

ПРОДЛЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ СОСУДОВ ДАВЛЕНИЯ ИЗ ДВУХСЛОЙНОЙ СТАЛИ ПОСЛЕ ВЫРАБОТКИ РАСЧЕТНОГО РЕСУРСА СВАРНЫХ ШТУЦЕРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Миронов Анатолий Алексеевич

Заведующий кафедрой «Аэрогидродинамика, прочность машин и сопротивление материалов» ФГБОУ ВПО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», г. Нижний Новгород, доктор технических наук, доцент

Горохов Сергей Александрович

Эксперт отдела химического оборудования ООО «Нижегородский центр технической диагностики, экспертизы и сертификации», г. Нижний Новгород

Панькин Евгений Александрович

Начальник отдела химического оборудования ООО «Нижегородский центр технической диагностики, экспертизы и сертификации», г. Нижний Новгород

Святошенко Евгений Леонидович

Эксперт отдела химического оборудования ООО «Нижегородский центр технической диагностики, экспертизы и сертификации», г. Нижний Новгород

В химической промышленности в технологических процессах с агрессивными средами и при повышенных требованиях к чистоте продукта широко используются сосуды и аппараты, выполненные из двухслойной стали. В условиях циклического нагружения ресурс работы сосудов и аппаратов часто определяется усталостной прочностью узлов сварки штуцеров. Большой объем исследований по данной проблеме, обзор которых приведен в работах [1-3], выполнен для штуцерных соединений из однослойной стали. Результаты этих исследований нашли отражение в нормах расчета на прочность сосудов и аппаратов при малоцикловых нагрузках [4]. Расчет усталостной прочности сосудов и аппаратов из двухслойной стали дополнительно требует использования кривых усталости, приведенных в [5].

Особого внимания с точки зрения анализа усталостной прочности требуют сварные швы с неполным проплавлением стенки, конструктивный зазор в которых играет роль макроскопического концентратора напряжений. Данный вид сварного соединения используется для сварки относительно тонких патрубков. Анализ усталостной прочности таких штуцерных соединений, выполненный по уточненной методике в соответствии с рекомендациями [4] и [5], показывает, что при относительно низком уровне отношения размаха внутреннего давления Δp к его допустимому значению $[p]$, не превышающем значения 0,5, расчетный ресурс штуцерных узлов не превышает $2 \cdot 10^3$ циклов. В условиях, когда после

выработки расчетного ресурса по результатам технического диагностирования не наблюдаются признаков усталостного разрушения, возникает проблема обоснования возможности дальнейшей эксплуатации рассматриваемых объектов.

Одним из наиболее эффективных путей решения данной проблемы является проведение экспериментальных исследований. Это связано с тем, что расчетные методики основаны на использовании приближенных значений эффективных коэффициентов концентрации напряжений сварных узлов и обобщенных кривых циклической прочности металла, дающих консервативную, нижнюю оценку ресурса. Более высокая достоверность результатов по оценке ресурса достигается в результате экспериментальных исследований на натуральных образцах. В этом случае воспроизводятся реальные свойства металла сосуда, конструктивные особенности узла, влияние технологического процесса сварки. Подобие процессов накопления повреждений по механизму усталости в сварном узле сосуда и натурном образце обеспечивается равенством амплитуд приведенных напряжений $\sigma_{пр} = \sigma_1 - \sigma_3$, где σ_1, σ_3 – главные напряжения.

Для учета естественного разброса результатов ресурсных испытаний, связанного со стохастической природой явления усталости, при разработке программы проведения испытаний образцов, по мнению авторов, необходимо учитывать нормативные коэффициенты запаса прочности по числу циклов нагружения $n_N = 10$ и амплитуде напряжений $n_\sigma = 2$, обеспечивающие требуемый уровень безопасности эксплуатации объекта. Учет коэффициентов запаса по циклической прочности приводит к двум различным программам испытаний.

Первый вид испытания соответствует нагрузкам, создающим в расчетном сечении образца амплитуду приведенного напряжения, равную значению для натурального сосуда. Число циклов нагружения в испытании образцов определяется планируемым продлением срока эксплуатации сосуда и определяется выражением:

$$N_u = N_\varepsilon + N_n \cdot n_N,$$

где N_ε – существующая наработка сосуда;

N_n – число циклов нагружения сосуда в течение планируемого срока продления его эксплуатации.

Вторая программа испытаний предусматривает увеличение нагрузок в соответствие с коэффициентом запаса по амплитуде напряжения n_σ . Число циклов нагружения образцов определяется выражением:

$$N_u = N_\varepsilon + N_n \cdot n_\sigma.$$

Описанный подход реализован при обосновании сроков продления эксплуатации парка реакторов поливинилхлорида (ПВХ) после выработки расчетного ресурса сварных штуцерных соединений из двухслойной стали.

Особенностью работы оболочек, находящихся под действием внутреннего давления, является двухосность напряженного состояния. Для частичного воспроизведения двухосности нагружения за счет сжатия поперечной деформации разработаны специальные образцы крестообразной формы, приведенные на рис. 1. Рассмотрено два типа штуцерных соединений – с прямым и наклонным патрубками. Образцы изготовлены из двухслойной стали 09Г2С+10Х17Н13М2Т и труб 57х3.5 мм из стали 08Х17Н15М3Т. Сварные швы выполнены с конструктивным зазором, составляющим 30% от толщины образца.



Рис. 1. Образцы

Анализ напряженно-деформированного состояния образцов выполнен с использованием численной процедуры метода конечных элементов (МКЭ). Конечно-элементные модели образцов строились на основе объемных элементов, не содержали конструктивных зазоров в сварных швах и служили целью определения напряжений в сечении образца по сварному шву. На рис. 2 представлено сравнение распределения приведенных и радиальных напряжений по высоте сварного шва в сосуде и образце. Характер распределения радиальных напряжений подтверждает возможность моделирования двухосности напряженного состояния с использованием крестообразных образцов.

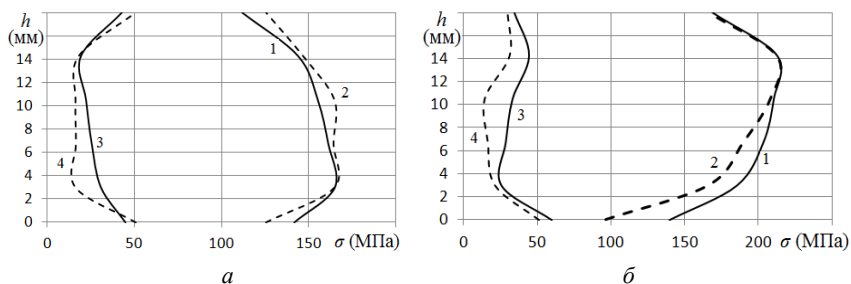


Рис. 2. Распределение напряжений по высоте сварного шва:
a – прямой патрубок; *б* – наклонный патрубок;
 сплошные линии – сосуд, штриховые – образец;
 1, 2 – приведенные напряжения; 3, 4 – радиальные напряжения

Результаты испытаний серии образцов по описанным выше программам позволило обосновать семикратное увеличение расчетного ресурса штуцерных сварных соединений рассматриваемых реакторов ПВХ. В процессе испытаний на назначенный срок продления эксплуатации реакторов не было выявлено очагов усталостного разрушения.

В целях определения характера развития усталостного разрушения рассматриваемых штуцерных сварных соединений проведены испытания образцов при повышенных нагрузках. Для каждого типа образцов проведено по три серии испытаний, отличающихся уровнем нагрузок. В процессе испытаний фиксировалось число циклов до образования макротрещины протяженностью 3-5 мм.

Условия и результаты испытаний приведены в табл. 1, где указаны амплитуды приложенных к образцу напряжений σ_0 , амплитуды максимальных приведенных напряжений в поперечном сечении образца по высоте сварного шва σ_w и внутренней поверхности патрубка σ_n , полученные упругим расчетом по МКЭ, и приведено среднее значение числа циклов до образования трещины N_f .

Таблица 1

Образец	Серия	σ_0 , МПа	σ_w , МПа	σ_n , МПа	$N_f \cdot 10^{-4}$, цикл.
Наклонный штуцер	1	99	267	495	1.82
	2	88.5	239	443	3.49
	3	78.5	212	392	4.8
Прямой штуцер	1	86.3	250	392	4.64
	2	82.7	240	376	7.47
	3	79.3	230	360	>8.5

В процессе испытаний образцов наблюдалось два вида их усталостного разрушения, представленных на рис. 3. В образцах с наклонным штуцером и в первой серии образцов с прямым штуцером, отличающихся относительно высоким уровнем действующих напряжений, образование макротрещины происходило на внутренней поверхности патрубков. Образование макротрещины во второй серии образцов с прямым штуцером наблюдалось из непровара сварного шва со стороны поверхности, соответствующей стали 09Г2С. Очагов усталостного разрушения в третьей серии образцов с прямым штуцером на исследуемой базе испытаний не зафиксировано.



Рис. 3. Характер усталостного разрушения образцов:
а – трещина в сварном шве; б – трещина на внутренней стороне патрубка

С целью дальнейшего использования полученных результатов в расчетах малоциклового усталости сварных штуцерных соединений с конструктивным зазором анализ экспериментальных данных по разрушению образцов был выполнен с использованием величин условно упругих напряжений, равных произведению упругопластической деформации на модуль продольной упругости. Упругопластическое деформирование в испытаниях образцов наблюдалось на внутренней поверхности патрубков. Результаты обработки эксперимента представлены в виде точек на рис. 4, где также приведены кривые малоциклового усталости сталей 09Г2С и 08Х17Н15М3Т, построенные согласно [4] при $n_N = 1$ и $n_\sigma = 1$. Сравнение разрушающих амплитуд условных упругих напряжений для

штуцерных соединений и используемых материалов позволяет получить значения эффективных коэффициентов концентрации напряжений, учитывающих влияние конструктивного зазора в сварном соединении. Средние значения эффективных коэффициентов концентрации напряжений для исследуемой базы испытаний составляют для внутренней поверхности патрубка $k_\sigma = 1,3$, для зоны сварного шва $k_\sigma = 1,5$.

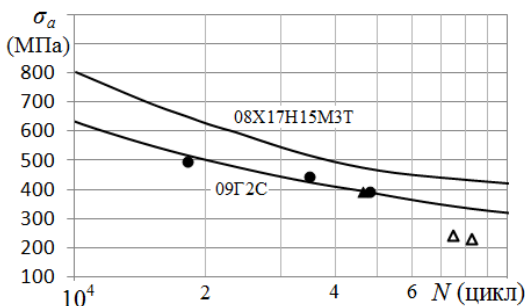


Рис. 4. Зависимость разрушающих амплитуд напряжения от базы испытания:
● – образцы с наклонным штуцером; ▲ – образцы с прямым штуцером, разрушение патрубка; △ – образцы с прямым штуцером, разрушение сварного шва

Результаты проведенного исследования позволили выявить существенный запас ресурса штуцерных соединений, выполненных из двухслойной стали, по сравнению с расчетным значением, полученным по существующим нормативным методам расчета. Полученные значения эффективных коэффициентов концентрации напряжений позволяют использовать в расчетах ресурса кривые малоциклового усталости сталей, входящих в состав двухслойной стали. Выявленные зоны зарождения усталостного разрушения рассмотренных штуцерных соединений требует своего учета при разработке программ технического диагностирования сосудов давления из двухслойной стали.

Библиографический список

1. Кудрявцев, И.В. Усталость сварных конструкций / И.В. Кудрявцев, Н.Е. Наумченков. – М.: Машиностроение, 1976. – 270 с.
2. Винокуров, В.А. Сварные конструкции. Механика разрушения и критерии работоспособности / В.А. Винокуров, С.А. Куркин, Г.А. Николаев. – М.: Машиностроение, 1996. – 576 с.

3. Карзов, Г.П. Особенности развития усталостных трещин в сварных штуцерных соединениях / Г.П. Карзов, В.П. Леонов, В.З. Марголин // Автоматическая сварка. – 1992. – № 6. – С. 3 – 8.
4. ГОСТ Р 52857.6 – 2007. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет на прочность при малоцикловых нагрузках. – Введ. 2008-04-01. М.: Стандартиформ, 2008. – 17 с.
5. РД 26-11-05-85. Сосуды и аппараты из двухслойной стали. Нормы и методы расчета на прочность. – Введ. 1986-01-01.– 5 с.