

Анализ методов оценки прочности цилиндрических конструкций, работающих в условиях нагружения внутренним давлением, с локальными поверхностными дефектами

В. В. Мутас, М. А. Нетребский, М. Д. Рабкина

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев, Украина

Обсуждаются подходы к оценке прочности цилиндрических конструкций, работающих в условиях нагружения внутренним давлением, осевыми и изгибными напряжениями. Наличие определенных видов и размеров дефектов стенок цилиндрических конструкций, нагружаемых внутренним давлением, не снижает их статическую прочность. Основными параметрами, влияющими на прочность конструкции, являются длина дефекта вдоль оси, глубина утонения стенки и пластичность материала.

Ключевые слова: статическая прочность, цилиндрические конструкции, внутреннее давление, осевые и изгибные напряжения.

Выполненный обзор существующих методов оценки прочности цилиндрических конструкций, работающих в условиях нагружения внутренним давлением, осевыми и изгибными напряжениями, позволяет определить основные подходы к решению рассматриваемой задачи. Заметим, что большинство подходов создавалось независимо друг от друга, в разные годы и разными исследователями.

Впервые решением этой задачи начали заниматься в 60-х годах 20 ст. Разработке одного из первых нормативных документов ANSI/ASME B31G-1984 предшествовала исследовательская работа (Columbus Laboratory of the Battelle Memorial Institute, Ohio, USA), опубликованная в 1971 г. Этот документ был одобрен Американским обществом инженеров-механиков (ASME) и затем Институтом Американских национальных стандартов (ANSI).

Работы в этом направлении проводятся постоянно. В частности, в 1988 г. начались исследования по оценке прочности емкостей и сосудов давления с эрозионно-коррозионными дефектами. В результате был разработан раздел N-480 стандарта ASME B31G [1]. В 2003 г. закончен совместный проект, финансируемый 15 международными нефтяными и газовыми компаниями, для создания единого руководства по оценке дефектов в трубопроводах. Руководство представляет “наилучшие”, самые современные методы для оценки дефектов трубопроводов в виде простого и удобного для пользователя пособия, а также рекомендации по их применению. Оно поддерживается и обновляется в рамках совместного промышленного проекта [2].

Нет необходимости перечислять все участвующие в решении проблемы организации, а также методы оценки прочности, которые были ими разработаны, поскольку работы проводились в одном и том же направлении и на основе одних и тех же принципов и подходов [3, 4].

Следует, однако, отметить, что на начальной стадии исследований разработчики проявляли большую осторожность, и в методику закладывались

более консервативные критерии и коэффициенты. С этой точки зрения первые методики и нормативные документы (в частности, ASME B31G SHELL 92) применялись для оценки дефектов независимо от вязкости материала труб (так называемые “старые” методы). Методики, разработанные позднее, позволяют оценивать дефекты при изменении вязкости от средней до высокой (например, “новые” DNV-RP-F101 (LPC), PCORRC, SAFE, CPS и др.).

В качестве исходной зависимости, используемой во всех методиках, для оценки прочности конструкций с дефектами принято уравнение NG-18, основанное на учете предела текучести, коэффициента Фоллиаса и формы (профиля) дефекта:

$$\sigma_{\theta} = \bar{\sigma} \left[\frac{1 - \frac{d}{t}}{1 - \frac{d}{tM}} \right], \quad (1)$$

и только в методе PCORRC используется уравнение, которое отличается от формулы (1):

$$\sigma_{\theta} = \bar{\sigma} \left\{ 1 - \left(\frac{d}{t} \right) \left[1 - \exp \left[-0,16 \left(\frac{2c}{\sqrt{Rt}} \right) \left(1 - \frac{d}{t} \right)^{-0,5} \right] \right] \right\}, \quad (1a)$$

где σ_{θ} – кольцевое напряжение; $\bar{\sigma}$ – предел текучести; d – глубина утонения стенки; t – толщина стенки трубы; M – коэффициент Фоллиаса; $2c$ – длина утонения стенки вдоль оси трубы; R – радиус трубы.

Уравнения (1) и (1a) получены эмпирическим путем на основании анализа большого количества экспериментов и расчетов по методу конечных элементов.

На рис. 1 представлены предельные значения размеров допустимых дефектов, которые не приводят к снижению прочности конструкции согласно новым (верхние кривые – DNV-RP-F101, PCORRC) и старым (нижние кривые – Modified-B31G, SHELL92, ASME B31G) методикам. Видно, что предельные размеры дефектов зависят от марки стали, из которой изготовлены трубы. В данном случае – это стали X42 и X65. Расхождение в результатах оценки с помощью используемых методов обусловлено несовершенством идеализации формы (прямоугольная, параболическая или другая) и неточностью определения размеров коррозионного износа. Поэтому принимаемые длина и глубина дефекта не гарантируют получения точной оценки влияния дефекта на прочность конструкции. Результаты расчетов по старым методам дают больший разброс в сравнении с экспериментальными данными.

Известные результаты исследований показывают, что разработанные методики позволяют оценивать прочность конструкций с такими дефектами, как коррозия, задиры, вмятины, вмятины на швах, вмятины с задирами, вмятины в сочетании с другими дефектами, дефекты, возникшие при изготовлении, трещины, а также бездефектных труб. При этом может быть рассмотрено нагружение внутренним (внешним) давлением; осевой нагрузкой и изгибающим моментом.

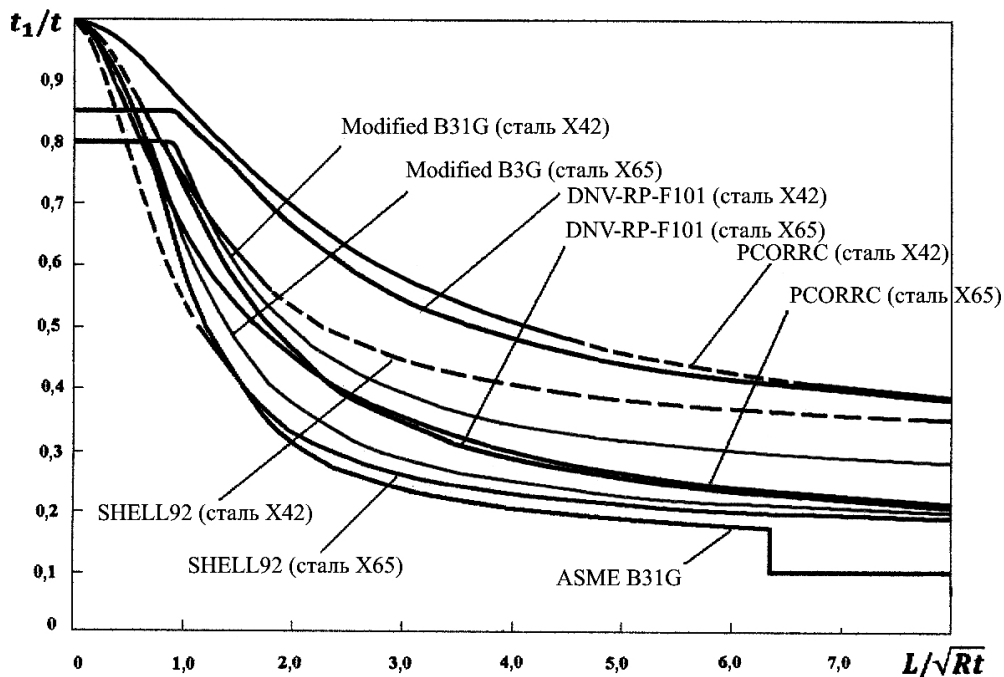


Рис. 1. Методы расчета сопротивления разрыву зоны коррозии.

Влияние данных нагрузок изучено как при статическом, так и циклическом режимах. Следует отметить, что аналитические исследования в этом направлении подтверждаются многочисленными экспериментальными работами (разрушено несколько сотен сосудов и труб с поверхностными дефектами). Исследования проводились на сосудах и трубах, имеющих следующие размеры и механические характеристики: диаметр изделий 273...914 мм; толщина стенки 4,57...22,1 мм; предел текучести 196...515 МПа; предел прочности 277...658 МПа; глубина дефектов $d/t = 0,25...0,97$; длина дефектов 19,35...3048 мм.

Существенный вклад в решение проблемы оценки прочности цилиндрических конструкций с поверхностными эрозивно-коррозионными дефектами внесли ученые и специалисты НАН Украины. Еще в середине 90-х годов 20 ст. в Институте электросварки им. Е. О. Патона (ИЭС) была разработана методика, основанная на использовании гипотезы о том, что влияние на прочность поверхностного утонения, не превышающего по длине вдоль оси цилиндра $8\sqrt{Rt}$, равноценно влиянию на прочность сквозного кругового отверстия в стенке при равенстве площадей потерь металла в продольных сечениях данного поверхностного утонения и кругового отверстия. Если степень утонения стенки такова, что в продольном сечении его площадь не превышает $0,35t\sqrt{Rt}$, прочность конструкции не снижается. Методика была одобрена специалистами Киевэнерго и Южноукраинской АЭС [5–7].

В методике не учитываются появление сквозного отверстия в стенке конструкции и утонение стенки, превышающее в продольном направлении

величину $8\sqrt{Rt}$. Поэтому допустимое утонение стенки определяется следующими отношениями между длиной и глубиной дефекта:

$$0 \leq L \leq 0,5\sqrt{Rt}, \quad d = 0,7t;$$

$$0,5\sqrt{Rt} \leq L \leq 4\sqrt{Rt}, \quad d = 0,35t\sqrt{Rt}/L;$$

$$4\sqrt{Rt} \leq L \leq 8\sqrt{Rt}, \quad d = 0,18t - 0,0225tL/\sqrt{Rt},$$

где L – длина дефекта (зоны утонения) вдоль оси; R – радиус цилиндрической части; t – расчетная толщина стенки.

Зависимость допустимых отношений размеров поверхностных дефектов стенки представлена на рис. 2. При длине утонения стенки вдоль оси цилиндра, превышающей $8\sqrt{Rt}$, расчетной толщиной стенки следует считать толщину в месте утонения. При этом несущая способность конструкции определяется зависимостью

$$P_p = \frac{2\sigma_b t}{R} \frac{\sqrt{2Rt}}{d_y + 1,75\sqrt{2Rt}}, \quad (2)$$

где P_p – давление разрушения; σ_b – предел прочности; d_y – диаметр кругового отверстия в стенке, эквивалентного по площади дефекту.

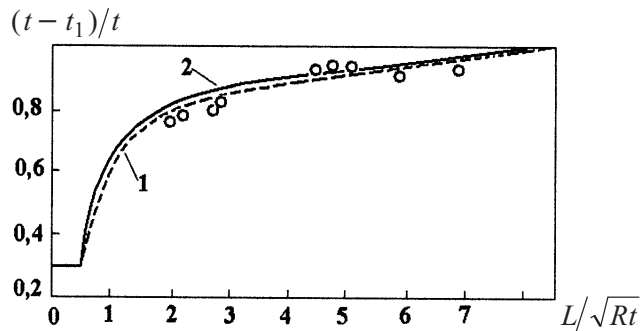


Рис. 2. Экспериментальное (1) и расчетное (2) сопоставление предельных размеров зоны эрозионно-коррозионного износа по результатам испытаний труб, в которых не зафиксировано снижение прочности.

Методика, позволяющая оценивать прочность цилиндрических конструкций как с трещинами, так и с поверхностными пологими утонениями стенки, предложена в Институте электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины В. С. Гиренко и В. В. Мутасом. Методика основана на принципах механики разрушения. При этом подходе дефект представляется в виде продольной трещины, к берегам которой кроме растягивающих приложены сжимающие кольцевые напряжения [8, 9].

Расчетный анализ позволяет установить зависимость для определения коэффициента ослабления конструкции в следующем виде:

$$K_f = 1 - \frac{t_1}{t} \left\{ \frac{\alpha LM^2}{\left[w + 2t \left(1 - \frac{t_1}{t} \right) \right] \left(1 - \frac{t_1}{t} \right) + \alpha LM^2} \right\}, \quad (3)$$

где K_f – коэффициент ослабления конструкции; t_1 – глубина дефекта; w – ширина дефекта, т.е. размер его в кольцевом направлении; M – поправка Фоллиаса; α – коэффициент, устанавливающий зависимость между прочностными и деформационными характеристиками материала.

В Институте проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины также был разработан подход для оценки прочности цилиндрических конструкций с поверхностными дефектами [10] с помощью коэффициента

$$\alpha = \frac{1 + 2\lambda^2 \tau_0 (1 - \tau_0)}{1 + 2\lambda^2 (1 - \tau_0)}, \quad (4)$$

где λ – безразмерная длина дефекта, $\lambda = \frac{l_{кр}}{2\sqrt{Rt}}$; τ_0 – безразмерная глубина дефекта, $\tau_0 = 1 - t_{кр}/t$; $l_{кр}$ – критическая длина дефекта вдоль оси цилиндра; $t_{кр}$ – критическая глубина дефекта.

Анализ выражений (1)–(4) позволяет обнаружить интересную особенность: согласно зависимостям (1), (3) и (4) снижения прочности конструкции не происходит только в случае если дефект отсутствует, в то время как зависимость (2) допускает 100%-ную прочность при наличии дефекта (на рис. 2 кривая 2).

Результаты экспериментальных исследований показывают, что наличие дефекта в виде утонения стенки не приводит к снижению прочности конструкции, если оно не превышает определенной величины по глубине и длине вдоль оси конструкции (рис. 1 и 2). Сравнение расчетных значений, полученных с помощью зависимостей (1), (3) и (4), с экспериментальными свидетельствует, что они, как правило, ниже.

Интересное свойство цилиндрической конструкции сохранять 100%-ную прочность при наличии дефекта в виде утонения стенки реализуется в результате изменения геометрии конструкции в месте дефекта и связанного с ним локального изменения напряженно-деформированного состояния. Рассмотрим это более подробно.

В месте утонения и вокруг него при нагружении возникает поле повышенных напряжений. По мере увеличения нагрузки это приводит к пластическим деформациям в зоне дефекта, выпучиванию металла, появлению квазисферического участка и, как следствие, перераспределению напряжений, а именно: напряжений в кольцевом направлении цилиндрических конструкций в зоне утонения. Для того чтобы этот эффект проявился и не привел к разрушению конструкции, необходимо, во-первых, иметь металл с достаточными пластическими свойствами, во-вторых, провести “опрессовку” внутренним давлением при соблюдении благоприятных условий, предотвраща-

ющих появление нежелательных последствий, в частности микротрещин, и обеспечивающих релаксацию повышенных напряжений в зоне дефекта.

Выводы

1. Наличие определенных видов и размеров дефектов стенок цилиндрических конструкций, нагружаемых внутренним давлением, приводит к снижению их статической прочности.

2. Основными параметрами, влияющими на прочность конструкции, являются длина дефекта (утонения) вдоль оси, глубина утонения стенки и пластичность материала.

Резюме

Обговорюються підходи до оцінки міцності циліндричних конструкцій, що працюють в умовах навантаження внутрішнім тиском, осьовими напруженнями та напруженнями згину. Наявність певних видів і розмірів дефектів стінок циліндричних конструкцій, навантажених внутрішнім тиском, не знижує їх статичну міцність. Основними параметрами, що впливають на міцність конструкції, є довжина дефекту вздовж осі, глибина стоншення стінки і пластичність матеріалу.

1. *Case N-480*. Cases of ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Approval Date: May 10, 1990, Examination Requirements for Pipe Wall Thinning Due to Single Phase Erosion and Corrosion, Section XI, Division 1. – 1990. – P. 787 – 788.
2. *D31G-1991 (R2004)*. Manual for Determining Remaining Strength of Corroded Pipelines: Supplement to B31 Code-Pressure Piping. – New York: ASME, 1999. – 58 p.
3. *Recommended Practice, DNV-RP-F101*. Corroded Pipelines / Ed. O. Bjornoy. – Novik: Det Norske Veritas, 2004. – 42 p.
4. *Cosham A. and Hopkins P.* The assessment of corrosion in pipelines – guidance in the pipeline defect assessment manual (PDAM) // Pipeline Pigging and Integrity Management Conference (May 17–18, 2004). – Amsterdam, 2004. – P. 1 – 3.
5. *Гарф Э. Ф., Нетребский М. А.* Оценка прочности и ресурса трубопроводов с эрозионно-коррозионными повреждениями // Автомат. сварка. – 2000. – № 9-10. – С. 15 – 20.
6. *Гарф Э. Ф., Нетребский М. А., Малахов И. В. и др.* Прочность трубопроводов с эрозионно-коррозионными повреждениями // Техн. диагностика и неразрушающий контроль. – 1999. – № 1. – С. 44 – 49.
7. *Гарф Э. Ф., Недосека А. Я., Нетребский М. А. и др.* Оценка прочности трубопроводов, имеющих значительный эрозионно-коррозионный износ // Там же. – С. 58 – 64.
8. *Гиренко В. С., Мутас В. В., Гиренко С. В.* Прочность трубопроводов и сосудов с коррозионными выемками // Там же. – 2000. – № 3. – С. 10 – 17.

9. Гиренко В. С., Мутас В. В., Гиренко С. В. Прочность трубопроводов и сосудов с трещиноподобными дефектами в условиях вязкого состояния конструкционных материалов // Там же. – 2001. – № 4. – С. 9 – 13.
10. Ориняк І. В., Бородій М. В., Батура А. С. та ін. Методика проведення ризик-аналізу магістральних трубопроводів з метою декларування їх безпеки та подовження терміну експлуатації // Цільова комплексна програма НАН України “Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин”. – Київ: Ін-т електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, 2009. – С. 22 – 28.

Поступила 23. 05. 2011