УДК 629.02:539.4

ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЁЖНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ МАШИН, УСТАНОВОК, ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ НА ЭТАПЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

©2015 Ю.Л. Тарасов

Самарский государственный аэрокосмический университет им. акад. С.П. Королева (национальный исследовательский университет)

В статье показано, что для обеспечения надежности элементов конструкций машин, установок, трубопроводных систем на стадии проектирования можно использовать критерии механики разрушения.

Ключевые слова: *надёжность, внезапные и постепенные отказы, сопротивление разрушению, повреждение*

Из всех этапов создания конструкций машин, установок, трубопроводов (проектирование, изготовление, эксплуатация) наиболее важным является этап проектирования, так как здесь закладывается необходимый уровень надежности – вероятности безотказного функционирования элементов конструкции изделия в течение заданного срока службы в реальных условиях эксплуатации. На других этапах уровень надежности реализуется и расходуется.

В настоящей работе рассматривается методология использования критериев сопротивления разрушению материала при оценке надежности элементов конструкции с учетом эксплуатационных и конструктивно-технологических факторов на этапе проектирования. Эта проблема решается с учетом влияния совокупности конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов – с одной стороны, а также с учетом стохастического характера эксплуатационных нагрузок и рассеивания характеристик вязкости и прочности элементов конструкции – с другой стороны. При этом анализируется прочностная надежность элементов конструкции изделия, под которой понимается вероятность отсутствия отказа из-за потери прочности за заданное время эксплуатации изделия. Надежность $H(t)$ трактуется как вероятность пребывания функции качества $V(\tau)$ в заданной области Ω_0 в течение требуемого времени t, то есть

$$H(t) = P\left[V(\tau) \in \Omega_0 ; 0 \le \tau \le t\right] \qquad (1)$$

Вычислению функции надежности (1) предшествуют три этапа: схематизация системы и внешнего воздействия, решение задачи статистической динамики, выбор области допустимых состояний Ω_0. При схематизации конструкция изделия представляется в виде системы соединенных между собой элементов. К одной группе относятся элементы конструкции, для которых недопустимо появление дефектов, к другой – конструкционные элементы с дефектами (непровары, поры, растрескивание), которые могут возникнуть как при изготовлении, так и в условиях эксплуатации – усталостные трещины.

При расчете надежности конструкции как сложной системы учитывается возможность постепенных отказов в результате длительного действия на конструкцию нагрузок разного уровня и внезапных отказов при действии максимальных нагрузок, возникающих при неблагоприятных, но вполне реальных условиях и режимах работы конструкции. Это учитывается путем схематизации элемента конструкции в виде модели из двух последовательно соединенных фиктивных элементов, под которыми подразумевается реальный элемент, имеющий лишь один вид отказа – внезапный или постепенный.

Для оценки надежности элементов конструкции необходима информация о том, как влияют условия эксплуатации, а также конструктивно-технологические факторы на положение границ области допустимых состояний Ω_0. Информация о влиянии условий эксплуатации и конструктивно-технологических факторов на характеристики конструктивных материалов необходима не только для оценки надежности, но и для обоснованного выбора материалов при проектировании, что является основой обеспечения заданного уровня надежности.

Так как реализация комплексных экспериментальных исследований ограничивается техни ческими и экономическими возможностями, то

Тарасов Юрий Леонидович, доктор технических наук, профессор кафедры космического машиностроения.
E-mail: proch@ssau.ru

одной из важнейших задач является разработка таких методов испытаний, которые при приемлемых затратах и хорошей воспроизводимости результатов давали бы необходимую информацию об объекте исследования. Для реализации поставленной задачи возможно использование методов математического моделирования, при помощи которых анализируются математические модели. Под математической моделью подразумевается математическое описание реального явления или процесса, помогающее анализировать его и делать разумные предсказания. В реальной ситуации действует множество переменных (факторов). Некоторые из них оказывают существенное влияние на само явление или процесс, другие – малое, несущественное. В результате выявления существенных факторов и отбрасывания несущественных происходит идеализация и схематизация реального физического явления. После построения модели проверяют ее способность адекватно описывать исходную ситуацию. Считают, что модель адекватна, если результаты, полученные на основе этой модели, достаточно хорошо для целей рассматриваемой задачи отражают реальную физическую ситуацию. Схема такого моделирования представлена в [1].

Методы математического моделирования применимы также для эффективного проведения эксперимента, поэтому для учета влияния технологии изготовления элементов конструкции и условий эксплуатации была разработана методика проведения экспериментальных исследований на основе методов теории планирования эксперимента. Методика распространяется на испытания образцов из изотропных и анизотропных конструкционных материалов, моделей и элементов конструкций. Эксперименты могут проводиться в лабораторных и натурных условиях.

Объектом исследования являются механические характеристики (предел прочности – $\sigma_в$, относительное удлинение – δ; предел текучести – $\sigma_{0,2}$; относительное сужение – ψ и т.д.), а также критерии разрушения (коэффициенты интенсивности напряжения – K_c и K_{1c}; энергетические критерии – G_{1c}, G_c, J_{1c}, J_c; деформационные – раскрытие трещин – δ_{1c}, δ_c; критическая деформация в вершине трещины ε_c; скорость роста трещины ($d\ell/dN$), характеристики ползучести и длительной прочности $\sigma_u(\tau)$, $d\ell/d\tau_1$.

Математической моделью эксперимента являются уравнения, связывающие входы (факторы X_1, X_2, X_3,…,X_k, …,) с выходами (функциями отклика Y_1, Y_2, $Y_{3,...,}Y_m$). В общем виде эти уравнения имеют вид

$$Y_i = \varphi_i\left(X_1, X_2, X_3, \ldots, X_k\right) \quad \left(i = 1, 2, \ldots, m\right) \tag{2}$$

Здесь под факторами подразумеваются все способы воздействия на объект исследования (внешние – нагрузки, условия эксплуатации и т.д.; внутренние – конструктивные, технологические и т.д.). Под функцией отклика понимаются численные характеристики экспериментальных исследований ($\sigma_в$, σ_τ, $d\ell/dN$, J и т.д.).

При обеспечении надёжности используются характеристики вязкости разрушения при плоском напряженном состоянии

$$G_c = J_c = K_c / E \tag{3}$$

и в условиях плоской деформации

$$G_{1c} = J_{1c} = \left(1 - \mu^2\right) K_{1c} / E \tag{4}$$

где G – интенсивность освобождающейся энергии в процессе распространения трещины; J – интеграл Райса-Черепанова; E – модуль упругости; μ – коэффициент Пуассона.

Зная критические значения коэффициента интенсивности напряжений и интенсивности освобождающейся энергии, можно сформулировать критерии прочности. Энергетический критерий прочности (отсутствие трещины) записывается в виде

$$G \le G_c \text{ или } G_{1c}. \tag{5}$$

Для силового критерия имеем

$$K \le K_c \text{ или } K_{1c}. \tag{6}$$

Исследования показывают, что эти критерии справедливы в условиях хрупкого и квазихрупкого разрушения. В условиях общей текучести материала критерий прочности имеет вид

$$J \le J_c \text{ или } J_{1c}. \tag{7}$$

В [1, 2] показано, что сопоставление разных материалов, сравнение результатов термообработки, технологических способов, а также результатов влияния среды эксплуатации следует проводить по диаграммам сравнительного анализа, построенным в координатах K_{1c} – $\sigma_{0,2}$; K_c – $\sigma_{0,2}$. На этих диаграммах конструкционные материалы в зависимости от их характеристик в состоянии поставки, технологических операций (термообработки, сварки), условий эксплуатации располагаются в различных областях. Ограничивающая эти области линия отражает

технологический уровень, достигнутый в настоящее время. Разработка новой технологии, создание сплавов с другими легирующими элементами, применение новых методов термообработки, усложнение режимов эксплуатации могут значительно сместить эту линию.

Применение в конструкции тонкостенных высоконагруженных элементов из различных материалов ставит задачу изучения их живучести и работоспособности при циклическом нагружении. Поэтому наряду с диаграммами сравнительного анализа необходимо использовать такие обобщенные графики, как зависимость скорости роста усталостной трещины от размаха коэффициента интенсивности напряжений.

Итак, наличие диаграмм сравнительного анализа и обобщенных кинетических диаграмм $d\ell/dN - \Delta K$ позволяет уже на стадии проектирования сделать рациональный выбор конструкционного материала с учетом технологических факторов и условий эксплуатации, обеспечивая необходимый уровень надёжности конструкции.

Рассмотрим вначале методику оценки надежности элементов конструкций, не допускающих появление дефекта в виде трещины, к которым предъявляются требования отсутствия дефектов в виде трещин. Учитывая возможность возникновения в элементе конструкции нормальных и касательных напряжений, за параметр состояния при внезапном отказе принимается эквивалентное напряжение, подсчитанное по одной из теорий прочности. В процессе эксплуатации происходит износ материала конструкции из-за влияния условий эксплуатации. Поскольку величина предельно допустимых напряжений $\sigma_{пр}$ является случайной, то при наличии износа ее следует считать случайной функцией времени. С учетом этого условие безотказной работы записывается в виде

$$H(t) = P\left[\sigma_{экв}(\tau) < \sigma_{пр}(t); 0 \le \tau \le t\right] \qquad (8)$$

Следуя работам В.В. Болотова, нижняя оценка для функции надежности выражается через среднее число положительных выбросов за границу области распределения $\sigma_{пр}$ в единицу времени.

В процессе эксплуатации конструкции и взаимодействия с окружающей средой происходит ухудшение параметров ее качества, что связано с постепенным накоплением в конструкции повреждений, для описания поведения которых используются кумулятивные модели. Для целого ряда конструкций недопустимо появление усталостных трещин при их эксплуатации. Тогда за постепенный отказ таких элементов конструкций целесообразно принять появление первой усталостной макротрещины длиной ℓ_0. В этом случае за параметр состояния системы $V(\tau)$ принимается усталостная трещина. Для неповрежденного элемента конструкции $V(\tau)$ равна нулю и ℓ_0 – для разрушенного элемента. С учетом сказанного общее выражение (1) представляется в виде

$$H(t) = P\left[l(\tau) < l_0\right] \qquad (9)$$

Современные требования к изделиям в отношении их массы и эффективности не позволяют гарантировать отсутствие местных повреждений в течение полного срока службы конструкции. При достаточно больших поперечных размерах детали трещина развивается в ней неконтролируемо, практически мгновенно, если напряжение превышает некоторое критическое значение. Это предельное состояние и характеризуется вязкостью разрушения. Разрушающие напряжения в элементах конструкции могут быть существенно ниже предела текучести из-за наличия концентраторов и начальных дефектов (микро- и макротрещин, включений и т.д.). За параметр состояния при внезапном отказе принимается один из критериев механики разрушения: коэффициент интенсивности напряжений K или J-интеграл. Тогда граница области Ω_0 определяется характеристиками трещиностойкости K_{1c} или J_{1c}. Из-за роста трещины величина J-интеграла является функцией времени, а в силу стохастического характера внутренних силовых факторов – случайной функцией. Тогда условие безотказной работы принимает вид

$$H(t) = P\left[J(\tau) < J_c; \quad 0 \le \tau \le t\right] \qquad (10)$$

Отказ трактуется как выброс случайного процесса $J(\tau)$ за предельный уровень. Статистический анализ результатов эксперимента показал, что для различных материалов закон распределения $f(J_c)$ может быть принят нормальным. В качестве параметра состояния при постепенном отказе поврежденных элементов конструкций берется скорость роста трещины $d\ell/dN$. Тогда функция надежности для элементов конструкции, допускающих появление дефекта, запишется в виде

$$H(t) = P\left[\frac{dl}{dN}(\tau) < \left(\frac{dl}{dN}\right)_c; 0 \le \tau \le t\right]. \qquad (11)$$

Граница области допустимых состояний $(d\ell/dN)_c$ имеет стохастический характер и зависит от условий окружающей среды в процессе эксплуатации конструкции. Согласно

разработанной методике функция надежности при постепенном отказе для элементов конструкции, допускающих развитие трещин, определяется с использованием пошагового принципа. Надежность всей конструкции летательного аппарата может быть рассчитана по формуле модели цепи

$$\frac{1}{H(t)} = \sum_{i=1}^{m} \frac{1}{H_i(t)} - (m-1) \qquad (12)$$

где $H_i(t)$ – надежность i-го элемента.

Эти результаты оценки надежности дают возможность обнаружить слабые элементы в случае недостаточного уровня надежности, а также элементы, надежность которых выше уровня, обусловленного тактико-техническими требованиями. Слабые элементы требуют усиления, а элементы конструкции с повышенным уровнем надежности можно при необходимости рассматривать как резерв массы.

На основании информации об уровнях надёжности элементов конструкций следует решать вторую часть проблемы. Это собственно обеспечение уровня надёжности. Для этого в распоряжении специалистов, занимающихся созданием конструкций машин, установок, трубопроводных систем, при проектировании есть возможность предпочтительного выбора конструкционных материалов, технологических процессов изготовления элементов конструкций, изменение размеров сечений силовых элементов и т.д.

Изложенная методология может быть использована при оценке эффективности конструкторско-технологических решений. Согласно этой методологии предпочтение нужно отдавать тем вариантам решений, которые соответствуют наиболее высоким уровням надежности. Применение методологии рассмотрено в работах [1, 2] применительно к конструкциям космических летательных аппаратов и к участкам газонефтепроводов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. *Тарасов, Ю.Л.* Надежность конструкций летательных аппаратов: Методология обеспечения / *Ю.Л. Тарасов, Э.И. Миноранский, В.М. Дуплякин.* – М.: Машиностроение, 1991. 230 с.
2. *Перов, С.Н.* Обеспечение надёжности трубопроводных систем / *С.Н. Перов, С.И. Аграфенин, Ю.В. Скворцов, Ю.Л. Тарасов.* – Самара: ООО «Издательство СНЦ РАН», 2008. 246 с.

ENSURING RELIABILITY OF STRUCTURAL ELEMENTS OF MACHINES, UNITS, PIPELINE SYSTEMS AT THE DESIGN STAGE

© 2015 Yu.L. Tarasov

Samara State Aerospace University named after acad. S.P. Korolyov
(National Research University)

In article it is shown that for ensuring reliability of structural elements of machines, units, pipeline systems at a design stage it is possible to use criteria of fracture mechanics.

Key words: *reliability, abrupt and gradual failure, fracture resistance, damage*

Yuriy Tarasov, Doctor of Technical Sciences, Professor at the Space Mechanical Engineering Department. E-mail: proch@ssau.ru