушения для определенных сочетаний пары среда-металл, позволяющая проводить инженерные «экспресс-оценки» скорости роста трещин.

- Показана возможность использования предлагаемых методик для расчетов живучести типовых элементов конструкций, работающих при статическом и циклическом нагружении в условиях водородсодержащей среды.

#### Практическая значимость работы.

Применение программного обеспечения на основе разработанной методики позволит повысить безопасность различных элементов конструкций с трещинами при статическом и циклическом нагружении в условиях водородсодержащих сред, а также решать обратную задачу: для заданного ресурса определять максимально допустимые в металле размеры исходных трещин. Кроме того, возможно скорректировать параметры для существующих инженерных «экспресс-оценок» по критериям механики разрушения для соответствующих пар среда-металл.

#### Реализация результатов работы.

- Разработанные методики для оценки развития трещин в элементах конструкций при статическом и циклическом нагружении в условиях воздействия водородсодержащих сред при разработке лекций и проведении лабораторных работ по курсам: «Физика прочности материалов» (для студентов специальности «Динамика и прочность машин» (150301.02.65)), «Прогнозирование остаточного ресурса» (для бакалавров направления «Прикладная механика» (15.03.03\_02)) МГТУ им Н.Э. Баумана.

#### Степень достоверности результатов проведенных исследований.

Достоверность основных научных положений, выводов и результатов, сформулированных автором, вытекает из обоснованности используемых теоретических подходов, а также подтверждается проведением большого количества вычислительных экспериментов и их сравнением с результатами экспериментальных и теоретических работ других авторов.

Апробация работы. Результаты исследований по теме диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

- 7th International conference on Materials Structure and Micromechanics of Fracture (Brno, Czech Republic, 2013 г).
- XVII International Colloquium on Mechanical Fatigue of Metals (Verbania, Italy, 2014 г).
- 20th European Conference on Fracture. Fracture at all scales (Trondheim, Norway, 2014 г).
- 3rd International Conference on Energy and Environmental Protection (Xi'an, China, 2014 г).
- 2nd International Conference on Advances in Energy and Environmental Science (Guangzhou, China, 2014 г).
- 32 Spanish Conference on Fracture and Structural Integrity (Zamora, Spain, 2015 г);

- ESIS TC-10 Workshop Environmentally Assisted Cracking & Hydrogen Embrittlement (Zamora, Spain, 2015 г).
- 19th European Conference on Fracture. Fracture Mechanics for Durability, Reliability and Safety (Kazan, 2012 г).
- International Conference «Structural Integrity and Lifetime of NPP Equipment» (Kyiv, Ukraine, 2012 г).
- XXIII IGF National Meeting (Favignana, Italy, 2015 г).
- Международном симпозиуме «Физика кристаллов 2013» (Москва, 2013 г).
- Юбилейной XXV Международной инновационно-ориентированной конференции молодых ученых и студентов (Москва, 2013 г).
- Международной конференции «Живучесть и конструкционное материаловедение» (Москва, 2014 г).
- XXXI Всероссийской конференции «Наука и технологии» (Миасс, 2011 г).
- XXXXI Всероссийском симпозиуме «Механика и процессы управления» (Миасс, 2011 г).
- Московском ежемесячном семинаре молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения (Москва, 2011, 2013, 2014 гг.).
- XX Петербургских чтениях по проблемам прочности (Санкт-Петербург, 2012 г);
- Заседании НТС ОАО «НИКИЭТ им. Н.А. Доллежала» «Прочность, материаловедение, коррозия» (Москва, 2010, 2012 гг.).
- 7-й Российской конференции «Методы и программное обеспечение расчетов на прочность» (Геленджик, 2012 г).

Публикации. Основное содержание диссертации представлено в 26 опубликованных работах, включающих 4 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК, 10 статей в зарубежных изданиях, входящих в базу данных Scopus и Web of Science, а также 12 работ в других изданиях.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из четырех глав, введения, заключения и списка литературы из 145 наименований. Общий объем работы 139 страниц основного машинописного текста, включая 15 таблиц и 64 рисунка.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулирована цель исследования, научная новизна и практическая ценность работы, приведено краткое содержание работы по главам.

**В первой главе** рассматриваются общие закономерности взаимодействия металлов с водородом. Приведена классификация механизмов разрушения под действием окружающей среды, согласно международным стандартам. Описаны причины и механизмы водородного охрупчивания металлов и сплавов.

Многими исследователями [Ю.И. Арчаков, Г.В. Карпенко, С.Д. Veachem, P.J. Cotteril, Y. Murakami и др.] отмечено, что водород взаимодействует и растворяется практически в любых металлах и сплавах. Поэтому, вопрос водородной хрупкости является важным как для сталей, так и для сплавов на основе никеля, титана, циркония, ванадия и прочих.

В настоящее время существуют различные точки зрения на механизмы водородного растрескивания, вследствие разногласия о физико-химических процессах, протекающих в вершине трещины, находящейся в водородсодержащей среде. Были предложены различные теории водородного растрескивания: давления, декогезионная, адсорбционная, дислокационная и гидридная. Важный вклад в развитие этих теорий внесли В.В. Панасюк, С.Д. Герцрикен, Ю.Г. Матвиенко, О.Е. Andreikiv C.D. Beachem, S. Jayalakshmi, S.P. Lynch, R.A. Oriani, Н.Н. Uhlig и др.

Водородную хрупкость металлов, согласно общепринятой терминологии, принято разделять на два типа: обратимую и необратимую. При обратимой хрупкости металла, нагревая последний, можно добиться выделения водорода из металла и восстановления исходных механических свойств. Необратимая хрупкость наблюдается при больших давлениях водорода и температурах, достаточных для образования новых фаз и обезуглероживания металла. При таком виде водородной хрупкости никакой термической обработкой не удастся восстановить исходные свойства материала.

Среднелегированные стали [Ю.И. Арчаков, П.С. Перминов, Л.А. Гликман] обладают большей коррозионной стойкостью к водородному воздействию по сравнению с низколегированными сталями. У аустенитных сталей, например, 35Г12Х8Т, после воздействия водорода изменяются все механические характеристики, причем процесс изменения необратим. Кроме того, было установлено негативное влияние водорода на механические характеристики таких высокопрочных сталей, как 35ХН2ГМ, 35Х2Н3М, 40ХН2М (AISI 4340) и 35ХН2ГМФ.

Кроме перечисленного выше влияния водорода на механические свойства сталей, водород может существенно влиять на развитие трещин в металлах, что приводит к уменьшению ресурса конструкций и их преждевременному выходу из строя. Большое количество работ посвящено вопросу влияния различных факторов на скорость роста трещин в водородсодержащих средах при действии статической нагрузки [В.Т. Алымов, Л.А. Гликман, П.С. Перминов, В.С. Харин, Н.Н. Johnson, Y. Murakami, J. Toribio, A.R. Troiano и др.].

Развитие трещин по модели хрупкого разрушения Гриффитса-Ирвина подразумевает два вида трещин: нераспространяющиеся и распространяющиеся. В случае воздействия водородсодержащей среды трещина I типа может начать расти, даже если  $K_I < K_{Ic}$ , что противоречит указанной модели разрушения.

Трещины, распространяющиеся под влиянием водорода, обладают инкубационным периодом, во время которого происходит аккумуляция водорода вблизи вершины трещины и постепенное охрупчивание материала. На протяжении инкубационного периода трещина не страгивается. Инкубационный период можно наблюдать, обратившись к экспериментальным данным [Т.Л. Anderson, L. Coudreuse, Y. Hirose, и др.], например, при растрескивании высокопрочной стали AISI 4130 в среде газообразного водорода. Окончание инкубационного периода характеризуется страгиванием трещины начальных размеров.

Титановые сплавы также подвержены водородному охрупчиванию. На рис. 1 приведены кривые роста трещины нормального отрыва в идентичных образцах из титанового сплава Ti-64 в среде газообразного водорода и воздуха при равных частотах нагружения и  $\Delta K_I$ . Вопросами влияния водорода на свойства различных сплавов на основе титана занимались такие ученые как E.Tal-Gutelmacher, D. Eliezer, Б.А. Колачев, Н.А. Ночовная, А.М. Якимова и др.

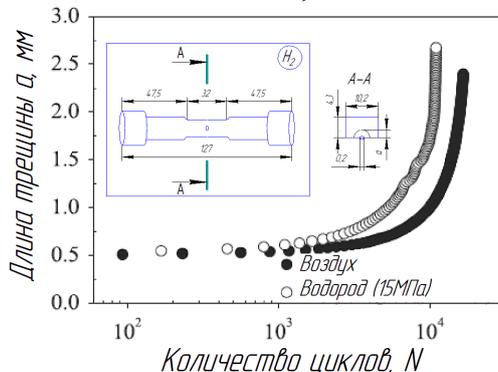


Рис. 1. Рост трещины в титановом сплаве Ti-64 в среде водорода и на воздухе ( $R=0$ ,  $f=0,5$  Гц, размеры указаны в мм)  
[R. Gaddam, R. Pederson, M. Hornqvist, M-L.Antti].

Теоретические работы [О.Е. Andreikiv, O.V. Nembara], в которых приведены необходимые зависимости для построения кинетических диаграмм разрушения высокопрочных сталей AISI 4147 и AISI 4340 под действием водородсодержащей среды при статическом нагружении выполнены без учета начального распределения водорода в материале.

Одним из основных условий надлежащего описания скоростей роста магистральных трещин в элементах конструкций, находящихся в условиях водородсодержащих сред, является необходимость описания процессов проникновения водорода в металл.

Проникновение водорода в металлические материалы происходит благодаря процессу диффузии. Так как процессы деформирования и диффузии в твердых телах взаимосвязаны, то внедрение диффундирующего вещества в твердое тело порождает в нем внутренние напряжения, а неоднородное поле напряжений, вызванное граничными и начальными условиями, способно влиять на диффузионную кинетику переноса вещества. Уравнение диффузии в поле напряжений имеет вид

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + f([\Psi]) \nabla C \nabla \sigma_{ii}, C(x, 0) = C_0(x), C(0, t) = C^0, \quad (1)$$

где  $[\Psi]$  - вектор параметров среды и материала;

$\sigma_{ii}$  - первый инвариант тензора внутренних напряжений;

$C_0(x)$  - начальное распределение водорода в материале;

$x$  - координата, направленная вдоль трещины внутрь материала;

$C^0$  - концентрация водорода в среде вблизи вершины трещины.

Распределение водорода вблизи вершины трещины получено при решении уравнения (1) с помощью метода Галеркина, с уточнением по методу наименьших квадратов (МНК).

Далее следует разработка модели роста трещин в элементах конструкций при статическом и циклическом нагружении в условиях водородсодержащей среды в обоснование долговечности и безопасности эксплуатируемых в водородсодержащих средах элементов конструкций.

**Во второй главе** описана разработанная методика роста трещин в металлах элементов конструкций при статическом нагружении в условиях водородсодержащей среды. Вычислительные эксперименты показали адекватную реакцию модели на изменение входных параметров. Кроме того, была установлена удовлетворительная корреляция полученных численно данных с экспериментальными результатами [J.C. Charbonnier, G.E. Kerns, H. Margot-Marette].

В разработанной модели принимается, что рост трещины происходит дискретно: малая встречная трещина соединяется с трещиной больших размеров. При этом возможно наличие инкубационного периода: в зоне предразрушения происходит накопление необходимого количества водорода для страгивания трещины начальных размеров. Длительность инкубационного периода может сократиться, если вблизи вершины трещины в материале уже присутствует водород.

В основе этой модели лежат следующие положения:

- Водород поступает непосредственно в вершину трещины, не проникая в материал через ее берега.
- Водород проникает в материал благодаря процессу диффузии.
- Рассматривается однонаправленная задача проникновения водорода в материал вблизи вершины растущей трещины, см. рис. 2.

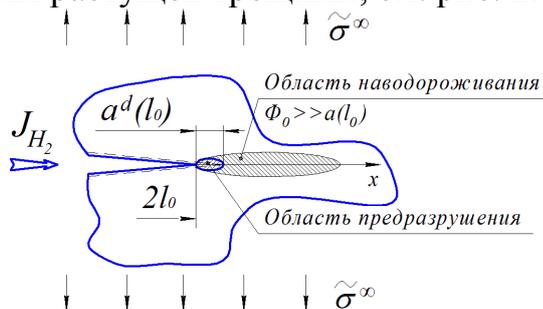


Рис. 2. Распределение водорода вблизи вершины растущей трещины.

- Материал считается идеально-упругим.
- Номинальные растягивающие напряжения  $\tilde{\sigma}^\infty$  не зависят от концентрации водорода в материале.
- Концентрация водорода в вершине трещины постоянна и равна  $C^0$ .

Основываясь на подходах Ю.Г. Матвиенко, Е.М. Морозова, А.Н. Романова, Г.П. Черепанова, G. Pluvinage и др., введен двухпараметрический критерий прочности, связывающий условный коэффициент концентрации напряжений трещины текущих размеров со средней концентрацией растворенного в нем водорода

$$\left( \frac{\tilde{K}_I - \tilde{K}_{Ic}^*}{\tilde{K}_{Ic}^0 - \tilde{K}_{Ic}^*} \right)^{\alpha_1} + \left( \Omega \frac{\bar{C}_a}{C^0} \right)^{\beta_1} = 1, \quad (2)$$

где  $\tilde{K}_{Ic}^*$  - вязкость материала при средней концентрации водорода в области предразрушения  $a^d$  равной  $C^0 / \Omega$ ,  $\Omega = C^0 / C^*$ ;

$\tilde{K}_{Ic}^0$  - вязкость ненаводороженного материала;

$C^*$  - растворимость водорода в материале;

$\bar{C}_a$  - средняя концентрация водорода в области предразрушения  $a^d$ ;

$\alpha_1, \beta_1$  – константы.

Из анализа экспериментальных данных многих исследователей [Y. Murakami, P. Sofronis, B. Somerday и др.] следует, что зависимость (2) позволяет в полной мере описать ускорение роста магистральной трещины при воздействии водородсодержащей среды.

Условия работы модели роста трещин в элементах конструкций под воздействием агрессивной водородсодержащей среды и статической нагрузки следующие:

$$\tilde{K}_{Ic}^* \leq \tilde{K}_I \leq \tilde{K}_{Ic}^0. \quad (3)$$

Кроме того, полагается, что при достижении концентрации водорода предельной растворимости вязкость материала достигает величины  $\tilde{K}_{Ic}^*$  и более не изменяется.

Страгивание трещины происходит при условии:

$$\tilde{K}_I(\tilde{\sigma}^\infty, l) \geq \tilde{K}_{Ic}(\bar{C}_a), \quad (4)$$

где  $l$  – текущая длина трещины;

$\tilde{\sigma}^\infty$  - номинальные напряжения, возникающие вдали от трещины и полученные без учета влияния водорода на конструкционный материал.

Предполагается, что распределение максимальных напряжений в окрестности контура трещины нормального отрыва определяется по асимптотической формуле:

$$\tilde{\sigma} \cong \frac{\tilde{K}_I}{\sqrt{\pi \cdot x}}. \quad (5)$$

В настоящей работе предполагается, что трещины в элементах конструкций не распространяются только от воздействия водородсодержащей среды, т.е. разрушение по механизму вынужденного водородного растрескивания не происходит. Рост трещин возможен только при совместном действии нагрузки и водородсодержащей среды.

Также полагается, что размер области предразрушения охватывает все большее количество зерен с ростом трещины. Принято, что трещина начинает расти лавинообразно в том случае, если  $l \geq L_{fr}^*$ . Величина  $L_{fr}^*$  - предельно-допустимая длина трещины, которая описывается формулой (6).

$$L_{fr}^* = l^* (1 - \delta), \quad (6)$$

где  $\delta < 1$  – параметр;

$$l^* = (\tilde{K}_{Ic}^0)^2 / (\pi \cdot Y^2 \cdot \tilde{\sigma}^{\infty 2});$$

$Y$  – К-тарировка.

Длина области предразрушения является функцией нескольких параметров  $a^d = a^d(l, \delta, l_0, l^*, a_0^d, A, \alpha_2, \beta_2)$  и определяется по формуле

$$\left( \frac{a^d - a_0^d}{a_0^d (B - 1)} \right)^{\alpha_2} + \left( \frac{l^* (1 - \delta) - l}{l^* (1 - \delta) - l_0} \right)^{\beta_2} = 1, \quad (7)$$

где  $a_0^d, B, \alpha_2, \beta_2$  – параметры модели;

$l_0$  – начальная длина трещины.

Модель роста трещины под действием статической нагрузки в условиях водородсодержащей среды описывается с помощью шести диаграмм, приведенных на рис. 3.

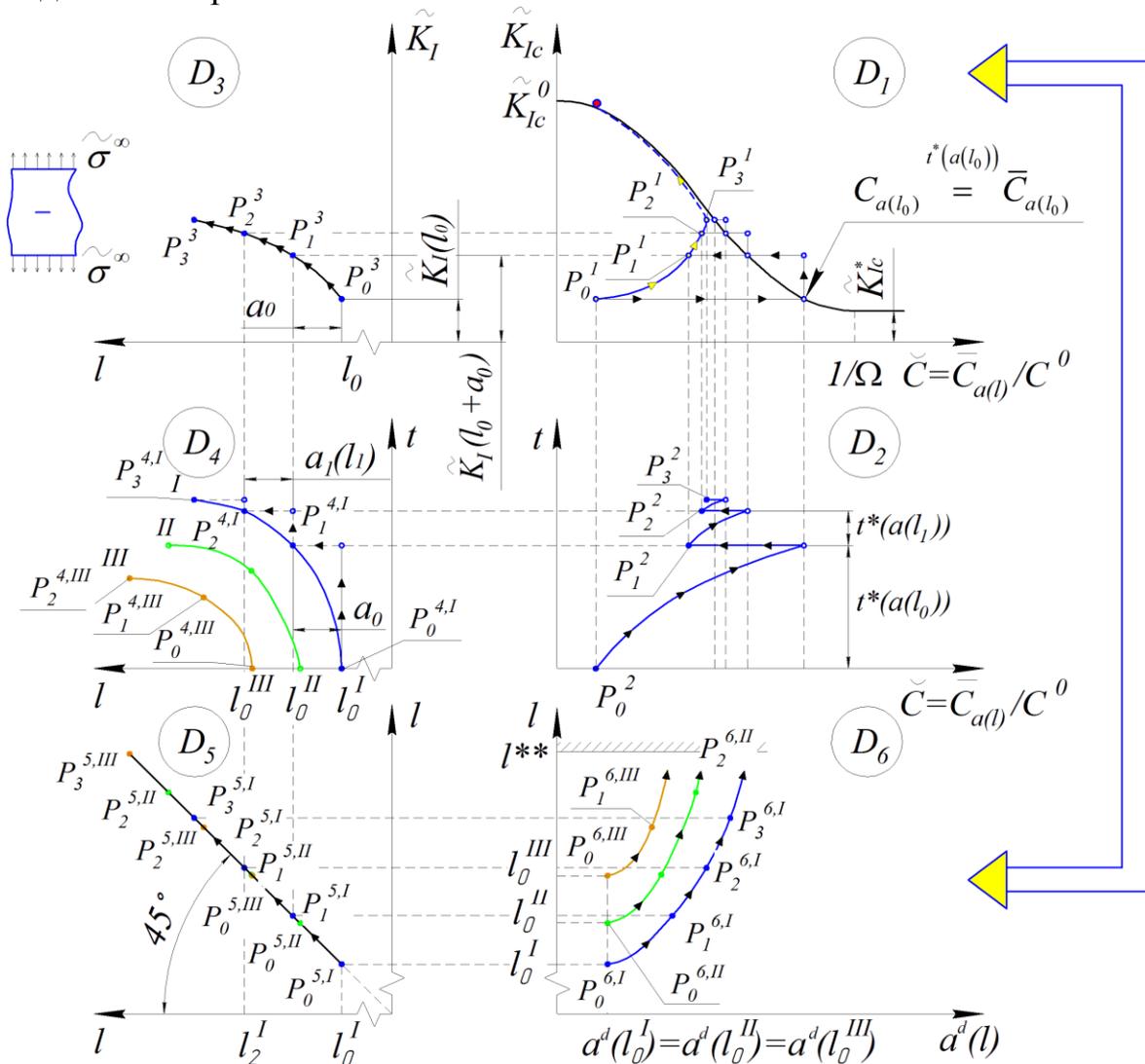


Рис. 3. Качественная схема разработанной модели роста трещины в наводороживаемом образце при действии статической нагрузки.

Дискретный процесс роста трещины включает в себя инкубационную, устойчивую, а также лавинообразную стадии роста трещины. Ниже приведено детальное описание диаграмм, представленных на рис. 3.

Допустим, что в области предразрушения  $a^d(l_0)$  находится водород, тогда точка  $P_0^1$  должна лежать правее оси ординат на рассматриваемой диаграмме. Полагаем, что с течением времени концентрация водорода вблизи вершины трещины увеличивается и точка  $P_0^1$  движется вправо. При пересечении траектории точки  $P_0^1$  с предельной кривой (2) выполняется условие (4) и трещина начальных размеров  $l_0$  скачкообразно подрастает на размер области предразрушения  $a^d(l_0)$ . Время, необходимое для подрастания трещины на указанную длину, определяется с помощью критерия (2) с учетом (7) и решения уравнения (1). Подрост начальной трещины (точка  $P_0^1$ ) до текущих размеров (точка  $P_1^1$ ) представляет собой инкубационный период ее развития (*первая стадия*). Соответствующие точки отмечаются на диаграммах  $D_2 \div D_6$ . Диаграмма  $D_2$  представляет собой решение уравнения диффузии в поле напряжений (1). Кривые на диаграмме  $D_6$  (для различных начальных длин трещины) описываются с помощью соотношения (7). Диаграмма  $D_5$  является вспомогательной и необходима для связи точек на диаграмме  $D_6$  с соответствующими точками на диаграмме  $D_4$  ( $P_0^4$  с  $P_0^6$ , с  $P_1^4$  с  $P_1^6$  и т.д.).

После завершения инкубационной стадии роста, трещина переходит в стадию устойчивого роста (*вторая стадия*). При этом на каждой итерации в области предразрушения трещины текущей длины присутствует свое уникальное распределение водорода. Средняя начальная концентрация водорода в области предразрушения подросшей трещины определяется точками  $P_0^1$  (для начальной трещины),  $P_1^1$ ,  $P_2^1$  и т.д. на диаграмме  $D_1$  и точками  $P_0^2$  (для начальной трещины),  $P_1^2$ ,  $P_2^2$  и т.д. на диаграмме  $D_2$ .

Отмечая времена и величины текущих длин трещин, можно получить искомую кривую роста трещины  $l(t)$  (диаграмма  $D_4$ ) и построить кинетическую диаграмму роста трещины.

Характер роста трещины сохраняется устойчивым в том случае, если начальная средняя концентрация в области предразрушения меньше предельной для текущей длины трещины, иными словами, если начальная точка  $P_i^1$  для  $i$ -й итерации находится левее предельной кривой изменения трещиностойкости (2).

*Третья стадия* представляет собой лавинообразное распространение трещины (*предельное состояние*), при котором происходит исчерпание несущей способности материала и которое в связи с этим не описывается с помощью предлагаемой модели.

Для сравнения полученных с помощью разработанной модели результатов были использованы кинетические кривые разрушения высокопрочных сталей, см. рис. 4.

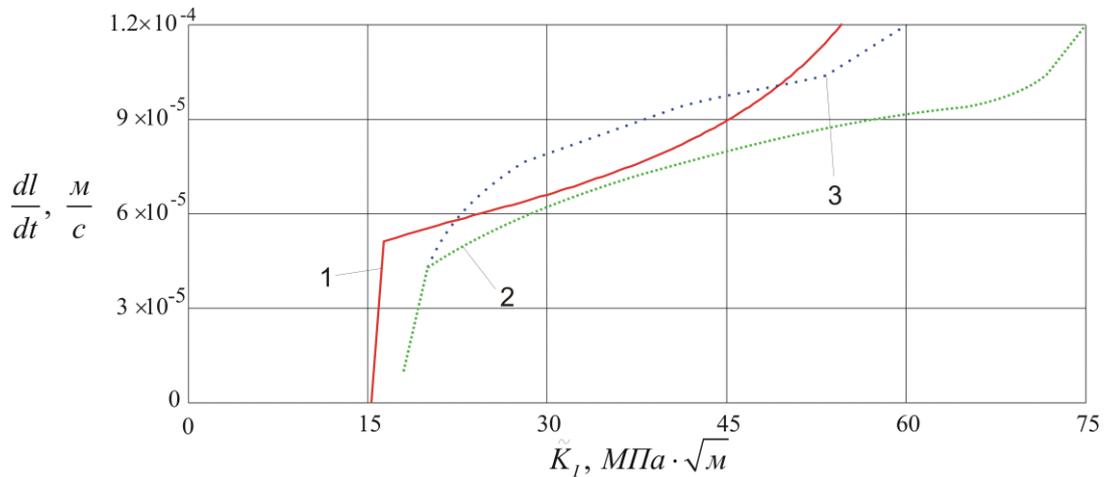


Рис. 4. Кинетические кривые роста трещины в высокопрочных сталях при статическом нагружении в среде газообразного водорода:  
 1 - сталь 35XН2ГМ (расчет по разработанной модели), 2 – сталь 35X2Н3М (эксперимент [J.C. Charbonnier, Н. Margot-Marette]),  
 3 – сталь 35XН2ГМФ (эксперимент [J.C. Charbonnier, Н. Margot-Marette]).

Как следует из анализа кинетических кривых, приведенных на рис. 4, качественное совпадение расчетной кривой с экспериментальными данными получено. Помимо приведенного примера в диссертации представлены и другие вычислительные эксперименты, показавшие адекватность разработанной модели при изменении входных параметров.

Качественно, пример вычислительного эксперимента для получения искомой диаграммы роста трещины при различных значениях параметра  $\Omega$ .

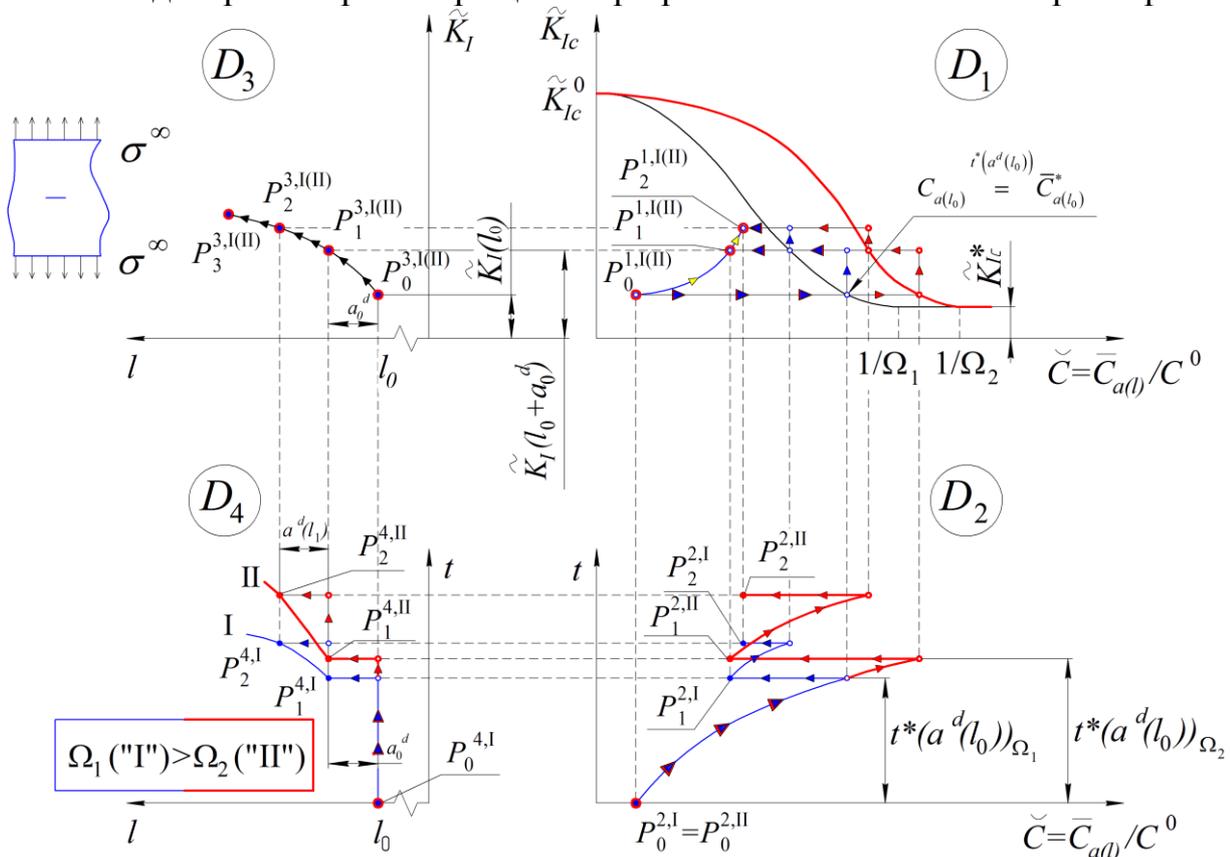


Рис. 5. Схема модели при различных значениях параметра  $\Omega$ .

Также, следует отметить, что если в материале, находящемся в условиях водородсодержащей среды, уже накоплено определенное количество рассредоточенного (растворенного) водорода, то это ускорит процесс достижения концентрации водорода в материале значения предельной растворимости, и в этом случае растет и скорость развития трещины.

**В третьей главе** приведена методика оценки роста трещин в элементах конструкций в условиях воздействия водородсодержащей среды при циклической нагрузке. Проведено сравнение результатов, полученных с помощью разработанной модели с результатами, полученными другими авторами.

Предлагаемая методика оценки роста трещин в элементах конструкций в условиях водородсодержащей среды и циклического нагружения основана на предположении о том, что трещина подрастает как при доминировании одного из двух механизмов (крайние случаи), так и при одинаковых или не равных вкладах от механического воздействия и водородного повреждения. При этом имеет место взаимовлияние двух процессов накопления повреждений:

- накопление повреждений вблизи вершины трещины из-за циклического нагружения.
- водородное охрупчивание материала вблизи вершины растущей трещины за счет действия водородсодержащей среды.

С помощью разработанной модели были получены кривые роста трещин и оценки долговечности элемента конструкции из высокопрочной стали AISI 4340 при циклической нагрузке в условиях водородсодержащей среды для различных начальных длин трещины нормального отрыва, см. рис. 6.

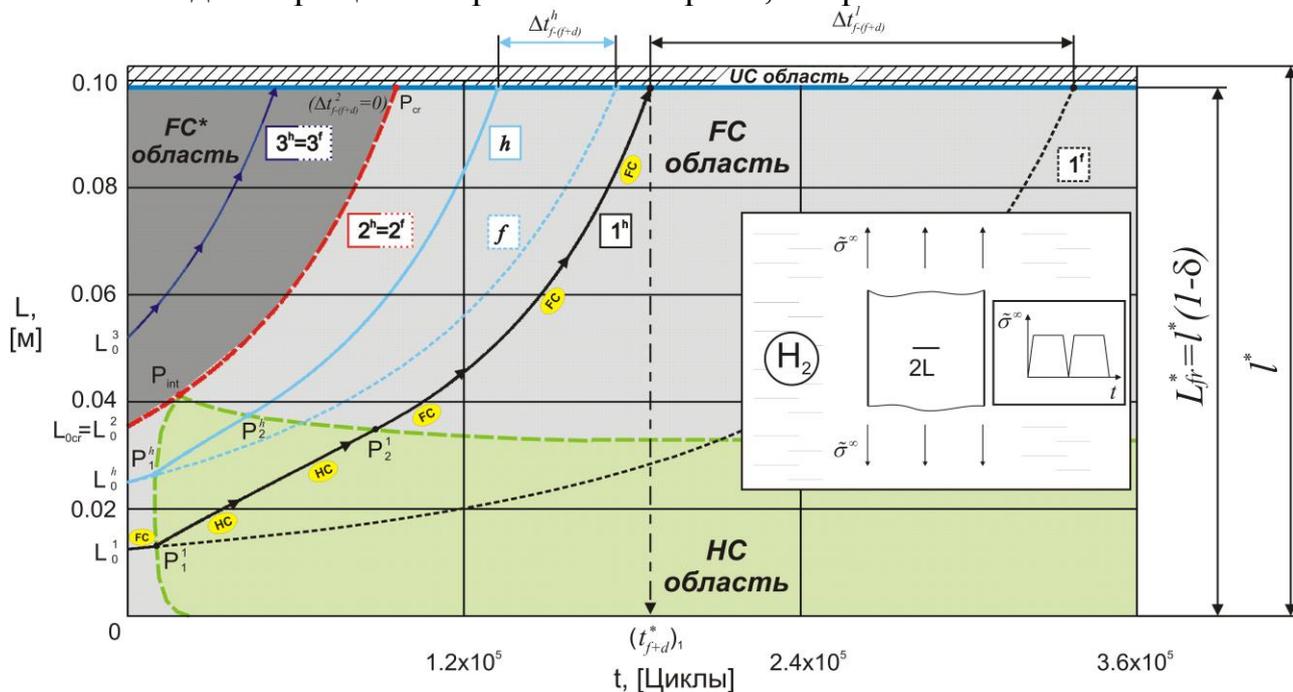


Рис. 6. Кривые роста трещины в элементе конструкции из стали AISI 4340 при циклическом нагружении в водородной среде в зависимости от длины начального дефекта ( $R=0$ ,  $f=1,2$  Гц)

$1^h, 2^h, 3^h, h$  – циклическое нагружение в водородсодержащей среде;  
 $1^f, 2^f, 3^f, f$  – циклическое нагружение в инертной среде.

При проведении расчетов, результаты которых представлены на рис. 6, были выявлены области доминирования различных механизмов разрушения при рассмотрении кинетики трещин в элементе конструкции при циклическом нагружении с учетом влияния водородсодержащей среды. На кривой 1<sup>h</sup> обозначены участки FC и HC, характеризующие превалирующий механизм разрушения: водородное растрескивание и усталость, соответственно. Как видно по кривой 1<sup>h</sup> начальная трещина начала расти по усталостному механизму (FC), после прохождения точки  $P_1^1$  рост трещины происходил по механизму водородного растрескивания (HC), затем после прохождения точки  $P_2^1$  превалирующим механизмом вновь стал усталостный. Следует отметить, что при достижении трещиной области UC, характер ее роста становится лавинообразным, и долговечность рассматриваемого элемента конструкции считается выработанной и составляет  $(t_{f+d}^*)_1$  для трещины растущей по кривой 1<sup>h</sup>.

Кривые  $L(t)$  при циклическом нагружении элемента конструкции с трещиной нормального отрыва получены с использованием формулы Пэриса. На рис. 6, обозначен интервал  $\Delta(t_{f-(f+d)}^h)_1$ , который характеризует разницу в долговечности элемента конструкции в инертной среде (кривая 1<sup>f</sup>) при циклическом нагружении и долговечности аналогичного элемента конструкции в водородсодержащей среде (кривая 1<sup>h</sup>). Таким образом, с увеличением начальной длины трещины  $L_0$  эта величина уменьшается. В таком случае, существует кривая ( $2^f=2^h$ ), из рассмотрения которой следует, что водородное растрескивание никогда при таких начальных и граничных условиях не является превалирующим механизмом разрушения. Поэтому трещины с начальной длиной  $L_0 \geq L_{0cr}$  развиваются только по усталостному механизму, соответственно их рост происходит только в области FC\*. Проводя ряд вычислений можно определить границы областей FC, HC, FC\* и таким образом поделить диаграмму  $L(t)$ , что позволит выявить влияние водородного растрескивания на кинетику рассматриваемой трещины нормального отрыва. Длина трещины  $L_{0cr}$  может быть найдена численно.

Приведенные на рис. 6 результаты расчета действительны для выбранных характеристик пары материал-среда, граничных условий и т.д. При изменении характеристик возможна смена доминирующих механизмов и изменение границ указанных областей.

Далее в главе приведен анализ влияния различных параметров модели на кривые роста трещин. Проведено сравнение результатов, полученных по разработанной методике с соответствующими результатами, полученными с помощью моделей, предложенных другими авторами и экспериментальными данными. Проведены вычислительные эксперименты по влиянию частоты нагружения на определение доминирующего механизма процесса разрушения.

**В четвертой главе** продемонстрирована возможность использования разработанной методики для повышения безопасной эксплуатации различных элементов конструкций с трещинами в водородсодержащей среде. В общем случае, есть вероятность того, что средства визуально-измерительного контроля,

рентгеновские методы и пр. не позволят обнаружить дефект в конструкции. Учитывая указанное выше, проведено моделирование растрескивания типового элемента трубопровода как гиб из стали 10ГН2МФА с несквозной полуэллиптической трещиной, находящейся на его внутренней стенке. В результате моделирования получены кривые роста трещины при действии циклической нагрузки, как для случая водородсодержащей, так и инертной сред, см. рис. 7.

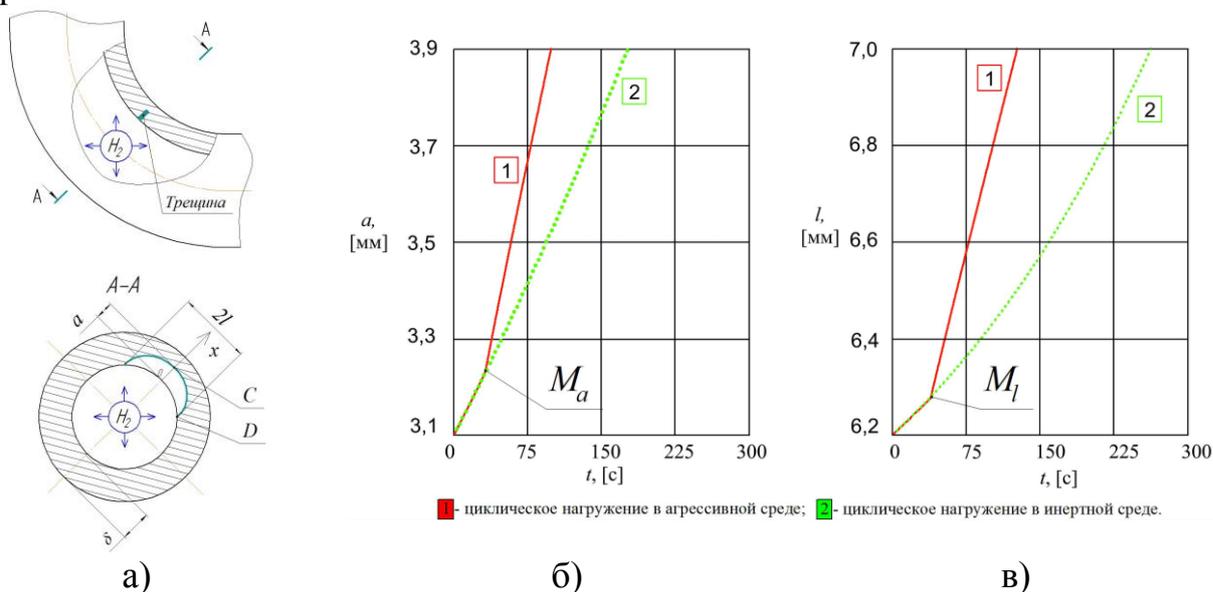


Рис. 7. Результаты моделирования кинетики трещины в гире:  
 а) гиб с трещиной; б) рост трещины в направлении малой полуоси эллипса; в) рост трещины в направлении большей полуоси эллипса.

Из анализа кривых, приведенных на рис. 6 сделан вывод о смене доминирующего механизма роста трещины (т. М).

В качестве элемента конструкции для проведения моделирования разрушения был рассмотрен резьбовой элемент: болт М115 из стали 40ХН2М с кольцевой трещиной, находящейся в корне зуба резьбы. Расчетная схема приведена на рис. 8.

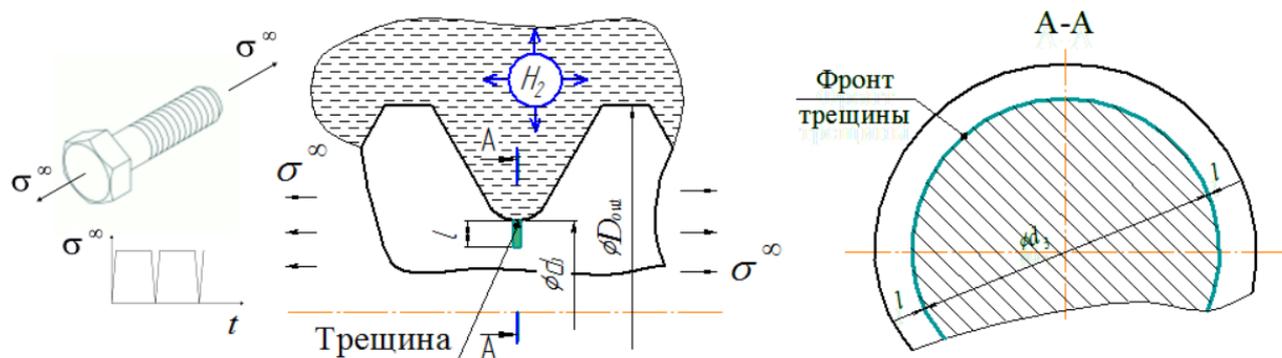


Рис. 8. Кольцевая трещина в корне зуба резьбы болта.

Проведены расчеты по оценке долговечности рассматриваемого болта с трещиной и кривые роста трещины для различных значений амплитуд внешних

циклических нагрузок (рис. 9). Показано существенное ускорение роста трещины от воздействия водородсодержащей среды по сравнению с инертной средой.

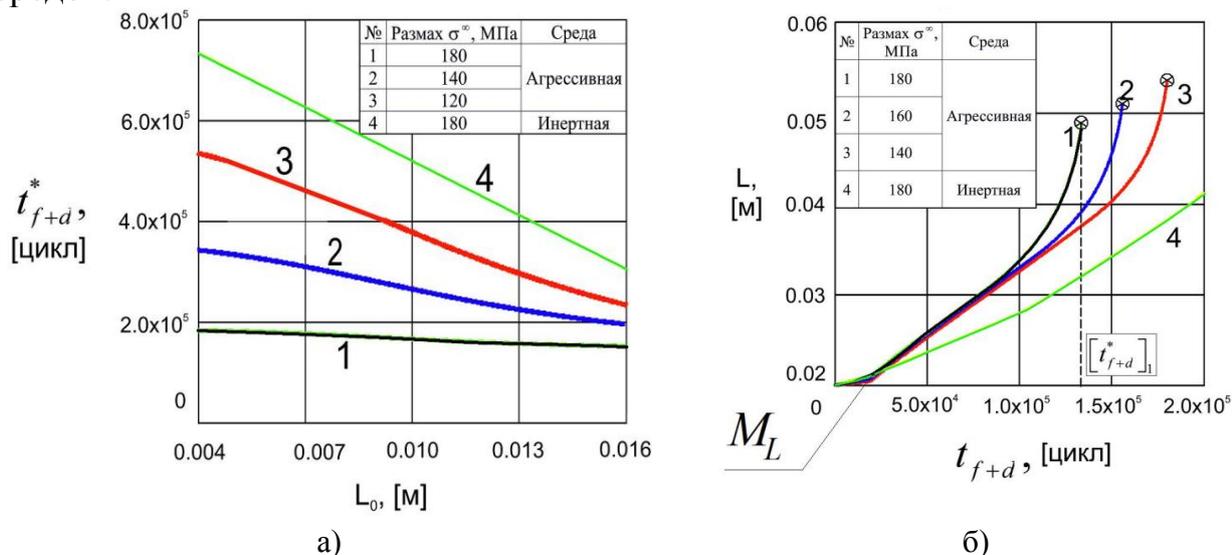


Рис. 9. Результаты моделирования разрушения резьбового элемента: а) долговечность резьбового элемента; б) кривая роста трещины.

Также в настоящей главе численно продемонстрировано изменение параметров Пэриса в результате воздействия водородсодержащей среды на материал. Измененные параметры Пэриса можно использовать для инженерных «экспресс-оценок» уровня безопасности эксплуатации элементов конструкций с трещинами в условиях воздействия водородсодержащей среды при циклическом нагружении. Вычисление указанных параметров проведено на примере стали 40ХН2М (AISI 4340).

В главе представлен метод оценки надежности элементов конструкций из высокопрочных сталей при циклическом нагружении в условиях водородсодержащей среды с привлечением риск-анализа. В качестве модельной задачи проведена оценка технического риска  $R^B$  по методу Монте-Карло для равномерного распределения случайной величины  $l_0$ .

Для эффективного проведения расчетов была создана специальная компьютерная программа, использующая облачные вычисления. Одно из назначений программы - проведение статистического моделирования с целью оценки технического риска при случайных величинах  $l_0$ . Схема программы для оценки технического риска приведена на рис. 10.

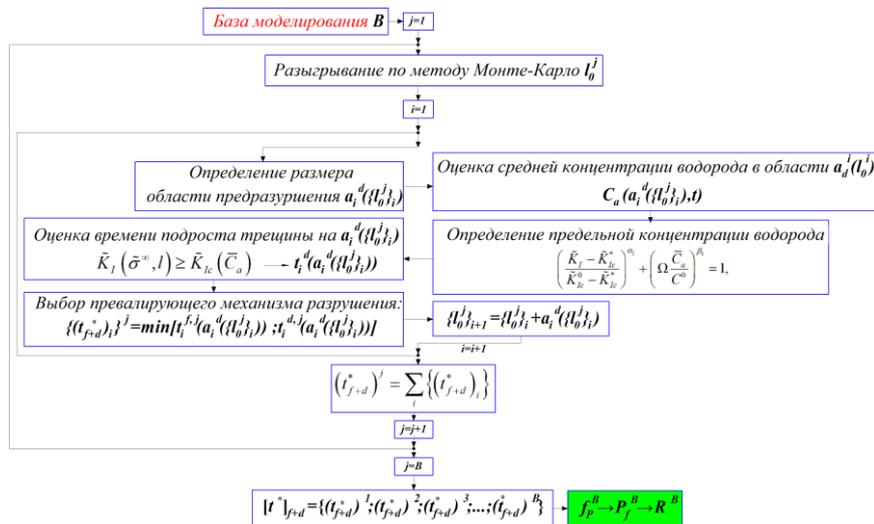


Рис. 10. Схема компьютерной программы для оценки технических рисков.

Для каждого из значений  $l_0$  была проведена оценка долговечности с помощью разработанной модели, затем вычислен технический риск  $R^B$ , соответствующий базе моделирования В. Результаты вычислений приведены на рис. 11.

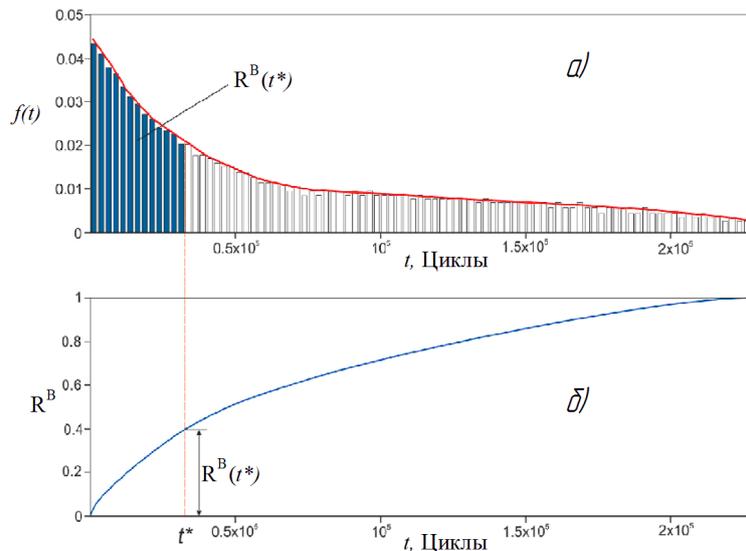


Рис. 11. Оценка технического риска:  
а) гистограмма; б) технический риск  $R^B$ .

Как следует из анализа данных, приведенных на рис. 11, разработанная модель оценки долговечности элементов конструкций при циклическом нагружении в условиях воздействия водородсодержащих сред показала свою адекватность в результате проведения статистического моделирования. С течением времени технический риск растет, приближаясь к  $R^B=1$ .

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. В работе разработаны и апробированы, на модельных и тестовых примерах, научные положения прикладной теории расчета металлоконструкций, работающих в условиях совместного воздействия водородсодержащих сред и механических нагрузок различной природы. В частности, разработана диффузионная модель, позволяющая получать оценки для предельной концентрации водорода в вершине трещины, при которой происходит хрупкое разрушение. Данная модель пригодна для инженерных оценок показателей надежности элементов конструкций.

2. Разработан двухпараметрический критерий оценки повреждений материала при статическом и циклическом нагружении с отображением в нем взаимного вклада повреждений от механического нагружения и от водородного воздействия.

3. На основе выполненной модельной оценки концентрации водорода, диффундирующего из окружающей среды в вершину трещины, разработаны методики для оценки роста трещин в элементах конструкций в условиях водородсодержащей среды при статическом и циклическом нагружении. При этом учитывается начальное распределение водорода вблизи вершины трещины. Адекватность методик подтверждена сравнением с экспериментальными данными и проведением большого количества вычислительных экспериментов, в результате которых была установлена кинетика снижения долговечности элементов конструкций в зависимости от уровня концентрации водорода от воздействия агрессивной водородсодержащей среды и механического воздействия.

4. Выявлены особые области на диаграммах роста трещин, границы которых определяют смену преобладающего механизма разрушения элементов конструкций при одновременном воздействии водородсодержащей среды и циклического нагружения. Разделение диаграммы роста трещины на указанные области позволяет выявить диапазон начальных длин трещин, для которого наличие водородсодержащей среды не приводит к ускорению их развития.

5. Создана компьютерная программа, позволяющая использовать облачные вычисления для эффективного проведения расчетов по предлагаемым методикам и выявления границ смен доминирующих процессов разрушения, предназначенная для оценки надежности элементов конструкций трещинами. Проведено тестирование программы на модельных задачах, подтверждена достоверность получаемых оценок.

6. Проведено моделирование роста трещины в типовом элементе трубопровода в зонегиба из стали 10ГН2МФА с несквозной полуэллиптической трещиной, находящейся на его внутренней стенке, а также моделирование разрушения болта М115 из стали 40ХН2М с кольцевой трещиной во впадине зуба резьбы при циклической нагрузке в агрессивной водородсодержащей среде. Установлены количественные оценки снижения долговечности (более чем в 2 раза длягиба и в 3 раза для болта) рассмотренных конструктивных элементов.

7. Обоснованы диапазоны изменения параметров Пэриса уравнений роста трещин водородного охрупчивания при циклическом нагружении. Выполнены тестовые расчеты для элементов конструкций с трещинами в условиях воздействия водородсодержащей среды. Проведен анализ достоверности полученных результатов. Показана эффективность инженерных методов получения “экспресс-оценок” характеристик трещиностойкости конструкционных материалов, показателей безопасной эксплуатации элементов машиностроительных конструкций с использованием предложенной методики и разработанного программного обеспечения.

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Публикации в рецензируемых изданиях, входящих в перечень ВАК

**1.** Романов А.Н., Тараканов П.В., Шашурин Г.В. Инженерная модель роста трещин в металлах и сплавах, обусловленного влиянием агрессивной водородсодержащей среды // **Проблемы машиностроения и надежности машин.** 2014. № 6. С. 53-57.

**2.** Романов А.Н., Тараканов П.В., Шашурин Г.В., Берчун Ю.В., Резчикова Л.А., Сокольников П.С. Моделирование роста трещин в наводороживаемых высокопрочных сталях при циклическом нагружении // **Проблемы машиностроения и автоматизации.** 2014. № 4. С. 87-93.

**3.** Романов А.Н., Тараканов П.В., Шашурин Г.В. К вопросу о влиянии водородного охрупчивания на разрушение элементов конструкций с трещинами // **Машиностроение и инженерное образование.** 2015. №3. С. 2-14.

**4.** Кишлаков Д.Л., Тараканов П.В., Шашурин Г.В., Берчун Ю.В. Эффективность облачных вычислений в моделировании кинетики трещин в наводороженных элементах конструкций // **Информационные технологии.** 2017. т. 23, № 2. С. 113-120.

### Публикации в изданиях, входящих в базу данных Scopus и Wbs

**5.** Tarakanov P., Romanov A., Shashurin G. Numerical life estimation of structure components subjected to hydrogen embrittlement and cycling // **Key Engineering Materials.** 2014. V. 592-593, P. 117-120.

**6.** Shashurin G.V., Tarakanov P.V., Rezchikova L.A. Crack growth features in hydrogenating high-strength steel AISI 4340 under cycling // **Advanced Materials Research.** 2014. V. 960-961, P. 22-26.

**7.** Tarakanov P., Shashurin G., Romanov A. Empirically-specified environmental assisted cracking model // **Procedia Engineering.** 2014. V. 74. P. 339-342.

**8.** Sokolnikov P., Berchun Yu., Shashurin G., Tarakanov P., Rezchikova L., Romanov A. Stochastic Simulation of Crack Growth in Hydrogenating and Cycling High-strength Steels via Cloud Computing // **Advanced Materials Research.** 2014. V. 1008-1009, P. 1130-1133.

**9.** Romanov A.N., Tarakanov P.V., Shashurin G.V. Engineering Model of Crack Development in Metals and Alloys under Corrosion Hydrogen Media // **Journal of Machinery Manufacture and Reliability**. 2014. V. 43, № 6. P. 503-207.

**10.** Tarakanov P. Cracked high-strength bolt under cycling and hydrogen environment durability estimation using accurate and approximate models // **Procedia Engineering**. 2015. V. 109. P. 403-409.

**11.** Shashurin G., Tarakanov P. Technique for improving Paris-Erdogan constants of steels in hydrogen environment // **Procedia Engineering**. 2015. V. 109. P. 197-201.

**12.** Tarakanov P., Shashurin G., Romanov A. Simulation of hydrogen assisted-cracking in terms of its growth phenomenon // **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**. 2016. V. 82. P. 2-8.

**13.** Kishalakov D., Tarakanov P., Shashurin G., Berchun Yu. Hydrogen Aggressive Media Impact on Cycling Durability of Structure Components // **Material Science Forum**. 2016. V. 844. P. 27-30.

**14.** Kishalakov D., Tarakanov P., Shashurin G., Berchun Yu. Cloud Applications Performance in Crack Growth Simulations of Pre-hydrogenated Structure Components // **Materials Science Forum**. 2016. V. 844. P. 97-102.

#### **В других изданиях**

**15.** Тараканов П.В., Шашурин Г.В., Хрущов М.М. К оценке влияния агрессивной водородосодержащей среды на механические характеристики конструкционных сталей и сплавов // Наука и технологии: Материалы XXXI Всероссийской конференции (14-16 июня 2011 г., Миасс). Миасс: б.и. 2011. С. 104-106.

**16.** Тараканов П.В., Шашурин Г.В., Хрущов М.М. К определению напряженно деформированного состояния образца, находящегося в агрессивной среде // Механика и процессы управления. Том 1 – Материалы XXXXI Всероссийского симпозиума (13-15 декабря 2011 г., Миасс). – М.: РАН, 2011. С. 212-219.

**17.** Tarakanov P., Shashurin G. Crack propagation engineering model: stress intensity dependence of crack growth rate in hydrogen embrittlement material // 19<sup>th</sup> European Conference on Fracture. Fracture Mechanics for Durability, Reliability and Safety (26-31 August 2012). Book of Abstracts. Kazan, Russia, 2012. P. 231.

**18.** Тараканов П.В., Шашурин Г.В., Хрущов М.М. К построению кинетической диаграммы роста трещин для новодородороживаемых материалов и сплавов // XX Петербургские чтения по проблемам прочности. Санкт-Петербург, 10-12 апреля 2012 г.: сборник материалов. – Ч.1. – СПб.: Соло, 2012. С. 303-306.

**19.** Тараканов П.В., Шашурин Г.В., Хрущов М.М. Ресурс элементов конструкций АЭС, подверженных водородному охрупчиванию // Конструкционная прочность материалов и ресурс оборудования АЭС: Тез. Докл. Международной конференции (2-5 октября 2012 г.). Киев: Ин-т Проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины, 2012. С. 202-203.

**20.** Тараканов П.В. К вопросу оценки ресурса элементов конструкций АЭС, находящихся в агрессивной водородосодержащей среде // Методы и программное обеспечение расчетов на прочность, 7-я российская конференция (8-12 октября 2012 г.; Геленджик): тезисы докладов. – М.: ОАО «НИКИЭТ». 2012. С. 25.

**21.** Tarakanov P., Romanov A., Shashurin G. Numerical life estimation of structure components subjected to hydrogen embrittlement and cycling // *Materials Structure and Micromechanics of Fracture*. Brno: Tisk Gepard International. 2013. P. 46.

**22.** Тараканов П.В., Романов А.Н., Шашурин Г.В. Рост трещин в элементах конструкций из металлических материалов под влиянием водорода и циклического нагружения // Международный симпозиум «Физика кристаллов 2013». Тезисы докладов. – М.: МИСиС, 2013. С. 227.

**23.** Тараканов П.В. Подход к оценке ресурса элементов конструкций, находящихся в условиях водородосодержащей среды и циклического нагружения // Юбилейная XXV Международная инновационно-ориентированная конференция молодых ученых и студентов (МИКМУС - 2013): Труды конференции (Москва, 13-15 ноября 2013 г.) - М: Изд-во ИМАШ РАН, 2013. С. 343-345.

**24.** Тараканов П.В., Шашурин Г.В. Методика оценки влияния водородосодержащей среды на долговечность элементов конструкций с трещинами в условиях воздействия водородосодержащей среды при циклическом нагружении // Международная конференция «Живучесть и конструкционное материаловедение»: Труды конференции (Москва, 21-23 октября 2014 г.) – М.: Изд-во ИМАШ РАН, 2014. С. 72.

**25.** Tarakanov P., Shashurin G., Romanov A. Principle management of NPP typical structural components safety operation using specific failure models // *Procedia Materials Science*. 2014. V. 3. P. 198-203.

**26.** Matvienko Yu.G., Shashurin G., Tarakanov P. The hydrogen-assisted cracking criterion based on two-parameter // *Anales de Mechanica de la Fractura*. 2015. V. 32, P. 82-87.