

Расчетно-экспериментальная оценка работоспособности элементов труб в эксплуатационных условиях

Л. В. Кравчук, В. Г. Барило, К. П. Буйских

Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

Разработаны методы экспериментального моделирования эквивалентных эксплуатационных режимов нагружения элементов труб в базовых диапазонах изменения параметров рабочей среды (давление, температура, агрегатное состояние). Созданные экспериментальная стендовая и расчетно-экспериментальная базы позволили исследовать напряженно-деформированное состояние и кинетику разрушения элементов труб в условиях, моделирующих спектры термомеханического нагружения, с целью диагностики реального состояния трубопроводов и оценки остаточного ресурса по показателям функциональной пригодности.

Ключевые слова: элементы труб, трубопроводы, методы моделирования, условия термомеханического нагружения, напряженно-деформированное состояние.

Введение. Анализ методологических подходов к оценке работоспособности трубопроводов, в частности на украинских АЭС, на стадии эксплуатации после выработки определенного ресурса свидетельствует об актуальности решения трех проблемных вопросов.

1. Повышение достоверности информации, необходимой для мониторинга условий эксплуатации и реального состояния по критериям функциональной надежности.

2. Совершенствование методической базы, разработка и внедрение современных информационно-измерительных комплексов с целью оценки реального прочностного состояния отдельных элементов и изделия в целом.

3. Разработка расчетно-экспериментальных методов и создание аппаратных комплексов для мониторинга кинетики повреждения материала ответственных элементов, прогнозирования реального (остаточного) ресурса и обоснования возможности его продления.

С учетом этого цель настоящей работы состоит в проведении комплексных испытаний элементов трубопроводов разного назначения по разработанным методикам для обеспечения их безаварийной эксплуатации в течение установленного ресурса.

Методика исследований. Предполагалось, с учетом расчета ориентировочной несущей способности элементов трубопроводов, разработать методику нагружения последних внутренним давлением, моделирующего возможность коррекции жесткости участка трубопровода с выявленными дефектами. В результате этого будет достигнуто значительное снижение вероятности разрушения трубопровода на полное сечение.

Условия работы элементов трубопроводов моделировались на трубчатых образцах из стали 08X18H10T с имитацией трещины. Для этого в Институте проблем прочности (далее ИПП) им. Г. С. Писаренко НАН Украины на базе

газодинамического стенда был создан соответствующий испытательный стендовый комплекс – пневмогидравлический стенд (ПГС). Стенд имеет следующие основные системы: регулирования параметров газообразных сред (компрессорные станции); регулирования параметров жидких сред (насосные станции); измерений, контроля, мониторинга параметров рабочих сред и объектов исследования; регулирования температуры рабочего тела; ресиверов и аккумуляторов, автоматического программного управления системами стенда. Компрессорные станции включают в себя компрессоры низкого, среднего и высокого давления с расходом воздуха 1,0...0,1 кг/с и максимальным давлением от 0,3 до 50 МПа. Для создания в исследуемых образцах внутреннего давления с контролируемой скоростью повышалось давление в замкнутом объеме при электрическом нагреве рабочей среды (вода, пар, паропроводная смесь, воздух), температура среды может меняться от 20 до 500°C.

Управление экспериментом, сбор и обработка информации осуществлялись с помощью разработанного в СКТБ ИПП им. Г. С. Писаренко НАН Украины на базе усилителей QuantumX фирмы Hottinger Baldwin Messtechnik (HBM) GmbH (Германия) с программным обеспечением (ПО) Catman® AP автоматического информационно-измерительного комплекса ГДС-16, обеспечивающего обработку сигналов от первичных источников, мониторинг информации и представление ее в виде табличных и иллюстративных данных на ПЭВМ. Для регистрации и контроля температуры использовались термомпары типа хромель-копель, хромель-алюмель, платино-платинородий и пирометр инфракрасного излучения Infratherm IGA 140 с ПО InfraWin для ПЭВМ. Контроль и регистрация давления рабочей среды осуществлялись образцовыми манометрами и преобразователями давления РС-28 на предельные давления 2,5; 10; 25 и 50 МПа. Базовый вариант комплекса предусматривает возможность синхронного измерения температур (восемь каналов), деформаций с помощью тензорезисторов (два канала), линейных перемещений (четыре канала) и давлений (два канала).

При нагружении внутренним давлением трубчатых образцов с имитацией трещин, которые располагались в плоскостях, перпендикулярных или параллельных оси трубопровода, предполагалось получить данные, использование которых перспективно при решении проблем предотвращения разрушения трубопровода на полное сечение. Суть метода заключается в увеличении суммарной жесткости максимально деформированного объема и нагружающей его системы в осевом или окружном направлении трубопровода в зависимости от направления распространения трещины. Программа испытаний предусматривала нагружение внутренним давлением труб длиной 125 и 135 мм, диаметром 65 мм и толщиной стенки 4 мм. Материал труб – сталь 08X18H10T (0X18H10T, ЭИ914), предел текучести $\sigma_T = 180...200$ МПа, предел прочности $\sigma_B = 550...600$ МПа, остаточное удлинение $\delta = 50\%$.

В центральной части трубчатого образца создавали искусственный дефект в виде паза, где ожидалось разрушение образца (рис. 1). Ориентировочная остаточная толщина стенки в месте паза определялась расчетным путем. Конфигурация и размеры паза показаны на рис. 1,б. По краям паза на расстоянии 5 и 10 мм выполнены кольцевые пазы шириной 20 мм для уменьшения толщины трубы до 1,1 мм. Толщина стенки образца 1,1 мм на коль-

цевом пазе выбиралась из условия разрушения материала в области продольного дефекта. Таким образом, суммарная жесткость максимально деформированного объема и нагружающей системы для обоих типов труб в радиальном направлении была одинаковой, поскольку трубы имели одинаковые дефекты. В осевом направлении суммарная жесткость труб разных типов различалась, так как их кольцевые пазы были выполнены на разном расстоянии от края продольного паза и имели различную длину утолщенной части вблизи дефекта. Варьирование последней изменяет жесткость системы, нагружающей максимально деформируемый объем на дне дефекта в виде продольного паза в осевом направлении. Аналогично изменяется жесткость системы при наличии арматуры, фланцев, гибов и других конструктивных особенностей.

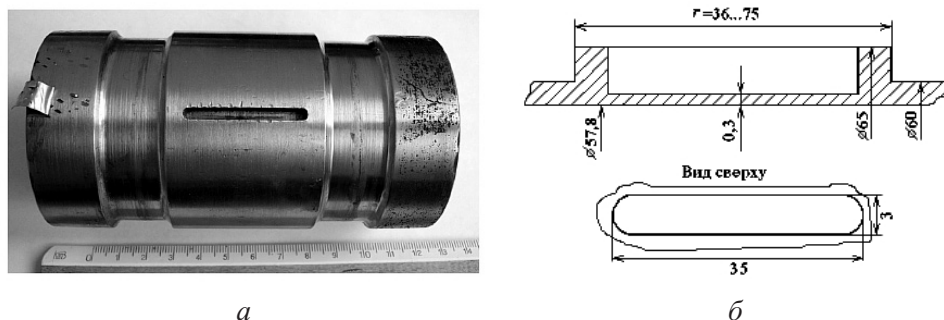


Рис. 1. Внешний вид трубчатого образца (а) и схема дефекта в его центральной части (б).

Давление в трубе P , которое вызывает разрушение трубы с дефектом, определялось по формуле, представленной в работе [1], и для образца без кольцевых пазов составляло 17,48 МПа. Напряженно-деформированное состояние материала трубы вблизи дефекта оценивалось методом конечных элементов. Результаты расчета при давлении 1 Па приведены на рис. 2. Максимальные напряжения σ_{\max} в центре паза при давлении $P = 17,48$ МПа в упругой постановке составляют 2229,62 МПа. Этим напряжениям соответствуют деформации порядка $\varepsilon_{\max} = \sigma_{\max} / E = 1,11\%$.

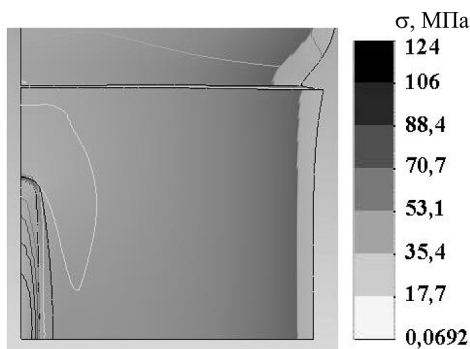


Рис. 2. Распределение напряжений в трубе с дефектом в виде паза при давлении 1 Па.

Испытания трубчатого образца проводились следующим образом. Труба, заваренная с двух сторон, заполнялась водой, которая нагревалась с регули-

руемой скоростью электрическими тэнами заданной мощности. Таким образом внутри трубы создавалось необходимое по величине и скорости изменения внутреннее давление. Образование трещины и ее закрытие при снижении давления фиксировались визуально по появлению и исчезновению струи распыленной воды из трещины, а также по показаниям датчиков. В процессе испытаний измерялись давление в трубе и раскрытие надреза.

Раскрытие надреза (рис. 1,б) измерялось датчиками перемещения в виде стальных скоб с наклеенными тензорезисторами типа КФ-5П1-3-200-А-12 с коэффициентом тензочувствительности $K = 2,18$. Перед испытанием датчики перемещения тарируются с помощью информационно-измерительной системы ГДС-16 и тарировочного устройства на разрывной машине INSTRON. Схема размещения датчиков показана на рис. 3.

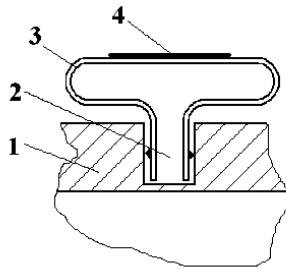


Рис. 3. Схема крепления датчиков для измерения раскрытия надреза: 1 – стенка трубы; 2 – паз; 3 – упругая скоба; 4 – тензорезистор.

Жесткость максимально деформированного объема определялась по диаграмме деформирования образца материала трубопровода с аналогичным обнаруженному дефектом. Путем дифференцирования находили жесткость образца. По приведенным ранее [2] формулам определяются жесткость G , перемещения u и напряжения σ максимально деформированного объема:

$$\begin{cases} G = G_1 + (G_2 - G_1) \frac{R_0^n f(u_0)}{r^n + (R_0^n - r^n) f(u_0)}; \\ u = \frac{ru_0}{R_0} + \left(\frac{R_0^{n-1}}{r^{n-1}} - \frac{r}{R_0} \right) fi(u_0); \\ \sigma = G_1 \frac{u_0}{R_0} + \left(G_2 \frac{R_0^{n-1}}{r^n} - G_1 \frac{1}{R_0} \right) fi(u_0), \end{cases} \quad (1)$$

где $G_1 = E/[1 - (n - 1)\mu]$; $G_2 = -(n - 1)E/(1 + \mu)$; E – модуль упругости; μ – коэффициент Пуассона; n – коэффициент, определяемый теоретически или из эксперимента; r – варьируемый размер образца; $fi(u_0)$ – интеграл функции жесткости $f(u_0)$ от перемещения u_0 образца размера R_0 . Коэффициент n зависит от варьируемого размера r и формы тела. Теоретически он определяется для простых тел: в случае варьируемого размера r шара с неварьируемым размером R_0 в объеме, жесткость которого меняется, имеем

$n = 3$, для цилиндра – $n = 2$, для стержня – $n = 1$, для квадратной пластины с варьируемой стороной r и неварьируемой длиной центральной трещины – $n = 1,5876$. В сложных случаях коэффициент n определяется методом конечных элементов или экспериментально.

Система, нагружающая максимально деформированный объем, представляет собой часть образца без максимально деформированного объема с учетом жесткости его внешнего закрепления. Жесткость нагружающей системы определяется в предположении, что она не меняется в процессе деформирования, т.е. неупругие деформации системы значительно меньше неупругих деформаций максимально деформированного объема. Суммарная жесткость находится по формулам (1), если образец отличается от трубопровода только варьируемым размером r , или путем суммирования с использованием данных расчета жесткости методом конечных элементов. В качестве варьируемого размера использовали длину утолщенной части трубы.

Обсуждение результатов. На рис. 4 представлены результаты испытаний трубчатых образцов с длиной утолщенной части 45 и 55 мм.

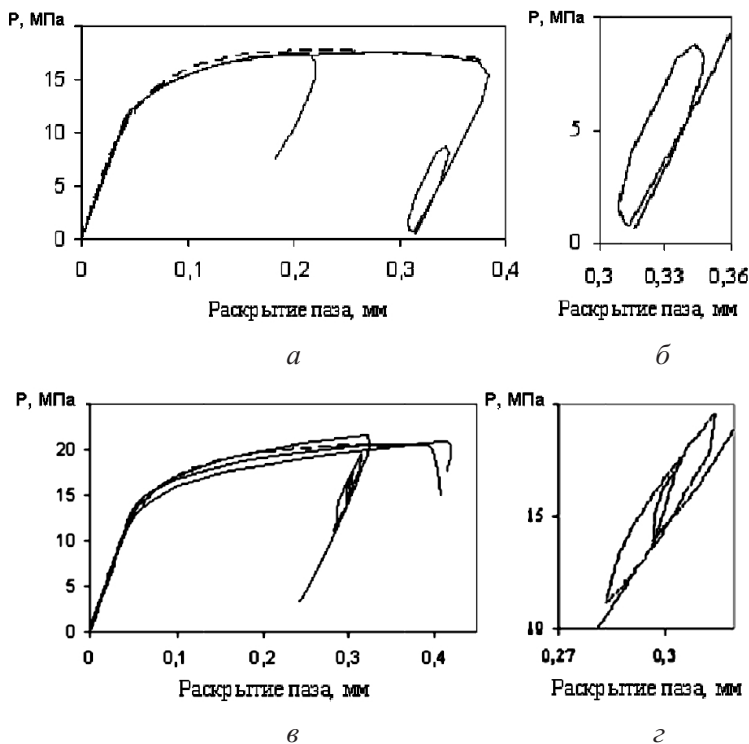


Рис. 4. Характер поведения паза при изменении давления в трубчатых образцах с длиной утолщенной части 45 (а, б) и 55 мм (в, г): а, в – раскрытие паза, б, г – закрытие и повторное открытие паза. (Сплошные линии – результаты испытаний, штриховые – расчет по формуле (1).)

Трещины в трубе с длиной утолщенной части 45 и 55 мм образовались при давлении 17,5, 17,68 МПа и 20,6, 20,8 и 21,6 МПа соответственно. Две трубы (по одной из каждой партии после частичной разгрузки и закрытия трещины) нагружались до повторного раскрытия трещины, что видно по петлям на ниспадающих участках кривых (рис. 4,б,г). Трещина в трубе

(первая партия), имеющая длину утолщенной части 45 мм и меньшую жесткость в осевом направлении (рис. 4,б), закрывалась при меньшем давлении (0,79 МПа), чем трещина в более жесткой трубе (13,9 МПа) – рис. 4,з. Характер деформирования труб с длиной утолщенной части 45 и 55 мм на ниспадающих участках при повторном открытии трещин аналогичен. При длине 45 мм повторное открытие трещины происходило при $P = 8,79$ МПа, при длине 55 мм – $P = 19,5$ МПа (рис. 4,з), причем в последнем случае дважды происходило закрытие и открытие трещины.

Полученные диаграммы деформирования паза в трубе использовались для определения параметра n и параметров функций $f(u_0)$ и $\tilde{f}(u_0)$ в уравнениях (1). Функция $f(u_0)$ выбиралась в виде $f(u_0) = k \frac{u_0^4}{(u_0^2 + \alpha^2)^2}$.

Интеграл функции $\tilde{f}(u_0)$ имеет вид

$$\tilde{f}(u_0) = k \left[u_0 + \frac{\alpha^2 u_0}{2(u_0^2 + \alpha^2)} - \frac{3\alpha}{2} \arctg \left(\frac{u_0^2 + \alpha^2}{\alpha} \right) \right],$$

где $n = 1,28$; $k = 0,87$; $\alpha = 0,032$.

С использованием уравнений (1) выполнен прогноз несущей способности трубопровода с длиной утолщенной части 75 мм и определен граничный размер утолщенной части (37 мм), при котором разрушение трубопровода на полное сечение и образование течи перед разрушением равновероятно. Экстраполяция результатов испытания образцов с длиной утолщенной части 45 и 55 мм показывает, что несущая способность образца с длиной 75 мм составляет 27,8 МПа, в то время как прогноз для этого образца по уравнениям (1) дает меньшее значение (22,8 МПа). Прогноз несущей способности для образца с длиной утолщенной части 37 мм при равновероятном разрушении по уравнениям (1) дает значение 13,9 МПа.

Необходимо отметить, что в данном случае толщина стенки образца по кольцевому пазу выбрана равной 0,5 мм, исходя из возможности моделирования разрушения трубчатого образца на полное сечение (распространение трещины за пределы утолщенной части).

В результате проведенных исследований было установлено, что для коррекции жесткости участка трубопровода с выявленными дефектами необходимо, чтобы значения суммы жесткостей максимально деформированного объема и жесткости участка трубопровода, которая этот объем деформирует в осевом и окружном направлении, превышали таковые в радиальном направлении в 1,5–2,0 раза, что значительно снижает вероятность разрушения трубопровода на полное сечение.

Разработанная методика и полученные экспериментальные данные могут быть использованы для ремонта трубопроводов в различных отраслях промышленности с целью снижения последствий их аварийного повреждения путем восстановления механической прочности.

Известные методы определения разрушения трубопровода на полное сечение требуют использования большего количества экспериментальных данных, чем предлагаемая методика [3–5].

Выводы

1. Разработанные оригинальные методики и экспериментальные стендовые средства их реализации обеспечивают моделирование широкого спектра эксплуатационных условий нагружения элементов трубопроводов.

2. Получены данные, позволяющие корректировать развитие трещин в радиальном и осевом направлении в элементах трубопроводов путем изменения жесткости в одном из них.

3. Использование полученных экспериментальных и расчетных данных позволяет контролировать раскрытие, закрытие и повторное раскрытие трещин, что перспективно для решения проблем предотвращения разрушения трубопровода на полное сечение.

Резюме

Розроблено методи експериментального моделювання еквівалентних експлуатаційних режимів навантаження елементів труб у базових діапазонах зміни параметрів робочого середовища (тиск, температура, агрегатний стан). Створені експериментальна стендова та розрахунково-експериментальна бази дозволили провести дослідження напружено-деформованого стану і кінетики руйнування елементів труб в умовах, які моделюють спектри термомеханічного навантаження, з метою діагностики реального стану трубопроводів і оцінки залишкового ресурсу за показниками функціональної придатності.

1. *Орныяк И. В., Власенко Н. И., Козлов В. Я. и др.* Результаты испытаний трубных образцов с надрезами в рамках экспериментального обоснования явления “течь перед разрушением” // Пробл. прочности. – 2012. – № 5. – С. 135 – 149.
2. *Барило В. Г.* Влияние геометрического фактора на несущую способность деталей машин // Вибрации в технике и технологиях. – 2004. – № 6 (38). – С. 114 – 118.
3. *Нормы* расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. – М.: Металлургия, 1989. – 525 с.
4. *Гетман А. Ф.* Концепция безопасности “течь перед разрушением” для сосудов и трубопроводов давления АС. – М.: Энергоиздат, 1999. – 258 с.
5. *Даффи А., Эйбер Р., Макси У.* Практические примеры расчета на сопротивление хрупкому разрушению трубопроводов под давлением // Разрушение. – Т. 5. Расчет конструкций на хрупкую прочность. – М.: Машиностроение, 1977. – С. 146 – 210.

Поступила 03. 10. 2012