

УДК 621.64:539.4

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СВОЙСТВ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ СОЗДАНИИ ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ

© 2013 Ю.Л. Тарасов, В.И. Кочетов, О.В. Хвесюк

Самарский государственный аэрокосмический университет

Поступила в редакцию 13.12.2013

В статье рассматривается методика проведения исследований на основе теории планирования эксперимента. Объектом исследований являются характеристики вязкости и прочности материалов. Предлагается учитывать технологические, физические, эксплуатационные факторы. Возможность варьирования значений факторов позволяет прогнозировать свойства материалов.

Ключевые слова: *планирование эксперимента, фактор, функция отклика, прочность, вязкость*

Для оценки и обеспечения прочности, долговечности и надёжности элементов конструкции необходима информация о том, как влияют условия эксплуатации, а также конструктивно-технологические факторы на положение границ области допустимых состояний Ω_0 . Эта область определяется принятыми критериями надёжности. При установлении критериев надёжности элементов конструкции будем полагать, что для них недопустимым является достижение предельного состояния. Недопустимыми могут быть потеря устойчивости, появление трещин, хрупкое или вязкое разрушение, большие деформации (упругие, пластические) и т.п. Для силовых элементов конструкции характерными видами отказов могут быть превышение предела упругости или текучести, хрупкое и вязкое разрушение, накопление усталостных повреждений, появление трещин, потеря устойчивости, механический износ.

Ограничимся рассмотрением предельных состояний по прочности, по накоплению повреждений (появление трещины), по живучести. За параметр состояния в зависимости от решаемой задачи с учётом требований, предъявляемых к элементам конструкции, принимаются напряжения $\sigma(t)$, коэффициенты интенсивности напряжений $K(t)$, или J -интеграл, длина дефекта (трещины) $l(t)$ или скорость развития трещины $dl/dt(t)$. Параметрами области допустимых состояний в этих случаях являются: предел текучести σ_T , предел прочности σ_B , критерии механики

разрушения K_c , K_{1c} , J_c , J_{1c} , допустимая длина трещины l_0 и критическая скорость роста усталостной трещины. Знание этих параметров позволяет не только производить оценку вероятности безотказной работы, но и правильно выбрать материал на этапе проектирования трубопроводных систем.

В процессе эксплуатации трубопроводов вследствие воздействия внешней окружающей среды, которую характеризуют температура, коррозионные факторы и другие параметры, происходит изменение границы области Ω_0 со временем. Положение границы зависит также от таких технологических факторов как, например, режимы сварки, термообработки и т.д. Поскольку параметры, определяющие границу области допустимых состояний σ_B , σ_T , K_c , J_c , $(dl/dN)_c$, имеют стохастическую природу, то эта граница представляет собой случайную функцию времени. При наличии в элементах конструкции начальных металлургических и технологических дефектов (трещин, пор, включений, скоплений дислокаций, расслоений, непроваров), а также образование трещин по мере накопления и развития эксплуатационных повреждений (циклических, коррозионных, эрозионных, от деформационного старения) необходимо производить оценку сопротивления элементов разрушению на основе энергетических, силовых и деформационных критериев механики разрушения. Критерии разрушения (плотность энергии продвижения трещины, критические значения коэффициентов интенсивности напряжений, раскрытие в вершине трещины и т.д.) позволяют выбирать материал, обеспечивающий надёжность конструкции обоснованной металлоёмкости, производить сравнение материалов. Они являются контрольными характеристиками при разработке

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

Кочетов Владимир Иванович, аспирант

Хвесюк Олег Вячеславович, заведующий учебной лабораторией кафедры космического машиностроения.

новых сплавов, при выборе режимов технологических процессов, при исследовании поведения материалов в условиях среды эксплуатации участков трубопроводов.

Для определения соответствующих критериальных характеристик разрушения необходимо использовать стандартизованные методы испытаний и систематические экспериментальные данные о закономерностях изменения этих характеристик в связи с конструктивными, технологическими и эксплуатационными факторами. Для определения области допустимых состояний Ω_0 , а также для разработки и обоснования методов определения критериальных характеристик поведения материалов, используемых при расчёте

прочности и надёжности конструкций с учётом влияния технологических и эксплуатационных факторов, необходимы комплексные экспериментальные исследования конструкционных материалов и элементов конструкций. На рис. 1 приведена схема таких исследований, из которых видно, что их объём и сложность весьма велики. Так как реализация комплексных экспериментальных исследований ограничивается техническими и экономическими возможностями, то одной из важнейших задач является разработка таких методов испытаний, которые при приемлемых затратах и хорошей воспроизводимости результатов давали бы необходимую информацию об объекте исследования.



Рис. 1. Схема проведения комплексных испытаний

Для реализации поставленной задачи возможно использование методов математического моделирования [4], при помощи которых анализируются математические модели. Под математической моделью подразумевается математическое описание реального явления или процесса, помогающие анализировать его и делать разумные предсказания. В реальной ситуации действует ряд 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 её 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 на рис. 2. Методы математического моделирования применимы также для эффективного проведения эксперимента [4]. Поэтому для учёта 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 натуральных условиях.

Объектом исследования являются механические характеристики (предел прочности – σ_B ;

относительное удлинение – δ ; предел текучести $\sigma_{0,2}$; относительное сужение – ψ и т.д.), а также критерии разрушения (коэффициенты интенсивности напряжения – K_c, K_{Ic} ; энергетические критерии – $G_{Ic}, G_c, \gamma_k, J_{Ic}, J_c$, деформационные –

раскрытие трещин – δ_{Ic}, δ_c ; критическая деформация в вершине трещины ϵ_c ; скорость роста трещины dl/dN , характеристики ползучести и длительной прочности $\sigma_u(\tau), dl/dt_1$.

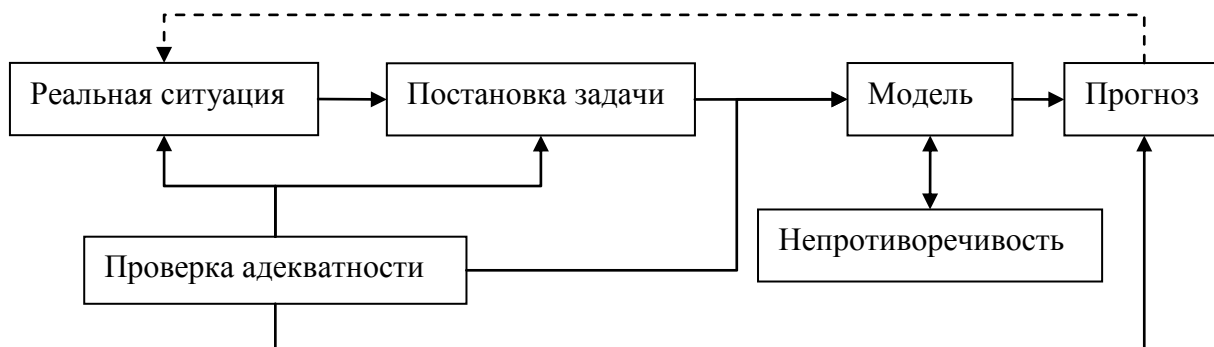


Рис. 2. Схема математического моделирования

Математической моделью эксперимента являются уравнения, связывающие входы (факторы X_1, X_2, \dots, X_k) с выходами (функциями отклика Y_1, Y_2, \dots, Y_k). В общем виде эти уравнения имеют вид

$$Y_i = \varphi_i(X_1, X_2, \dots, X_k) (i = 1, 2, \dots, m)$$

Здесь под факторами подразумеваются все способы воздействия на объект исследования (внешние – нагрузки, условия эксплуатации и т.д.; внутренние – конструктивные, технологические и т.т.). Под функцией отклика понимаются численные характеристики экспериментальных исследований ($\sigma_0, \sigma_T, K_c, J_c, dl/dN_1$ и т.д.). Выбранная модель должна быть адекватной и простой. Под адекватностью понимается способность модели предсказывать результаты эксперимента в некоторой области с требуемой точностью. Адекватность модели проверяется после реализации опытов. Простота модели зависит от вида функции отклика. Будем рассматривать модели в виде алгебраических полиномов.

$$Y_i = b_0 + \sum_{j=1}^k b_j X_j + \sum_{1 \leq j < l} b_{jl} X_j X_l + \sum_{1 \leq j < l < m} b_{jlm} X_j X_l X_m \quad (1)$$

где $b_0, b_j, b_{jl}, b_{jlm}$ – коэффициенты.

Факторы в пределах эксперимента имеют определённое число уровней, фиксированный набор которых определяет условия проведения одного из возможных опытов. Число всех возможных экспериментов N будет равно числу всех уровней p , возведённому в степень числа факторов k , т.е. $N = p^k$. Обычно на объект воздействуют сразу множество факторов (совкупность). В этом случае факторы должны быть совместимы и независимы. Это значит, что все

их комбинации должны быть безопасно осуществимы и возможно установление факторов на любом уровне независимо от уровней других факторов.

Для планирования эксперимента необходимо выбрать локальную область факторного пространства. Выбор этой области связан с тщательным анализом априорной информации об исследуемом объекте. Процедура выбора области включает в себя также выбор основного уровня и интервалов варьирования факторов. Здесь основным уровнем – это точка многомерного факторного пространства, задаваемая комбинацией уровней факторов и являющаяся центром области экспериментов. При установлении основного (нулевого) уровня необходимо рассматривать различные ситуации, анализируя априорную информацию. При отсутствии априорной информации выбор основного уровня произволен. При использовании модели вида (1) для сокращения числа опытов каждый фактор достаточно варьировать на двух уровнях – верхнем и нижнем, т.е. производить 2^k опытов. Минимальная величина интервала варьирования должна быть больше ошибок воспроизведения уровней факторов в опыте, иначе верхний и нижний уровни факторов будут неразличимы. При увеличении интервалов варьирования увеличивается точность определения коэффициента уравнения. Однако необходимо иметь в виду, что при чрезмерном увеличении интервалов варьирования затрудняется возможность применения моделей типа (1) и может измениться физическое содержание исследуемого объекта. Для упрощения записи условий проведения эксперимента об обработке полученных экспериментальных данных удобно масштаб изменения факторов выбирать так, чтобы верхний уровень соответствовал +1,

нижний -1 , а основной – нулю. Это можно всегда сделать с помощью преобразования

$$X_j = (x_j - x_{j0}) / I_j \quad (2)$$

где X_j – кодированное значение фактора; x_j – натуральное значение фактора; x_{j0} натуральное значение основного уровня; I_j – интервал варьирования; j – номер фактора.

Условия эксперимента при этом представляются в виде таблицы – матрицы планирования. Каждая строка матрицы называется вектор-строкой, и значения X_j в ней соответствуют величинам всех k факторов при данном опыте; каждый столбец называется вектор-столбцом, а значения X_j в нём соответствуют величинам j -го фактора в каждом из N опытов. Оценки коэффициентов уравнения (1), используя метод наименьших квадратов, определяем по формулам

$$b_j = \frac{\sum_1^N X_{ji} Y_i}{N}, \quad j = 0, 1, \dots, k \quad (3)$$

для основных факторов и для эффектов взаимодействия первого порядка, второго порядка и т.д. (т.е. парного взаимодействия, тройного и т.д.).

$$b_{jl} = \frac{\sum_1^N X_{ji} Y_i X_{li}}{N}, \quad l, j = 1, 2, \dots, k; j \neq l; \quad (4)$$

$$b_{jlm} = \frac{\sum_1^N X_{ji} X_{li} X_{mi} Y_i}{N}, \quad j, l, m = 1, 2, \dots, k; j \neq l \neq m;$$

Методика обработки результатов эксперимента достаточно подробно изложена в [4]. Суть её заключается в следующем. По результатам эксперимента определяются среднее значение и дисперсия, как для параллельных опытов, так и для всей совокупности. При наличии резко отличающегося результата в i -ом опыте его следует проверить и в случае несоответствия отбросить. При малом числе измерений такая проверка осуществляется по критерию Романовского [5]. Для этого результат сомнительного опыта исключается и по оставшимся данным находится среднее \bar{Y} и дисперсия $D_{\{y\}}$. Результат i -го опыта Y_i отбрасывается, если $Y_i - \bar{Y} \geq t \sqrt{D_{\{y\}}}$, где t берётся из таблиц [4] при уровне значимости $\alpha=0,05$. В противном случае результат i -го опыта включается в расчёт и вероятностные характеристики пересчитываются с учётом всех опытов. Для проверки однородности дисперсий используется критерий Фишера [7], согласно которому гипотеза об однородности дисперсий $D_{1\{y\}}$ и $D_{2\{y\}}$ не отвергается, если величина $F_p = D_{1\{y\}} / D_{2\{y\}}$ не превышает табличного

значения F_m . Если при сравнении более чем двух дисперсий одна из них значительно превышает остальные, используется критерий Кохрена $G = D_{max} / \sum_{i=1}^N D_i$, где D_i – дисперсия в i -ом опыте. Гипотеза об однородности подтверждается, если экспериментальное значение критерия Кохрена не превышает табличного. При неодинаковом числе параллельных опытов в точках плана используется критерий Бартлетта, согласно которому гипотеза об однородности дисперсий принимается, если χ^2 меньше табличного значения. При этом

$$\chi^2 = \frac{1}{c} \left(f \lg D_{\bar{y}} - \sum_{i=1}^N f_i \lg \bar{D}_i \right), \quad (5)$$

где $f_i = n_i - 1$ – число степеней свободы в i -ом опыте; $f = N - 1$; \bar{D}_i – дисперсия среднего арифметического в строке матрицы планирования; $D_{\bar{y}}$ – дисперсия воспроизводимости.

$$D_{\bar{y}} = \frac{\sum_{i=1}^N f_i \bar{D}_i}{\sum_{i=1}^N f_i}; \quad (6)$$

$$c = 0,4343 \left(1 + \frac{1}{3f} \left(\sum_{i=1}^N f_i - \frac{1}{f} \right) \right).$$

После проверки дисперсии во всех опытах вычисляется дисперсия всего эксперимента

$$D = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{q=1}^{n_i} (Y_{iq} - \bar{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (n_i - 1)}, \quad (7)$$

где n_i – число параллельных опытов.

Далее производится оценка коэффициентов функции отклика. Проверка их значимости осуществляется построением доверительных интервалов. С учётом дисперсии всех коэффициентов

$$D(b_j) = D_{\{y\}} / N, \quad (8)$$

Они зависят только от ошибок и числа опытов, доверительный интервал Δb_j определяется выражением

$$\Delta b_j = \pm t \sqrt{D(b_j)} \quad (9)$$

где t – табличное значение критерия Стьюдента.

Считается, что коэффициент значим, если его абсолютная величина больше доверительного интервала. В заключение производится проверка адекватности модели по разности между экспериментальными \bar{Y} и теоретическими \hat{Y} значениями функции отклика в некоторых точках факторного пространства. С этой целью используется критерий Фишера F

$$F = D_{ad}/D_{\{y\}}, \quad (10)$$

где

$$D_{ad} = \frac{\sum_{i=1}^N (\bar{Y}_i - \bar{Y})^2}{f}$$

дисперсия адекватности; $f = N - (k + 1)$ число степеней свободы; k – число факторов модели; N – число опытов в матрице планирования.

Для обоснованного выбора конструкционных материалов для конструкций трубопроводных систем с целью обеспечения необходимого уровня прочности, долговечности, обеспечения надёжности необходимо проведение экспериментальных исследований. При проведении исследований необходимо варьирование технологических факторов – режимов сварки, физических факторов – химического состава в пределах стандарта, эксплуатационных факторов, характеризующих коррозионную активность рабочей среды, тепловых факторов и т.д. Результаты исследований позволят прогнозировать свойства различных материалов при создании трубопроводных систем с учётом воздействия комплекса различных факторов.

Практически доказано, что сопоставление разных материалов, сравнение результатов влияния технологических способов, а также результатов влияния среды эксплуатации следует проводить по диаграмма сравнительного анализа, построенным в координатах $K_{IC} - \sigma_{0.2}$; $K_C - \sigma_{0.2}$. 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 обобщённые графики, как зависимость скорости роста усталостной трещины от размаха коэффициента интенсивности напряжений. Наличие диаграмм сравнительного анализа обобщённых кинетических диаграмм $dl/dN - \Delta K$ позволяет уже на стадии проектирования сделать рациональный выбор конструкционного материала с учётом технологических факторов и условий эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. *Тарасов, Ю.Л.* Надёжность элементов конструкций летательных аппаратов. Методология обеспечения / *Ю.Л. Тарасов, Э.И. Миноранский, В.М. Дуплякин.* – М.: Машиностроение, 1992. 224 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», 2008. 246 с.
3. *Тарасов, Ю.Л.* Конструктивно-технологические средства обеспечения надёжности и ресурса трубопроводных систем / *Ю.Л. Тарасов, С.Н. Перов* // Надёжность и экологическая безопасность трубопроводного транспорта: Труды II Всеросс. науч.-практ. конф. (17-19 мая 2005 г.) – Самара, 2005. С. 161-166.
4. *Адлер, Ю.П.* Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / *Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский.* – М.: Наука, 1976. 279 с.
5. *Большев, Л.Н.* Таблицы математической статистики / *Л.Н. Большев, Н.В. Смирнов.* – М.: Наука, 1965. 464 с.

FORECASTING THE PROPERTIES OF CONSTRUCTIONAL MATERIALS AT CREATION THE PIPELINE SYSTEMS

© 2013 Yu.L. Tarasov, V.I. Kochetov, O.V. Hvesyuk

Samara State Aerospace University

In article the method of carrying out researches on the basis of planning experiment theory is considered. Object of researches are characteristics of viscosity and durability of materials. It is offered to consider technological, physical, operational factors. Possibility of variation the values of factors allows to forecast the properties of materials.

Key words: *experiment planning, factor, response function, durability, viscosity*

Yuriy Tarasov, Doctor of Technical Sciences, Professor at the Space Mechanical Engineering Department. E-mail: proch@ssau.ru; Vladimir Kochetov, Post-graduate Student; Oleg Hvesyuk, Chief of the Educational Laboratory at the Space Mechanical Engineering Department