

Программный комитет:

Тарлаковский Д.В. (председатель), д.ф.-м.н., проф., академик РАЕН (Россия)
Шкиряк Ф.Н. (зам. председателя), д.т.н., проф. (Россия)
Федотенков Г.В. (ученый секретарь), к.ф.-м.н., доц., член-корр. РАЕН (Россия)
Бабешко В.А., академик РАН (Россия)
Баженов В.Г., д.ф.-м.н., проф. (Россия)
Белостоцкий Г.Н., д.т.н., проф. (Россия)
Гаврюшин С.С., д.т.н., проф. (Россия)
Гачевич А.Р., д.ф.-м.н., проф. (Украина)
Горячева И.Г., академик РАН (Россия)
Ерофеев В.И., д.ф.-м.н., проф. (Россия)
Зинин А.В., к.т.н., доц. (Россия)
Игумнов Л.А., д.ф.-м.н., проф., академик РАЕН (Россия)
Кит Г.С., член-корр. АН Украины (Украина)
Конюшев Ю.Г., академик АН Республики Татарстан (Россия)
Кубенко В.Д., академик НАН Украины (Украина)
Кушнир Р.М., член-корр. АН Украины (Украина)
Локошенко А.М., д.ф.-м.н., проф., академик РАЕН (Россия)
Ломакин Е.В., член-корр. РАН (Россия)
Матвеев А.М., академик РАН (Россия)
Медведский А.Л., д.ф.-м.н., проф. (Россия)
Морозов Н.Ф., академик РАН (Россия)
Нестеров В.А., д.т.н., проф. (Россия)
Окунев Ю.М., академик РАЕН (Россия)
Остапенко Н.А., д.ф.-м.н., проф., академик РАЕН (Россия)
Паймушин В.Н., академик АН Республики Татарстан (Россия)
Петрашкевич Войцех, профессор (Польша)
Плескачевский Ю.М., член-корр. НАН Белоруссии (республика Беларусь)
Рабинский Л.Н., д.ф.-м.н., проф., член-корр. РАЕН (Россия)
Равикович Ю.А., д.т.н., проф., проректор МАИ (Россия)
Саркисян С.О., д.ф.-м.н., проф., член-корр. НАН Армении (Армения)
Старовойтов Э.И., д.ф.-м.н., проф. (республика Беларусь)
Сыпало К.И., член-корр. РАН (Россия)
Yu Gu, PhD, Professor, Beijing Jiaotong University (Китай)

Симпозиум проводится при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 19-08-20008 "Научные мероприятия").

ISBN 978-5-6041894-8-1

© Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2019

ПРЕДИСЛОВИЕ

XXV Международный симпозиум «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» проводился Московским авиационным институтом (национальным исследовательским университетом) – МАИ, научно-исследовательским институтом механики Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, научно-исследовательским институтом механики Нижегородского государственного университета имени Н.И. Лобачевского и Ассоциацией «Механика и технологии» при поддержке РФФИ на базе санатория «Вятичи» с 18 по 22 марта 2019 года.

В соответствии с тематикой докладов их обсуждение проходило в рамках трех секций.

Секция I «Динамика сплошных сред» (председатель академик РАН Горячева И.Г., сопредседатели – академик НАН Украины, Кубенко В.Д. и д.ф.-м.н., профессор Старовойтов Э.И.).

Секция II «Динамика и прочность конструкций» (председатель – д.т.н., профессор Шкиряк Ф.Н., сопредседатели – д.ф.-м.н., профессор Баженов В.Г. и академик Республики Татарстан Паймушин В.Н.).

Секция III «Технологические проблемы новых материалов и конструкций» (председатель – д.ф.-м.н., профессор Рабинский Л.Н.).

Материалы симпозиума распределены по двум томам. Во второй том вошли не включенные в первый том тезисы и отобранные программным комитетом лучшие доклады. Все материалы, в основном, приводятся в авторской редакции.

Председатель программного комитета Д.В. Тарлаковский

ρ_d - средняя плотность аппаратуры, определяемая как частное от деления пичины массы аппаратуры на величину объема; k_p - обобщенный коэффициент заполнения объема аппаратуры элементами и узлами.

Блоки БА составляют примерно 70...80 % массы внутреннего оборудования носовых отсеков ЛА и заполнения 90...95 % площади поперечного сечения эска. Остальная часть массы носового отсека приходится на рамы, узлы крепления, межблочные жгуты и кабели, системы наддува, охлаждения и т.д. Из этого следует, что механические свойства внутреннего оборудования носовых отсеков ЛА будут определяться, в основном, механическими свойствами блоков. В литературе [7-9] отмечается широкое применение в БА в качестве конструктивных материалов алюминиевых сплавов (корпуса, шасси, радиаторы, экранны и т.д.).

Результаты приближенного анализа конструктивных материалов блоков [4] показывают, что основную долю массы и объема твердой фазы или матицы блоков БА составляют металлические сплавы: алюминий-магний, лезные и медные. Их доля достигает до 95,4 % массы и 92,1 % объема матрицы. Основные конструктивные и силовые элементы блоков (корпуса, экраны, радиаторы, радиаторы, узлы крепления и т.д.) выполнены из алюминий-сплавов (как литейных, так и деформируемых), доля которых достигает до 66,8 % массы и до 78,5 % объема матрицы. Блоки БА являются комплексной высокопористой средой, которая по своим комплексным характеристикам, составу материалов и механическим свойствам весьма близка к высоко-листым алюминиевым сплавам и листовым конструкциям из алюминиевых сплавов [4].

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 19-08-00701-а).

Литература

1. Марков В.А., Овчинников А.Ф., Пусев В.И. Физико-механическая модель летательного аппарата при высокоскоростном взаимодействии с тонким аэродинамическим экраном // Материалы XVII Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова. Ярославль, 14-18 февраля 2011 г. Т.2. М.: ООО «ТР-принт». 2011. С.134-139.
2. Жариков А.В., Марков В.А., Овчинников А.Ф., Пусев В.И. Вопросы физического моделирования высокоскоростного взаимодействия летательного аппарата с тонким аэродинамическим экраном // Материалы XVII Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова. Ярославль, 14-18 февраля 2011 г. Т.2. М.: ООО «ТР-принт». 2011. С.110-118.

3. Пусев В.И. О физическом моделировании деформирования и разрушения конструкций при действии ударных и взрывных нагрузок // Вестник Нижегородского университета им. Н.Н. Лобачевского. 2011. № 4. Ч. 4. С. 1722-1724.

4. Марков В.А., Овчинников А.Ф., Пусев В.И. Модельная среда для внутреннего оборудования носовых отсеков летательных аппаратов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2010. Специальный выпуск. С. 196-206.

5. Фомин А. МИГ-35. Будущее семейства легких фронтовых «Мигов» // Всплет. 2007. № 3. URL: <http://ibp.lvs.ee/b/315531/read>.

6. Кузьмин А. Радиолокационная станция РВБ2 самолета «Радаль» // Зарубежное военное обозрение. 1997. № 2. С. 36-40.

7. Варламов Р.Г. Компоновка радиоэлектронной аппаратуры. Изд. 2-е, доп. и перераб. М.: Сов. Радио, 1975. 351 с.

8. Конструирование микроэлектронной аппаратуры / Под ред. Б.Ф. Высоцкого. М.: Сов. Радио, 1977. 128 с.

9. Компоновка и конструирование микроэлектронной аппаратуры / Под ред. Б.Ф. Высоцкого, В.Б. Петрикова. М.: Радио и связь, 1982. 208 с.

ОЦЕНКЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ПРОТЯЖЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ В СЛОЖНЫХ ПРИРОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Завойчинская Э.Б., Овчинникова Н.В.

(МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва)

Представлены основные соотношения для определения вероятности разрушения конструктивных элементов в условиях четырех видов коррозионного воздействия при эксплуатационном нагружении. Проведен численный анализ напряженно-деформированного состояния элемента от кинетики различных видов коррозионных воздействий. По силовому критерию механики разрушения определена вероятность достижения условной расчетной трещиной критических размеров при воздействиях почвенной, биологическими токами и микробиологической коррозии.

Участки трубопроводов подземной прокладки, состоящие из большого числа конструктивных элементов, эксплуатируются при длительном действии нагрузок в различных природно-климатических условиях и могут подвергаться электрохимическим коррозионным воздействиям: почвенной коррозии, электрокоррозии и микробиологической коррозии. Эти виды коррозии проявляются при условии $i_{c.p.} < i_0$, $i_{c.p.}$ – плотность тока катодной защиты, i_0 – плотность предельного диффузионного тока по кислороду. При одновременном воздействии

эксплуатационного нагружения и коррозионной среды и условия $i_{c.p.} \geq 10i_0$ может иметь место стресс-коррозия [1,2].

Для магистральных газо- и нефтепроводов, транспортирующих подготовленные коррозионно-инертные продукты, особую опасность представляют собой коррозионные разрушения внешней поверхности участков. По данным ЦАО «Газпром» (исследования 30 лет эксплуатации) число отказов по причине наружной коррозии достигло 56% для труб диаметром 1220-1420 мм.

В промысловых нефтепроводах наблюдается коррозия внутренней поверхности, обусловленная присутствием минерализованной водной фазы и растворенных в ней кислорода, сероводорода и углекислого газа.

В литературе вводятся различные детерминированные функции поврежденности $\Omega = \Omega(\tau)$, $0 \leq \Omega \leq \Omega_0$, как непрерывные функции времени τ в интервале $\tau \in [0, t]$.

В настоящем докладе поврежденность рассматривается как случайный стационарный процесс. В каждый момент времени τ поврежденность является случайной величиной, характеризуемой распределением $\Omega = \Omega(\tau)$, $0 \leq \Omega \leq \Omega_0$, $\tau \in [0, t]$, под которым понимается вероятность, с которой поврежденность Ω достигает своего предельного значения Ω_0 . Это распределение называется вероятностью разрушения $\bar{\Omega} = \bar{\Omega}(\tau)$.

Вероятность разрушения конструкции $\bar{\Omega} = \bar{\Omega}(\tau)$ определяется суммой независимых K событий – разрушений k -го участка при отсутствии разрушения остальных $(K-1)$ участков, $k=1, \dots, K$, и выражается через вероятности разрушения k -тых участков $\bar{\Omega}_k = \bar{\Omega}_k(\tau)$ в следующем виде [3-5]:

$$\bar{\Omega}(\tau) = \sum_{k=1}^K \frac{\bar{\Omega}_k(\tau)}{1 - \bar{\Omega}_k(\tau)} \prod_{k=1}^K (1 - \bar{\Omega}_k(\tau)), \quad (1)$$

В выражении (1) компоненты вероятности разрушения $\bar{\Omega}_k = \bar{\Omega}_k(\tau)$ при эксплуатационном нагружении с учетом коррозионных воздействий определяются в таком виде:

$$\bar{\Omega}_k(\tau) = \sum_{j=1}^4 \frac{\bar{\Omega}_{k,j}(\tau)}{1 - \bar{\Omega}_{k,j}(\tau)} \prod_{j=1}^4 (1 - \bar{\Omega}_{k,j}(\tau)),$$

где $j=1$ учитывает развитие почвенной коррозии; $j=2$ – влияние электрокор-

розии блуждающими токами от источников постоянного и переменного токов в зоне «стекания» блуждающих токов с поверхности трубопровода; $j=3$ – микробиологическую коррозию, вызванную жизнедеятельностью микроорганизмов почвы и поверхностных вод (бактерий, микелиальных грибов, простейших); $j=4$ – стресс-коррозию, характеризуемую развитием «колониий» микро- и макропроеции.

Распределение поврежденности k -го участка по j -му виду коррозионных воздействий, $j=1, \dots, 4$, предполагается описывать функцией, являющейся обобщением функции распределения Пуассона [6-8]. Распределение Пуассона в данном случае моделирует количество разрушений, произошедших в интервале времени $\tau \in [0, t]$, при условии, что разрушение происходит с некоторой средней интенсивностью независимо друг от друга, и задается функцией:

$$\bar{\Omega}(n) = \frac{\varphi^n}{n!} e^{-\varphi}, \quad \text{где параметр } \varphi \in (0, \infty) - \text{математическое ожидание случайной величины (поврежденности), носители } n \in \{1, 2, \dots\} - \text{количество разрушений.}$$

Отсюда вероятность разрушения $\bar{\Omega}_{k,j} = \bar{\Omega}_{k,j}(\tau)$ по первому разрушению ($n=1$) представляется в следующем обобщенном виде:

$$\bar{\Omega}_{k,j}(\tau) = \varphi_{k,j}(\tau) e^{-\varphi_{k,j}(\tau)}, \quad \varphi_{k,j}(\tau) \equiv \lambda_j l_k \frac{\bar{t}}{t_{f,k,j}} \tau, \quad j=1, \dots, 4, \quad k=1, \dots, K \quad (3)$$

где λ_j – коэффициенты интенсивности потока разрушений от j -го вида коррозионных воздействий, $j=1, \dots, 4$, под которыми понимается количество коррозионно-механических разрушений k -го участка в единицу времени (год) на единицу длины (км), известные по статистике при эксплуатации участков в аналогичных природно-климатических условиях; l_k – длина k -го участка; $t_{f,k,j}$ – долговечность k -го участка в условиях почвенной, электро-, микробиологической и стресс-коррозии соответственно, $\bar{t}$ – экономически и социальным приемлемый срок службы конструкции по нормам проектирования объектов.

Коррозионные воздействия внешней среды, $j=1, \dots, 3$, могут приводить к анодному растворению металла с образованием следующих дефектов:

– общая (сплошная) равномерная или неравномерная коррозия (в т.ч. «ручейковая» коррозия), $d > h$ ($d=d(\tau)$ – средний линейный размер дефекта на

поверхности участка, $h = h(\tau)$ – глубина дефекта по толщине участка), которая характерна для почвенной коррозии и электрокоррозии;

– локальная (местная) коррозия, образующаяся под отслоившейся изоляцией и при сквозных дефектах изоляции, подразделяется на:

– коррозию питтингами (мейза-коррозия), в случае, когда $d > h$ (частным случаем является обшая коррозия),

– язвенную коррозию при $d \leq h$ – глубокие каверны ограниченной площади с четкими верхними границами и дном в виде сектора сферы (эллипсоида), которая вызывает разрушение по толщине стенки в виде свищей, характерное для углеродистых сталей магистральных трубопроводов в трунтах, в т.ч. подповерхностную коррозию, распространяющуюся под поверхностью металла, образуя полость и вызывая вспучивание и расслоение;

– питтинг при $d \ll h$, характерный для микробиологической коррозии.

Под действием эксплуатационного нагружения происходит эволюция этих дефектов при неоднородном напряженном состоянии, которая ведет к образованию коррозионно-механических трещин в областях наибольших деформаций вследствие анодного растворения металла и диффузионного проникновения положительно заряженных ионов водорода в объем материала.

Стресс-коррозии металла, $j = 4$, характеризуется стадийностью процесса коррозионного разрушения, прохождением стадий эволюции полосовой субструктуры, появления, роста и слияния межзеренных микротрещин на микрорезном уровне и образования «колоний» стресс-коррозионных хрупких макротрещин на мезоуровне вследствие анодного растворения металла и диффузии положительно заряженных ионов водорода в металл, ведущим к хрупкому разрушению (при отсутствии остаточных деформаций).

Таким образом, для определения вероятности разрушения (1) необходимо решить задачу об определении долговечности k – го участка i, f, k, j при эксплуатационном нагружении и соответствующих видах коррозионного воздействия.

С этой целью на основе анализа физико-химических закономерностей влияния коррозионных сред на металл необходимо построить феноменологическую модель развития разрушения при механическом нагружении.

На первом этапе проводится анализ напряженно-деформированного и предельного состояний элементов трубопроводов при механическом нагружении с коррозионными дефектами. Исследуется напряженно-деформированное состояние тонкостенной трубы под действием внутреннего давления P_0 в условиях плоской деформации. При проведении расчетов используются фактические данные о размерах участка (внешний радиус трубы $2R = 1420 \text{ мм}$, толщина стенки

$\delta = 16 \text{ мм}$) и данные о механических свойствах материала (сталь 17Г1С, $E = 2.06 \cdot 10^5 \text{ МПа}$, $\nu = 0.28$, $\sigma_{gr} = 520 \text{ МПа}$, $\sigma_s = 360 \text{ МПа}$, $K_{I,c} = 50 \text{ МПа}\sqrt{\text{мм}}$). Дефект моделируется частью эллипсоида или сферы, в общем случае, имеющей различные значения полуосей. Поперечное сечение участка, проходящее через «вершину» дефекта, принимается за плоскость $z = 0$, продольное – за плоскость $\theta = 0$ цилиндрической системы координат. Задача симметрична относительно этих плоскостей. Рассматривается элемент $0 \leq z \leq l$, $l = 50 \text{ мм}$, по углу $\Theta = 5^\circ$. На поверхностях $z = 0$ и $z = l$ осевое перемещение принято равным 0. На плоскостях $\theta = 0$, $\theta = \Theta$ принимаются условия симметрии (равенство нулю компонент вектора перемещений в нормальном к плоскости направлении).

Решается трехмерная задача теории упругости методом конечных элементов в программном комплексе ANSYS с объемным угловым изопараметрическим элементом SOLID186.

На рис. 1 (а) – (в) представлены распределения максимального нормального напряжения $\sigma_{\theta\theta}$ в элементе со следующими дефектами: $d = 0.5\delta$, $h = 0.1\delta$ (коррозионное пятно), $d = 0.5\delta$, $h = 0.5\delta$ (коррозионная язва) и $d = 0.1\delta$, $h = 0.8\delta$ (питтинг). На рис. 1 (а) максимальные значения нормального напряжения $\sigma_{\theta\theta, \max}$ и интенсивности напряжений $\sigma_{II, \max}$ достигаются в точках, лежащих на большей части поверхности полости. Отметим, что подобное распределе-

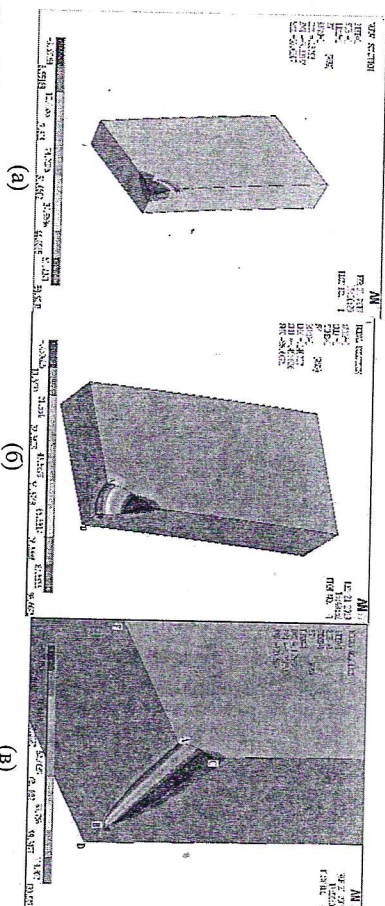


Рис. 1. Распределение $\sigma_{\theta\theta} / P_0$, (а) $d = 0.5\delta$, $h = 0.1\delta$, (б) $d = 0.5\delta$, $h = 0.5\delta$, (в) $d = 0.1\delta$, $h = 0.8\delta$

ние напряжений наблюдается для коррозионных пятен, когда глубина дефекта h на порядок меньше характерного размера пятна d . При увеличении глубины

и область максимальных нормального и интенсивности напряжений «сглативается» к линии АВ (см. рис. 1 (б,в)), где эти значения примерно постоянны.

На рис. 2 представлены компоненты максимального нормального напряжения $\sigma_{\theta\theta}$, интенсивности напряжений σ_{ii} и продольного напряжения σ_{zz} и компоненты соответствующих номинальных напряжений $\sigma_{\theta\theta}^{ном.}$, $\sigma_{zz}^{ном.}$ по минимальному сечению ВД на рис. 1 в зависимости от радиуса r для язвы (а) и питтинга (б). Для случая питтинга на рис. 3 изображены компоненты макси-

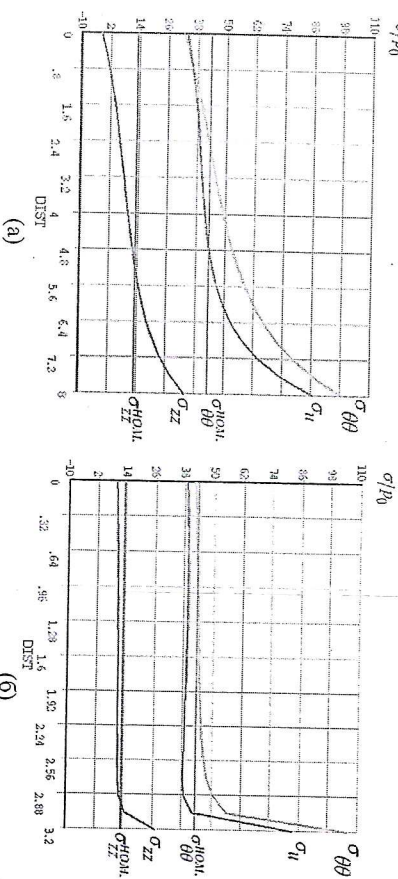


Рис.2. Напряжения $\sigma_{\theta\theta}$, σ_{zz} и σ_{ii} в зависимости от r , мм ($r = 0$ на внутренней поверхности), (а) $d = 0.5\delta$, $h = 0.5\delta$ (б) $d = 0.1\delta$, $h = 0.8\delta$

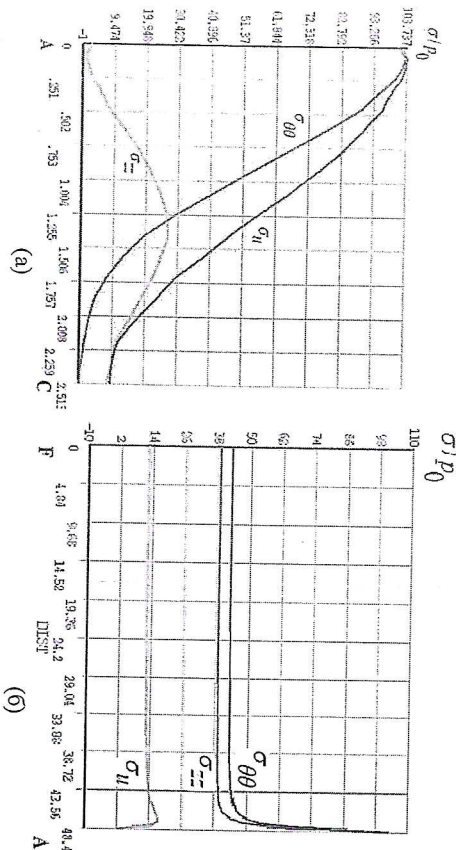


Рис.3. Напряжения $\sigma_{\theta\theta}$, σ_{zz} и σ_{ii} (рис. 1(в)): (а) - в зависимости от угла θ (в град.) по линии АС, (б) - по линии FА (мм) на поверхности элемента при $d = 0.1\delta$, $h = 0.8\delta$

нормального напряжения $\sigma_{\theta\theta}$, интенсивности напряжений σ_{ii} и продольного напряжения σ_{zz} по линиям АС и FА на рис. 1. Из рис.2 (б) и рис. 3 видно, что в случае питтинга градиенты напряжений $\sigma_{\theta\theta}$ и σ_{zz} существенно больше воли-зи точки В и ее небольшой окрестности.

На рис. 4 (а) представлены зависимости коэффициента концентрации напряжений K_{σ} , $K_{\sigma} = \frac{\sigma_{\theta\theta, \max}}{\sigma_{\theta\theta}^{ном.}}$, от глубины дефекта h . Получено, что с увеличением глубины

дефекта h при размерах дефекта $0 < d \leq 2\delta$ коэффициент концентрации напряжений увеличивается в диапазоне $1 \leq K_{\sigma} < 2.8$. При одной и той же глубине дефекта h коэффициент концентрации увеличивается с уменьшением размера дефекта d . При размере коррозионного дефекта $d > 2\delta$ можно использовать решение задачи об общей коррозии. Предельное состояние элемента определяется как достижение максимальной интенсивности напряжений предела текучести. На рис. 3(б) представлены результаты расчетов предельного внутреннего давления в зависимости от глубины дефекта $p_f = p_f(h)$.

Кривая (4) соответствует случаю общей равномерной коррозии.

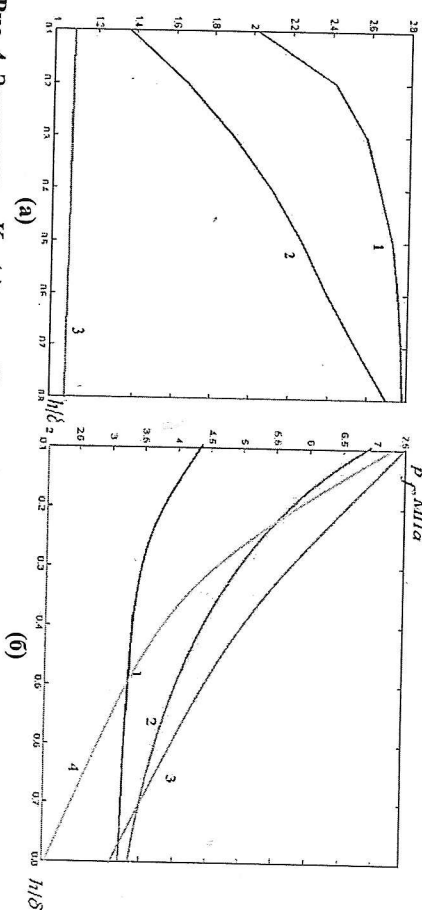


Рис.4. Зависимости K_{σ} (а) и p_f (б) от глубины дефекта, 1 — $d = 0.1\delta$, 2 — $d = 0.5\delta$, 3 — $d = 2\delta$, 4 — $d = 5\delta$

Из численного анализа следует, что линия АВ (см. рис.1) находится в области максимального нормального напряжения. Поэтому ее можно выбрать в качестве условной расчетной трещины. Глубина условной трещины полагается равной 0.5 мм. Из решения трехмерной задачи для элемента с коррозионным дефектом и трещиной находится коэффициент интенсивности напряжений $K_{I,c}$.

На основе силового критерия разрушения вероятность достижения условной расчетной трещиной критических размеров Q_c определяется в следующем виде:

$$Q_c = \frac{K_I}{K_{I,c}} \quad (4)$$

где K_I – коэффициент интенсивности напряжений, $K_{I,c}$ – коэффициент трещиностойкости материала.

Таким образом, в докладе представлены основные соотношения для определения вероятности разрушения конструктивных элементов в условиях четырех видов коррозионного воздействия при эксплуатационном нагружении. С помощью программного комплекса ANSYS найдено изменение напряженно-деформированного состояния элемента в процессе развития различных видов коррозионных дефектов. Определена зависимость предельного внутреннего давления по достижению предела текучести от характерных размеров коррозионных дефектов. Для оценки трещиностойкости элемента введены понятия условной расчетной трещины и вероятности достижения ее критических размеров. Эта вероятность определяется по силовому критерию механики разрушения.

Литература

1. ВРД 39-1.10-004-99. Методические рекомендации по количественной оценке состояния магистральных газопроводов с коррозионными дефектами, их ранжирования по степени опасности и определению остаточного ресурса. – М.: ОАО «Газпром». – 2000. – 44 с.
2. Хасяняков В.И. Сопротивление материалов. Коррозионное растрескивание. – М.: Юрайт, 2016. – 263 с.
3. Завойчинский Б.И. Долговечность магистральных и технологических трубопроводов (теория, методы расчета, проектирование). – М.: Недра, 1992. – 271 с.
4. Завойчинский Б.И., Завойчинская Э.Б. Общая теория долговечности промышленных конструкций, эксплуатируемых в сложных природно-климатических условиях // Проблемы машиностроения и автоматизации, № 2. – 2008. – с. 46–52.
5. Завойчинский Б.И., Завойчинская Э.Б. Проектная оценка долговечности протяженных конструкций магистральных трубопроводов // Проблемы машиностроения и надежности машин. № 1. – 2009. – с. 114–122.

6. Завойчинский Б.И., Завойчинская Э.Б., Волчанин А.В. Вероятностная оценка остаточных сроков безопасности эксплуатации протяженных конструкций // Справочник. Инженерный журнал. № 7. – 2012. – с. 41–46.

7. Завойчинский Б.И., Завойчинская Э.Б., Волчанин А.В. Вероятностная оценка остаточных сроков безопасности эксплуатации протяженных конструкций // Справочник. Инженерный журнал. № 12. – 2012. – с. 33–36.

8. Завойчинская Э.Б. Усталостное масштабно-структурное разрушение и долговечность конструкций при пропорциональных процессах нагружения. – М.: Типография ООО «Генезис», 2018. – 262 с.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОЗИТА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ СТАТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

Каюмов Р.А.^{1,3}, Паймушин В.Н.^{1,2}, Холмогоров С.А.¹

¹Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева, г. Казань, ²Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, ³Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань

Методологии решения коэффициентных обратных задач, в частности, задач идентификации механических характеристик материалов, может быть сформулирована следующим образом. Пусть уравнения равновесия для образцов, для которых проведены испытания, записаны в виде

$$\zeta(x, u, g_j) = 1, \quad j = 1, J \quad (1)$$

где x – набор искомых характеристик материала, u – векторы перемещений, g_j – заданный набор данных, соответствующих j -му испытанию (внешние воздействия, “отклики”, геометрические характеристики образца и, возможно, некоторые физико-механические характеристики материала). Для получения решения задачи отыскания x обычно минимизируется норма $\delta(x)$ вектора невязки системы (1) при некоторых ограничениях, вытекающих из каких-либо физико-механических, модельных соображений.

Однако решение задачи минимизации нормы $\delta(x)$ может не обеспечивать приемлемую точность выполнения уравнений (1), к тому же сама задача быть может быть неустойчивой к вариациям исходных данных. В данной работе предлагается использовать следующий подход. Допуская, что исходные данные могут быть не совсем точны, во всех уравнениях задачи все наборы g_j заменим на $g_j + \Delta g_j$. Кроме того, можно предположить, что по технологическим причинам искомые механические характеристики материала могут несколько изменяться от