

**АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ПРОЧНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ  
В ЗОНАХ КОНЦЕНТРАЦИЙ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ**

Cherepanov A.P.

**ANALYSIS OF METHODS FOR ASSESSING THE STRENGTH OF STRUCTURES  
IN AREAS OF CONCENTRATION OF MECHANICAL STRESSES**

**Аннотация.** Рассмотрен анализ методов оценки прочности в зонах концентраций механических напряжений в конструкциях с дефектами. В качестве примеров приведены соединения патрубка с обечайкой сварным швом и технологического трубопровода со сквозной тещиной в зоне расслоения металла стенки. Показано, что в основе расчетов конструкций с дефектами лежит определение вида напряженного состояния, возникающего под нагрузкой, которое принято характеризовать величиной коэффициента жёсткости. Анализ исследования фрагмента технологического трубопровода в зоне разрушения стенки показал, что разрыв произошел в зоне наибольшего утонения стенки, вызванного расслоением металла стенки, а причиной разрушения стало превышение внутреннего давления.

**Ключевые слова:** разрушение, трещина, штуцер, тензор напряжений, коэффициент жесткости.

**Abstract.** The analysis of methods for assessing strength in areas of mechanical stress concentrations in structures with defects is considered. As examples, the connections of a pipe with a welded shell and a technological pipeline with a through crack in the metal stratification zone delamination are given. It is shown that the calculation of structures with defects is based on the determination of the type of stress state that occurs under load, which is usually characterized by the value of the stiffness coefficient. Analysis of the study of a fragment of a technological pipeline in the zone of wall destruction showed that the rupture occurred in the zone of the greatest wall thinning caused by the delamination of the wall metal, and the cause of the destruction was an excess of internal pressure.

**Keywords:** fracture, crack, fitting, stress tensor, stiffness coefficient.

Методам оценки прочности конструкций в зонах концентраций механических напряжений, в частности, конструкциям, содержащим тонкостенные оболочки, посвящено множество научных работ, в частности [1, 2, 3, 4]. Одной из основных задач при проектировании является обеспечение равнопрочности конструктивных элементов в зонах сопряжения, например, врезки штуцера в обечайку, состоящее из нескольких отдельных деталей и сварных швов, включая укрепляющее (накладное) кольцо, соединенные между собой сварными швами. Особенно в процессе эксплуатации, когда зоны сопряжения имеют различную степень износа, происходит увеличение напряженного состояния (НС). Решению задачи оценки объемного напряженного состояния конструктивных элементов посвящены научные работы [5, 6, 7].

Рассмотрим некоторые конструктивные элементы, имеющие разрушения в процессе эксплуатации. Фрагмент врезки патрубка в обечайку со сквозной тещиной показан на рисунке 1. Трещина обнаружена при пропуске продукта, а затем подтверждена цветным методом дефектоскопии зоны сварного шва. Анализом

установлено, что разрушение произошло при превышении радиальной нагрузки на штуцер в зоне наибольшей концентрации напряжения в сварном шве, в результате чего и образовалась трещина.



Рисунок 1 - Фрагмент врезки патрубка в обечайку со сквозной трещиной

Натурные эксперименты на моделях отдельных элементов конструкций до настоящего времени проводились, например, по оценке НДС зон патрубков [8, 9], при этом использовались преимущественно модели из полимерных материалов. Такие модели хорошо демонстрируют процесс разрушения, но не дают возможности оценки реального НДС штуцерного узла. Инженерные методики расчета напряженного состояния (НС) элементов сосудов с патрубками, разработаны в зависимости от их геометрических размеров, давления и применяемых материалов обечаек и патрубков [10].

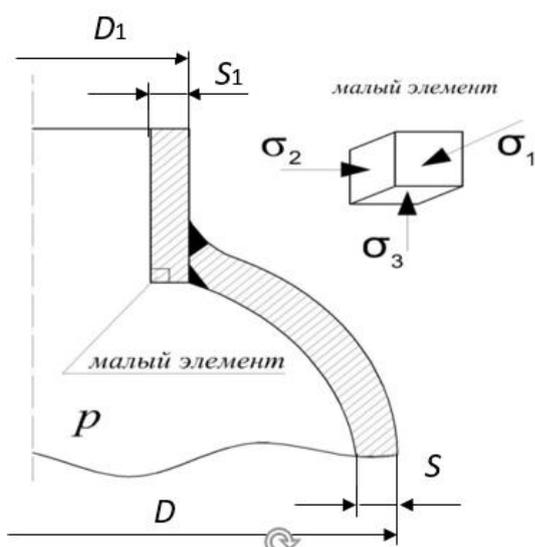


Рисунок 2 - Поперечное сечение врезки патрубка в корпус сосуда

Возможно, путем исследования НДС и определения фактических напряжений перед пуском в эксплуатацию, вероятность разрушения сварного шва в процессе эксплуатации была бы предотвращена, однако исследования прочности зоны врезки патрубка не проводились.

Теоретические исследования упругого состояния осесимметричного соединения обечайки диаметром  $D$  и толщиной  $S$  с цилиндрическим патрубком диаметром  $D_1$  и толщиной  $S_1$ , показанное на рисунке 2 в виде поперечного сечения врезки патрубка в обечайку, изложены в работах [11, 12, 13, 14]. В основе этих работ лежит определение вида НДС, возникающего в некоторых точках конструкции под нагрузкой. Врезки патрубка. Во врезке патрубка, в частности, НДС наблюдается в малом элементе на внутренней кромке самого патрубка, которое характеризуют величиной коэффициента жёсткости, равного отношению первого инварианта тензора напряжений ко второму [15], определяемому формулой:

$$g = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_i}, \quad (1)$$

где  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – главные напряжения, возникающие в точке наблюдения;  
 $\sigma_i$  – интенсивность напряжений, определяемая формулой:

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2}. \quad (2)$$

Экспериментальное исследование НС [13] показало, что увеличение коэффициента жёсткости в зависимости от вида НС приводит к смещению очага разрушения от кромки патрубка. Это происходит независимо от уровня напряжений на кромки патрубка, а для конструкции в целом не зависит от уровня максимальных или минимальных напряжений в этой точке. Существенно, что такое смещение может происходить как в случае циклического характера нагружения конструкции, так и в случае её квазистатического разрушения [16].

Численное моделирование значения (1) выражается коэффициентом концентрации напряжений и определяется формулой:

$$K_\sigma = \frac{\sigma_i^{max}}{\sigma_i^{nom}}, \quad (3)$$

где  $\sigma_i^{max}$  – интенсивность напряжений в точке наблюдения рабочей зоны образца;

$\sigma_i^{nom}$  – номинальные эквивалентные напряжения.

Такое НС характеризует процесс деформирования элементов высоконагруженных конструкций, в частности, кромок отверстий в стенках сосудов высокого давления, в посадках с натягом, при контактном силовом взаимодействии элементов конструкций.

При проектных толщинах стенок в зоне сопряжения патрубка с обечайкой НС определяется условием [17]:

$$\sigma_{\text{ЭКВИСХ}} = f(D_c; S; S_1; S_2; d_c; P). \quad (4)$$

При фактических толщинах стенок НС зоны сопряжения патрубка с обечайкой определяется условием [17]:

$$\sigma_{\text{ЭКВ Ф}} = f(D_c; S_k; S_{1k}; S_{2k}; d_c; P), \quad (5)$$

где  $\sigma_{\text{ЭКВИСХ}}$ ,  $\sigma_{\text{ЭКВ Ф}}$  – эквивалентные напряжения при исходных и фактических толщинах стенок штуцерного узла;

$S$ ;  $S_1$ ;  $S_2$  – проектные толщины стенок корпуса, патрубка и укрепляющего кольца;

$S_k$ ;  $S_{1k}$ ;  $S_{2k}$  – фактические толщины стенок корпуса, патрубка и укрепляющего кольца;

$D_c$  и  $d_c$  – средние диаметры корпуса и патрубка в месте их сопряжения;

$P$  – нагрузка от давления, внешних усилий и моментов.

Сопряжение патрубка с обечайкой характеризуется НС согласно (4) и (5) толщинами стенок корпуса, патрубка и укрепляющего кольца (рисунок 2). При их износе осевые, окружные и меридиональные напряжения перераспределяются, а коэффициенты концентрации увеличиваются. Скорость изменения НС зоны сопряжения элементов за период эксплуатации обечайки определяют формулой [18]:

$$K_{\text{НС}} = \frac{\sigma_{\text{ЭКВ Ф}} - \sigma_{\text{ЭКВ ИСХ}}}{T_3}, \quad (6)$$

где  $T_3$  – срок эксплуатации штуцерного узла.

На практике прочность штуцерных узлов рассчитывается согласно [1, 10]. В отдельных случаях с применением пакетов прикладных программ расчета методом конечных элементов [19].



Рисунок 2 - Фрагмент технологического трубопровода в зоне разрушения стенки



Рисунок 3 – Поперечное сечение зоны разрушения стенки

Рассмотрим фрагмент технологического трубопровода с трещиной в зоне расслоения металла стенки, показанный на рисунке 2. Трубопровод диаметром 250 мм находился на открытой эстакаде и не эксплуатировался в течение ряда лет, поэтому перед его запуском в работу, проводилась подготовка, одним из этапов которой было пропаривание внутренней поверхности, в результате которой, вероятно и произошло разрушение стенки. Поперечное сечение стенки в зоне разрушения показано на рисунке 3.

Разрушенный участок оказался с трещиной, минимальная толщина стенки после разрушения составила не более 2 мм. По расчету она выдерживала давление 0,5 МПа, следовательно, разрушение произошло при повышении давления и разности температур изнутри и снаружи стенки. Металлографические исследования фрагмента также показали, что разрыв произошел в зоне наибольшего утонения стенки, вызванного расслоением металла стенки.

Появление подобных дефектов может быть вызвано множеством причин. Одной из них явилось следствием

постепенного развития металлургического дефекта, появившегося на стадии изготовления трубы с постепенным отслаиванием стенки в зоне дефекта. На пустом трубопроводе постепенный рост трещины и расслоение стенки могло быть вызвано многократным повторением конденсации влаги, скапливавшейся в кратере и ее замерзания при низкой температуре. Выпучина на разрушенном участке и разрывы трубы в разных направлениях свидетельствует о том, что ее разрушение произошло под воздействием газовой среды в короткий промежуток времени. Если бы разрушение происходило без давления, долом стенки образовался постепенно, то выпучивание наружу не образовалось. Учитывая, что рас-

стояние между подвесками составляло примерно 4 метра, не исключается влияние изгибающего момента в зоне прогиба трубы и образование плоского НС в зоне трещины, а долом стенки вызван внутренним давлением. В то же время расчет НС по моментной теории оболочек был бы недостаточно справедлив, поскольку толщина стенки вне зоны разрушения составляла не менее 8 мм, а на других участках, в том числе и на изогнутых, где напряжения, как правило, выше, чем на прямых участках, разрушение не произошло. В результате анализа выявлено, что разрушение стенки трубы произошло при проведении очистки внутренней полости трубопровода с помощью пара. Однако, основными причинами разрушения трубопровода являются дефекты, своевременно не выявленные при изготовлении, монтаже и эксплуатации из-за недостаточности объемов технического контроля. Расслоение внутренней поверхности трубопровода большой протяженности, малого диаметра и загрязнения внутренней полости возможно, например, ультразвуковым сканированием.

В заключение можно сделать следующий вывод, что проведение натуральных экспериментов по исследованию НС и применение для оценки подобных дефектов затруднено длительностью развития деградиционных процессов износа и старения, поэтому экспериментальные исследования в данном случае слишком дороги, требуют значительного времени, их проведение связано с большими материальными издержками, особенно для единичных трубопроводов. Их НС характеризуется повышенным уровнем напряжений, возникающих вблизи имеющих конструктивных неоднородностей (отверстий, выступов, пазов и т. п.), которые создают сложное НС, поэтому для проведения оценочных экспериментов моделей предпочтительнее компьютерное моделирование с использованием математических моделей изучаемых объектов, процессов или самих трубопроводов, которые в эксплуатационных условиях, как правило, подвергаются комплексу нагрузок [16, 19].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. (ПНАЭ Г-7-002-86). //Госатомэнергондзор СССР. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 525 с.
2. Нормы американского общества инженеров-механиков для котлов и сосудов высокого давления. Элементы ядерных энергетических установок. Разд. 3. – М.: Изд-во ЦНИИАтоминформ, 1974. – 85 с. (пер с английского).
3. **Москвичев В.В.** Основы конструкционной прочности технических систем и инженерных сооружений: в 3 ч. / В.В. Москвичев; Отв. ред. Н.А. Махутов. Ч. 2. Трещиностойкость и механические свойства конструкционных материалов технических систем. – Новосибирск: Наука, 2002. – 334 с.
4. Модельные исследования и натурная тензометрия энергетических реакторов / Н.А. Махутов, К.В. Фролов, Ю.Г. Драгунов и др. М.: Наука, 2001. – 293 с. (Серия «Исследование напряжений и прочности ядерных реакторов»).
5. Моделирование прочности и разрушения несущих конструкций технических систем/ Доронин С.В., Лепихин А.М., Москвичев В.В. и Шокин Ю.И. Новосибирск: Наука, 2005. – 249 с.

6. **Хенли Э., Кумамото Дж.** Надежность технических систем и оценка риска. – М.: Машиностроение, 1988. – 216 с.
7. **Махутов Н.А., Фролов К.В., Стекольников В.В.** и др. Экспериментальные исследования деформаций и напряжений в водо–водяных энергетических реакторах. – М.: Наука, 1990. – 296 с.
8. **Махутов, Н.А.** Сопротивление элементов конструкций хрупкому разрушению / Н.А. Махутов. – М.: Машиностроение, 1973. – 200 с.
9. **Федотова С.И., Цвик Л.Б., Борсук Е.Г., Мурашев Б.Г.** Прочность сферических днищ с патрубками, имеющими различную степень укрепления // Исследования в области прочности химического оборудования: Сб. научн. трудов. – М.: НИИхиммаш. – 1990. – С. 71–76.
10. ГОСТ 34233.3-2017 Нормы и методы расчета на прочность. Укрепление отверстий в обечайках и днищах при внутреннем и наружном давлениях. Расчет на прочность обечаек и днищ при внешних статических нагрузках на штуцер.
11. **Махутов Н.А.** Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность: В 2 ч. / Н.А. Махутов. – Новосибирск: Наука, 2005. – Ч. 1: Критерии прочности и ресурса – 494 с.
12. **Цвик Л.Б.** Объемное напряженное состояние и прочность однослойных и многослойных сосудов высокого давления с патрубками. Автореферат на соискание ученой степени д.т.н. Красноярск. – 2001 – 37 с.
13. **Цвик Л.Б., Пимштейн П.Г., Борсук Е.Г.** Экспериментальное исследование напряжённого состояния многослойного цилиндра с монолитным вводом // Проблемы прочности. – 1978. С. 74 – 77.
14. **Цвик Л.Б., Федотова С.И. Щеглов Б.А.** и др. Численный анализ упругопластического деформирования днищ с горловиной при опрессовке сосудов давления // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 1994. – № 1. – С. 37–42.
15. **Смирнов–Аляев Г.А., Цикидовский В.П.** Экспериментальные исследования в обработке металлов давлением. М., Машиностроение, 1972. С.
16. **Цвик Л.Б., Шапова М.В., Храменок М.А.** Напряженное состояние и усталостная прочность осесимметричных патрубковых зон сосудов высокого давления // Вестник машиностроения. – 2010, - № 2. – С. 18 – 24.
17. **Черепанов А.П.** Прогнозирование ресурса технических устройств опасных производств – Ангарск: Ангарский государственный технический университет, 2020. – 275 с. Табл. 14, Ил. 49. Библиогр.: 337 назв. ISBN 5-02-032494-7.
18. Оценка работоспособности и остаточного ресурса тонкостенных сварных сосудов химически опасных промышленных объектов / А.А. Шаталов, М.П. Закревский, А.М. Лепихин и др. // Безопасность руда в промышленности. – 2003. – № 7. – С. 34–36.
19. **Шелофаст В.В.** Основы проектирования машин. – М.: Изд–во АПМ, 2004. 472 с.