

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ТРУБ (Обзор)

П.Н. Ткач, А.В. Молтасов, И.Г. Ткач, С.Н. Прокопчук

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Для сварных соединений трубопроводов и элементов сварных конструкций, в том числе трубчатых, характерны изменения сечения в зоне шва. В местах изменения формы возникает местное повышение напряжений или их концентрация. Степень концентрации часто играет решающую роль при определении напряженно-деформированного состояния конструкции в целом, оказывает влияние на долговечность при циклических нагрузках, а также влияет на процесс зарождения и развития трещин. В настоящей статье приведен обзор работ, посвященных методикам определения максимальных локальных напряжений, действующих в зоне концентрации напряжений, вызванной геометрической формой сварных соединений трубопроводов и трубчатых конструкций. Библиогр. 49, табл. 1, рис. 4.

Ключевые слова: сварные соединения трубопроводов, трубчатые конструкции, геометрия сварного шва, локальные напряжения, коэффициент концентрации напряжений

Концентрация напряжений, обусловленная геометрией шва, является одним из основных факторов, определяющих характеристики сопротивления усталости сварных соединений [1].

Опыт показывает, что с концентрацией напряжений необходимо считаться не только при действии вибрационной нагрузки, но и при действии статической нагрузки и ударе, когда возможно хрупкое разрушение [2], что особо актуально для трубопроводов, эксплуатируемых при низких климатических температурах, например, в условиях Крайнего Севера или в заполярных районах [3, 4].

Традиционно максимальные напряжения при упругом деформировании получают умножением номинальных напряжений на величину теоретического коэффициента концентрации напряжений (ККН), который служит количественной оценкой концентрации напряжений.

В инженерной практике в последние годы широкое распространение получил подход, согласно которому теоретический коэффициент концентрации напряжений представляется в виде произведения двух коэффициентов. Первый учитывает макрогеометрию, т. е. конструкцию сварного узла, поэтому он получил название конструктивного ККН. Второй учитывает наличие сварного шва и его микрогеометрию. Такой подход дает достаточно достоверный результат, что было подтверждено, в том числе, и отечественными исследователями [5]. При наличии линейных (несоосность труб) или угловых (перекос труб) смещений кромок в сварном узле возникают дополнительные внешние нагрузки, которые учитываются соответствующими коэффициентами, на которые умножаются первые два [6].

Концентрация напряжений, связанная с размерами усиления и геометрией зоны перехода от шва к основному металлу, в первую очередь зависит от отношения радиуса этого перехода к толщине основного металла [7], а в нашем случае к толщине стенки трубы [8].

Исследованию влияния ККН на усталостную прочность посвящено большое количество работ отечественных и зарубежных авторов [9, 10], что свидетельствует о значительном научном интересе к этому вопросу, в частности, применительно к сварным соединениям трубопроводов и трубчатых конструкций [11].

Для оценки напряженного состояния нагруженных деталей и элементов конструкций, как правило, используются аналитические, экспериментальные и численные методы, а современные методики основаны на их сочетании с максимальным использованием преимуществ каждого из них. Поэтому целью настоящего обзора является отслеживание современных тенденций и определение приоритетных направлений дальнейшего развития методик расчета максимальных локальных напряжений в сварных соединениях труб.

Большинство работ, опубликованных за последние десятилетия, основаны на использовании метода конечных элементов (МКЭ) для получения формул, позволяющих определять напряжения в «горячей точке» (the hot spot stresses, или HSS), которые представляют собой максимальные локальные напряжения. Применение указанного подхода позволяет определить конструктивный ККН с использованием оболочечных элементов при приложении как осевой нагрузки, так и изгибающих моментов в различных плоскостях исследуемого сварного узла. Например, в работе [12]

для Т-образных соединений таким путем были установлены значения конструктивного ККН по всей длине шва в случае приложения осевой нагрузки вдоль патрубка F_a , изгибающего момента поперек сечений трубы и патрубка M_{IPB} и в плоскости сечения трубы M_{OPB} (рис. 1).

Значения ККН (рис. 1) удовлетворительно совпадают с результатами работ, приведенных в [12]. Следует отметить, что авторы [12] ограничились графическим представлением результатов, и уравнений, позволяющих определять ККН в зависимости от геометрических параметров, не получали.

В работе [13] с применением МКЭ получены формулы для определения конструктивного ККН в соединениях квадратных и круглых труб ДТ/Х-образных трубчатых конструкций. Выполнена сравнительная оценка расчетных значений ККН указанных соединений с соответствующей величиной для аналогичных соединений круглых труб, полученных по известным на тот момент формулам. Установлено, что соединения «квадрат-круг» при приложении осевой нагрузки и изгибающего момента не в плоскости имеют ККН меньше, чем соединения «круг-круг». При изгибе моментом в плоскости конструкции картина обратная.

Авторами [14] для сварных соединений Х-образных и крестообразных трубчатых конструкций с помощью МКЭ было проанализировано около 2 тыс. вариантов конструкций с разными углами пересечения и шестью схемами нагружения (растяжение и изгиб в разных направлениях и плоскостях). В результате на основе регрессионного анализа получены новые параметрические уравнения для определения конструктивного ККН. Результаты расчета по полученным зависимостям авторы сравнили с результатами эксперимента, проведенного на стальных и акриловых моделях. Совпадение оказалось удовлетворительным, поэтому полученные формулы рекомендованы к использованию для расчета трубчатых ферм.

Работа [15] во многом аналогична работе [14], но посвящена К-образным трубчатым конструкциям. В них также на основе решения с помощью МКЭ 254 задач, соответствующих разным вариантам конструкций, и последующего регрессионного анализа полученных результатов, построены зависимости для определения конструктивного ККН. Проверка полученных результатов также выполнялась на стальных и акриловых моделях.

В работе [16] теми же авторами на основе [15] и базы данных из других своих работ разработана методика прогнозирования значений конструктивного ККН и угла прогиба в К-образных трубчатых конструкциях.

Авторами [17] для К-образных трубчатых конструкций на основе метода перемещения в эффективном концентраторе были определены локальные напряжения с учетом геометрических параметров сварного шва. Авторы этой работы исследовали концентрацию напряжений в сварных соединениях с угловыми швами, имеющими исправленный профиль. Минимизация ККН (здесь ККН формы шва) достигалась путем удаления дефектов в зоне перехода от шва к основному металлу и приданием профилю необходимого радиуса.

В работе [18] для сварных соединений ХХ-образных пространственных трубчатых конструкций на основе МКЭ получена база данных по ККН. С ее использованием разработана простая и эффективная методика прогнозирования значений ККН при разных видах нагрузки. Для определения ККН получены уравнения и диаграммы, рекомендованные для инженерной практики.

Подход, применяемый в работах [12–15], был распространен на Т-, Х- и Y-образные трубчатые конструкции для двенадцати схем приложения нагрузок в работе [19].

В работе [20] определены значения конструктивного ККН для сварного соединения штуцера и сферического резервуара в широком диапазоне изменения их параметров (диаметры и толщины стенок) и представлены в виде таблиц и графиков.

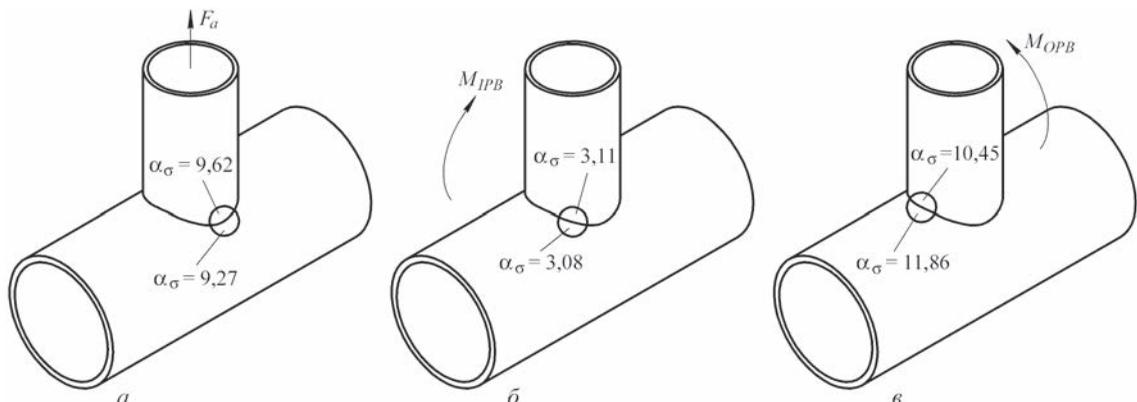


Рис. 1. Максимальные значения ККН по данным [12] под действием осевой силы (а), момента поперек сечений трубы и патрубка (б) и момента в плоскости сечения трубы (в)

Авторы использовали МКЭ и теорию тонких оболочек под внутренним давлением. Оба метода показали хорошую сходимость результатов даже с учетом усиления, имеющего место в соединении, поэтому, по мнению авторов, полученные в этой работе результаты могут быть распространены и на швы приварки штуцеров к цилиндрическим оболочкам.

Результаты экспериментальных исследований усталостной долговечности ДТ-образных соединений труб представлены в работе [21]. Авторами были изготовлены сваркой ТИГ образцы двух видов из стали S31803. Первый вид образцов имитировал трубчатую конструкцию, т. е. приварку трубы меньшего диаметра к трубе большего. Второй вид образцов представлял собой элемент трубопровода, т. е. трубу с приваренными к ней штуцерами. В ходе исследований авторами определялся конструктивный ККН для обоих видов образцов. Как по результатам натурных измерений, так и путем расчета по формулам, рекомендованным МИС (IIW Doc. XV-E-98-236), было установлено, что ККН образцов второго вида на 35 % меньше, чем первого.

В работе [22] представлен метод определения конструктивного ККН сварных соединений трубопроводов, основанный на МКЭ, причем ККН выделяется как основной фактор, влияющий на долговечность кольцевых швов трубопроводов. Согласно кодам ASME Section III и B31, соответственно, для сосудов под давлением и трубопроводов, их долговечность определяется таким важным показателем как коэффициент снижения предела выносливости (ASME Section III) и коэффициент интенсивности напряжений (ASME B31). Оба являются аналогом эффективного коэффициента концентрации и связаны с ККН, поэтому задача более точного и достоверного определения ККН является актуальной. Авторы этой работы отмечают, что общепринятый подход к его определению с помощью МКЭ недостаточно эффективен для сварных швов трубопроводов из-за чувствительности результатов к размеру сетки, а

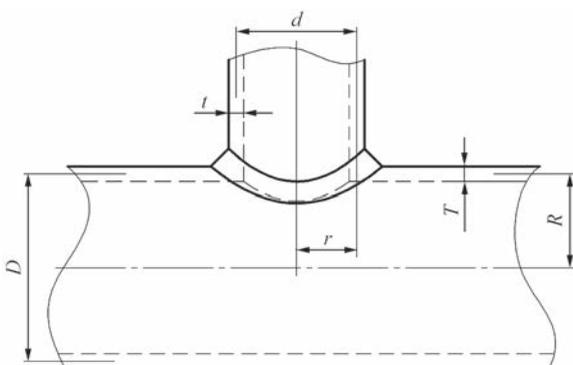


Рис. 2. Параметры Т-образного соединения трубы и ответвления

предложенный метод дает значение ККН, которое от него не зависит. Важным результатом этой работы является установление функциональной взаимосвязи между коэффициентом снижения предела выносливости и ККН.

Разработанный и представленный в работе [22] подход успешно реализован его авторами в работе [23] на примере Т-образной трубчатой конструкции, работающей на изгиб в плоскости, предложенный метод применен для определения HSS. Подобно работе [21], в [23] рассмотрены как трубчатые конструкции, так и соединения трубопроводов. Для получения последних в модели исключалась часть поверхности трубы, соответствующая пересечению. Результаты свидетельствуют о следующем: наибольшее значение конструктивный ККН принимает на трубе большего диаметра. Для случая трубчатой конструкции и соединения трубопроводов характер распределения ККН вдоль шва различен. В зоне максимального ККН соединения трубопроводов его значение на 33 % ниже, чем у трубчатой конструкции. Последний результат совпадает с результатами работы [21], полученными на натурных образцах и с помощью аналитических зависимостей.

Работа [24] во многом аналогична [22], причем авторы отмечают чрезмерный консерватизм кодов ASME, дающих завышенные значения. Авторами работы [24] на основе МКЭ получены графики зависимости конструктивного ККН от соотношения диаметра трубы D и приваренного к ней ответвления диаметром d с переменной толщиной стенки. Данные получены для широкого диапазона $d/D = 0,05...1,0$. Значения конструктивного ККН при нагружении внутренним давлением находятся в пределах $1,8...3,5$.

С момента представления в 2003 г. нового метода определения конструктивного ККН [22], к 2007 г. он прошел валидацию. В работе [25] авторы [22] успешно применили свой метод при обновлении кодов 2007 ASME Div 2. Выход новой редакции стал возможным, в том числе благодаря новому, более точному методу определения ККН.

Авторы [26] исследовали влияние на конструктивный ККН локального утонения стенки в районе Т-образного соединения трубы и ответвления (рис. 2).

Исследование выполнено в два этапа. На первом этапе модель прошла валидацию с помощью известных зависимостей для конструктивного ККН, которые были получены такими исследователями как:

- Линд (Lind)

$$\alpha_{\sigma} = \min\{K_1; K_2\},$$

где

$$K_1 = \frac{[1 + 1,77(d/D)\sqrt{D/T} + (d/D)^2 \sqrt{s/S}][1 + (T/D)/\sqrt{s/S}]}{1 + (d/D)^2 \sqrt{s/S}/(s/S)},$$

$$K_2 = \frac{[1,67\sqrt{s/S}\sqrt{D/T} + 0,565(d/D)][1 + (T/D)/\sqrt{s/S}]}{0,67\sqrt{s/S}\sqrt{D/T} + 0,565(d/D)^2/(s/S)},$$

$$S = d/(2t), S = D/(2T); \quad (1)$$

• Мани (Money)

$$\alpha_\sigma = 2,5 \left[(r/t)^2 (T/R) \right]^{0,2042} \quad \text{для } r/R < 0,7,$$

$$\alpha_\sigma = 2,5 \left[(r/t)^2 (T/R) \right]^{0,24145} \quad \text{для } r/R > 0,7; \quad (2)$$

• Декок (Decock)

$$\alpha_\sigma = \frac{[2 + 2(d/D)\sqrt{(d/D)(t/T)} + 1,25(d/D)\sqrt{D/T}]}{1 + (t/T)\sqrt{(d/D)(t/T)}}; \quad (3)$$

• Гурумурти (Gurumurthy)

$$\alpha_\sigma = 1,75(T/t)^{0,4}(d/D)^{-0,08}(\lambda)^{0,6}, \quad (4)$$

где $\lambda = d/(DT)^{0,5}$;

• Моффат (Moffat)

$$\alpha_\sigma = [2,5 + 2,2,715(d/D) + 8,125(d/D)^2 - 6,877(d/D)^3] + [-0,5 - 1,193(d/D) - 5,416(d/D)^2 + 5,2(d/D)^3](t/T) + [0,078(d/D) - 0,195(d/D)^2 + 0,11(d/D)^3](D/T)^{1,2} + [-0,043(d/D) + 0,152(d/D)^2 - 0,097(d/D)^3](t/T)(D/T)^{1,2}. \quad (5)$$

После валидации были построены модели в широком диапазоне параметров соединения и оценено влияние утонения на конструктивный ККН, в результате было установлено, что он возрастет с уменьшением толщины стенки. Для относительно тонкостенных труб при $d/D < 0,2$ влияние утонения на ККН становится не таким существенным вплоть до обратной картины, когда с уменьшением толщины может уменьшаться и ККН. Для относительно толстостенных труб при $d/D > 0,3$ ККН с уменьшением толщины возрастает существенно. Для соединений как с утонением, так и без него максимальные локальные напряжения имеют место на линии пересечения внутренних поверхностей.

Распределение ККН вдоль шва и зоны максимального ККН в трубчатых сварных конструкциях оказывают существенное влияние на долговечность конструкции. Особенно важно знать характер распределения ККН для пространственных трубчатых конструкций. Авторы [27] исследовали распределение конструктивного ККН для ДКТ-конструкций под действием осевых нагрузок. С помощью параметрического моделирования и с применением МКЭ оценено влияние геометрии конструкции на распределение ККН вдоль швов. Оценка включала также сравнение значений ККН плоских конструкций (КТ) с простран-

ственными (ДКТ). Установлено, что конструктивный ККН ДКТ-конструкции в 1,1...1,6 раза выше, чем ККН КТ-конструкции. Получены параметрические уравнения, связывающие конструктивный ККН с размерами трубчатой конструкции, коэффициент корреляции составил 0,993...0,999. Данные по распределению ККН в Т-образном элементе КТ-конструкции аналогичны результатам [12].

Стоит отметить, что получение достоверных аналитических зависимостей является на сегодня актуальной задачей. Наглядным примером удобства применения формул для ККН, подобным [27], в сочетании с другими факторами являются статьи [28, 29], где исследуется влияние на долговечность конструкций остаточных напряжений и ударной обработки сварных швов. В литературе довольно часто определение ККН встречается в сочетании с другими факторами, определяющими долговечность сварных соединений.

В работе [30] наглядно продемонстрировано, насколько значение конструктивного ККН влияет на накопленное усталостное повреждение свай, сваренных в стык односторонним швом, при их забивании в морское дно. Конструктивный ККН в рассматриваемом случае связан с изгибом, вследствие эксцентриситета из-за разности толщин соединяемых труб, и вводится наряду с классификационным коэффициентом (classification factor), зависящим от способа сварки, т. е. представляющий собой теоретический ККН формы шва. Повышение последнего от 1,34 до 1,52, т. е. на 13 %, влечет за собой увеличение накопленного усталостного повреждения (определялось по гипотезе Пальмгрена-Майнера) на 46 %, что установлено авторами упомянутой работы расчетным путем с помощью программного продукта GRLWEAP.

В отличие от работы [30], где рассматривалось только осевое нагружение при забивании свай, авторы [31] оценивали ККН при действии на сваю как осевой нагрузки, так и изгибающего момента (по отдельности и вместе). Влияние на накопленное усталостное повреждение не оценивалось, однако была выполнена большая работа по определению общего ККН в зависимости от диаметра и толщины стенки t сваи при следующих параметрах шва: высота выпуклости составляет 5 % толщины стенки плюс 2 мм, и радиус перехода от шва к основному металлу ρ составляет 1 мм. Ширина и высота усиления определялись конструктивно, радиальное смещение труб e принималось фиксированным и составляло 2 мм. Полученные значения были представлены графически, и сравнивались с известной формулой для плоских деталей ($K_{cm} = 1 + 3e/t$) [32] и с уточненными формулами, полученными для труб [33, 34]. Установлено, что все результаты удовлетворительно согласуют-

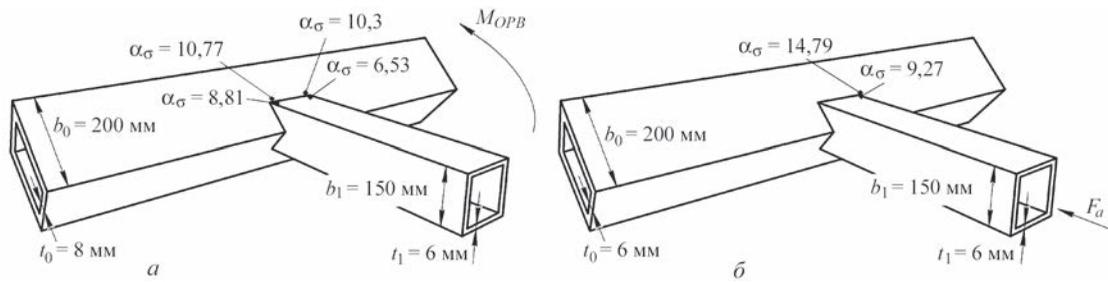


Рис. 3. Максимальные ККН по данным [39, 40] при действии момента в плоскости трубы (а) и осевой силы вдоль патрубка (б)ся. Зависимости ККН от толщины стенки, полученные по формулам и с помощью МКЭ, имеют одинаковый характер. От диаметра трубы ККН практически не зависит.

Отдельно следует упомянуть работы И. Лотсберга (Inge Lotsberg), который сделал большой вклад в развитие методов определения локальных напряжений в сварных соединениях трубопроводов и трубчатых конструкциях. Особенностью его работ является получение точных аналитических выражений для ККН на основе классической теории оболочек. Так, например, формулы Лотсберга, представленные им в работе [35], позволяют определять конструктивный ККН в зависимости от погрешностей изготовления конструкций. Формулы применимы для стыковых соединений труб, кольцевых ребер жесткости и шпангоутов, конических переходов трубопроводов. Дальнейшие его работы были направлены на расширение области применения формул и оценку влияния ККН на усталостную долговечность трубчатых конструкций [33, 36]; рассмотрение более широкого спектра нагрузок, например, при действии внутреннего давления [34]; уточнение полученных другими авторами эмпирических зависимостей для определения ККН [37]. Итогом более чем сорокалетней деятельности ученого стала книга [38], вобравшая в себя практически все аспекты усталостной долговечности трубчатых конструкций.

Расширение области применения формул для определения ККН является характерной чертой исследований последних лет [39–43]. Работы [39, 40] взаимно дополняют друг друга и направлены на изучение вопроса распределения ККН в Т-образных сварных соединениях труб квадратного сечения (рис. 3).

В работе [39] установлены зоны наибольшего ККН вдоль шва, а также максимальные его значения при нагружении изгибающим моментом в плоскости трубы (рис. 3, а). Оценка выполнялась экспериментально на образцах из труб разных размеров (9 образцов) путем измерения перемещений с учетом нелинейности их распределения вдоль горячей линии. Известно, что метод определения HSS допускает возможность линейной и квадратичной экстраполяции. Авторами [39] уста-

новлено, что для соединений, представленных на рис. 3, необходимо применять квадратичную экстраполяцию. Именно в этом случае ККН определяется более точно, следовательно, могут быть применены кривые усталости, рекомендованные МИС. Авторы отмечают, что применение формул для расчета ККН является очень удобным, поэтому получение таких формул они представили как цель своих дальнейших исследований.

Те же авторы в работе [40] рассмотрели аналогичные соединения под действием осевых нагрузок, где для определения ККН применен МКЭ, в остальном полученный набор данных аналогичен [39], максимальные ККН получены для образца с тем же соотношением размеров, что и в [39]. Установлено, что наибольшие значения ККН имеют место в соединении при приложении осевой силы к трубе меньшего диаметра (рис. 3, б). Кроме того, авторы сравнили полученные результаты со значениями ККН Т-образных традиционных соединений (рис. 4) и труб круглого сечения (рис. 2). Даны критические значения размеров труб, при которых соединения (рис. 3) имеют преимущества перед остальными.

Авторы [41] также исследовали Т-образные соединения квадратных труб, в которых труба меньшего сечения повернута на 45° относительно положения, показанного на рис. 3. Для исследования применялся МКЭ, модель валидировалась с помощью натуральных измерений перемещений. Всего рассмотрено четыре вида нагрузки: осевые нагрузки, приложенные к трубам большего и меньшего диаметра, изгиб в плоскости и вне плоскости. В работе подтвержден вывод [39] о том, что для соединений квадратных труб необходимо применять квадратичную экстраполяцию при определении HSS. На основе определения ККН с помощью МКЭ на многочисленных моделях, в рассматриваемой работе получены достоверные формулы для определения ККН при перечисленных выше вариантах нагрузки.

Поскольку формулы (1)–(5) для расчета конструктивного ККН угловых швов Т-образных трубчатых конструкций (рис. 2) имеют сравнительно невысокую точность, авторы [42] с помощью МКЭ на основании решения 1526 задач получили более простые и достоверные формулы

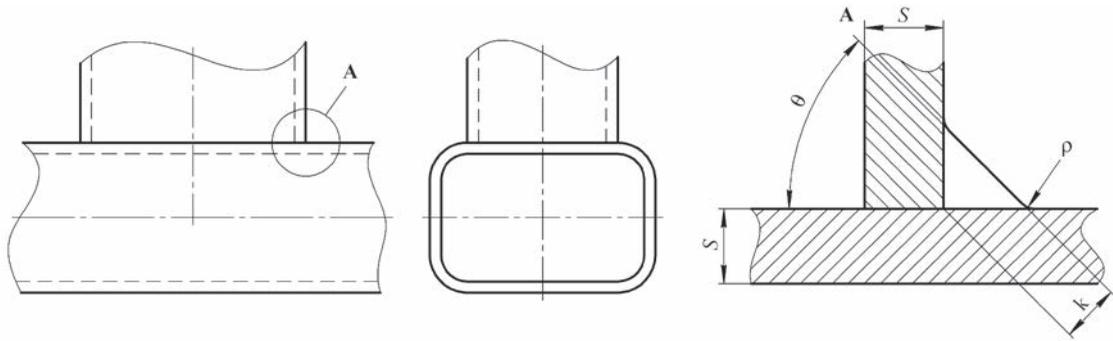


Рис. 4. Схема Т-образного сварного соединения прямоугольных труб

для определения его величины при действии внутреннего давления.

В работе [43] с применением МКЭ на основе регрессионного анализа данных, полученных с множества моделей, получены формулы для определения ККН К-образных трубчатых конструкций. Конструкция, рассмотренная авторами, сварена из большей трубы круглого и двух меньших труб квадратного сечения. Формулы применимы для определения ККН на каждой из труб под действием осевых нагрузок.

Работа [44] в методологическом плане родственна работе [26], но посвящена оценке влияния объемных поверхностных дефектов на долговечность тройников трубопроводов, в том числе и сварных. На первом этапе исследования автор построил модели тройников и с помощью МКЭ установил значения конструктивных ККН. Из всех видов тройников максимальные значения были получены для тройника с приварным штуцером. Они составили $\alpha_{\sigma} = 4,5$ для тройника с $D = 426$ мм, $T = 20$ мм, $d = 168$ мм, $t = 9$ мм. Зоны максимальной концентрации стали местом дальнейшего рассмотрения постулированных дефектов. Стоит отметить, что эти зоны совпали с зонами, отмеченными авторами [26]. Сравнение результатов расчетов ККН по формулам (1)–(5) с результатами, полученными в [44], и экспериментальными данными, взятыми из [45], приведено в таблице. Числовые значения ККН, полученные в работах [44] и [26] с применением МКЭ, согласуются как с экспериментальными данными, так и с расчетными значениями. При этом имеют место расхождения в результатах расчетов по формулам. Очевидно, что формула (2) дает заниженное, а формула (4) — завышенное значение для данного типоразмера тройника.

Поскольку большинство из рассмотренных выше работ [6, 8, 11–31, 33–45] ограничиваются определением только конструктивного ККН при помощи МКЭ, причем далеко не все исследователи получают формулы для его определения, экспериментальные методы определения ККН формы шва все еще не утратили своей актуальности. Так авторы работы [46] с помощью поляризационно-оптического метода на моделях, изготовленных по реальным размерам Т- и Y-образных трубчатых конструкций, получили значение ККН, учитывающего и конструктивные параметры, и геометрию шва. Созданные модели учитывают нестабильность формы сварного шва и ее влияние на напряженное состояние трубчатых узлов. Значения HSS, определенные с учетом фактической геометрии сварного шва, по оценкам авторов, возрастают в 2,5...3,0 раза. Сделанные в [46] выводы указывают на необходимость учета геометрии шва, иначе это может привести к образованию трещин в зоне перехода от шва к основному металлу трубчатых узлов. В работе [47] значения ККН стыковых сварных соединений труб получены также с помощью поляризационно-оптического метода. Диапазон значений в зависимости от геометрических параметров шва составляет 1,1...1,7.

Авторами [48] в ходе моделирования нестационарных процессов в стыковом сварном соединении трубопровода с помощью МКЭ получено значение теоретического ККН, которое составило 1,8. Данный результат согласуется с результатами [46] и со значениями ККН стыковых сварных соединений плоских деталей, приведенными в обзорах [9, 10].

Поляризационно-оптический метод был также использован для определения ККН сварных соединений, применяемых при ремонте магистраль-

ККН сварных соединений тройников под действием внутреннего давления

Метод определения	Экспериментальный [45]	МКЭ		Формула				
		[44]	[26]	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Значение	4,23	4,5	4,08*	4,47	3,57	4,11	6,14	4,18

Примечания: * — значение получено по данным [26] методом интерполяции параметров тройников, ближайших к [44]; расчет по формулам (1)–(5) выполнен для параметров, полученных интерполяцией. Тем же параметрам соответствует и экспериментальное значение.

ных трубопроводов без остановки транспорта продукта [49]. Значения ККН в зависимости от вида нагрузки составили 1,6...3,0 для угловых и 1,2...2,0 для нахлесточно-стыковых сварных соединений.

Выводы

1. За последние десятилетия достигнут значительный прогресс в задаче определения ККН трубопроводов и трубчатых конструкций. На сегодня наиболее распространенными для оценки напряженного состояния являются методики, основанные на применении МКЭ. Значительно меньшим количеством представлены методики, основанные на экспериментальных методах получения локальных напряжений и аналитические методы.

2. Ограничения применимости МКЭ для расчета ККН трубопроводов и трубчатых конструкций в каждом отдельно взятом случае связаны с высокой трудоемкостью при построении точной трехмерной модели и ее аппроксимации трехмерными конечными элементами. Поэтому большинство исследователей стремится применять параметрическое моделирование на основе оболочечных элементов и получать регрессионные уравнения, позволяющие вычислять ККН в широком диапазоне параметров.

3. Формулы для определения ККН с помощью МКЭ, представленные в литературе за указанный период, носят частный характер. Они могут быть применены только к определенной конструкции в установленном диапазоне параметров. Второй особенностью существующих зависимостей является тот факт, что они позволяют определять только конструктивный ККН, т. е. не учитывают наличия и геометрии сварного шва. При этом экспериментальные исследования показывают, что напряжения в локальных зонах перехода от шва к основному металлу заметно возрастают, а игнорирование при расчетах наличия сварного шва может привести к преждевременному разрушению сварного трубчатого узла.

4. В современной инженерной практике локальную составляющую ККН, связанную с наличием сварного шва, рекомендуется рассчитывать с использованием приближенных формул, однако для сварных соединений труб такие формулы на сегодня не были получены. Поэтому при определении характеристик сопротивления усталости трубчатых сварных конструкций используются различные методические приемы, например, метод перемещения в эффективном концентраторе. Следует отметить, что использование фиктивного радиуса перехода от шва к основному металлу не позволяет определить места с максимальным значением локального ККН вдоль кольцевого или

углового шва в трубчатых конструкциях и соединениях трубопроводов, что играет важную роль для достоверной оценки их долговечности.

Список литературы/References

1. Труфяков В.И., Дворецкий В.И., Михеев П.П. и др. (1990) *Прочность сварных соединений при переменных нагрузках*. Киев, Наукова думка.
Trufyakov, V.I., Dvoretzky, V.I., Mikheev, P.P. et al. (1990) *Strength of welded joints under alternating loads*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
2. Навроцкий Д.И. (1968) *Расчет сварных конструкций с учетом концентрации напряжений*. Ленинград, Машиностроение.
Navrotsky, D.I. (1968) *Calculation of welded structures taking into account stress concentration*. Leningrad, Mashinostroenie [in Russian].
3. Кучук-Яценко С.И., Кирьян В.И., Казымов Б.И., Хоменко В.И. (2006) К методологии контроля соответствия назначению сварных соединений трубопроводов, полученных контактной сваркой оплавлением. *Автоматическая сварка*, № 3, 3–9.
Kuchuk-Yatsenko, S.I., Kirian, V.I., Kazymov, B.I., Khomenko, V.I. (2006) Methodology for control of fitness for purpose of flash butt welded joints in pipelines. *The Paton Welding J.*, № 2-6.
4. Патон Б.Е. (2013) Исследования и разработки ИЭС им. Е.О. Патона для современной энергетики. *Там же*, № 11, 14–22.
Paton, B.E. (2013) Research and developments of the E.O. Paton Electric Welding Institute for nowadays power engineering. *Ibid.*, № 11, 14-22.
5. Коростылев Л.И., Литвиненко Д.Ю. (2015) Оценка коэффициента концентрации напряжений в сварных узлах тонкостенных конструкций расчетом макро- и микроконцентрации. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*, 2(3), 184–194.
Korostylyov, L.I., Litvinenko, D.Yu. (2015) Evaluation of stress concentration factor in welded assemblies of thin-walled structures using calculation of macro- and microconcentration. *Nauk. Visnyk Khersonsk. Derzh. Morskoi Akademii*, 2(3), 184-194.
6. Ostsemin A.A., Dil'man V.L. (2003) Effect of stress concentration in a welded seam on the low-cycle fatigue of large-diameter pipes. *Chemical and Petroleum Engineering*, 39, 5 6, 259–264.
7. Рыбин Ю.И., Стаканов В.И., Костылев В.И. и др. (1982) Исследование методом конечных элементов влияния геометрических параметров швов тавровых и крестообразных сварных соединений на концентрацию напряжений. *Автоматическая сварка*, 5, 16–20.
Rybin, Yu.I., Stakanov, V.I., Kostylyov, V.I. et al. (1982) Investigation by finite element method of geometric parameters influence of T- and cruciform welded joints on stress concentration. *Avtomatich. Svarka*, 5, 16-20 [in Russian].
8. Macdonald K.A., Haagensen P.J. (1999) Fatigue design of welded aluminum rectangular hollow section joints. *Engineering Failure Analysis*, 6, 113–130.
9. Tkacz P.N., Moltasow A.W. (2017) Rozwój metod oceny stanu naprężenia w elementach konstrukcji spawanych. Część 1. Metody tradycyjne. *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa*, 4, 52–56.
10. Tkacz P.N., Moltasow A.W. (2017) Rozwój metod oceny stanu naprężenia w elementach konstrukcji spawanych. Część 2 Metody najnowsze. *Ibid*, 5, 98–103.
11. Wood J. (2008) A review of literature for the structural assessment of mitred bends. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 8, 275–294.
12. N'Diaye A., Hariri S., Pluvinage G., Azari Z. (2007) Stress concentration factor analysis for notched welded tubular T-joints. *International Journal of Fatigue*, 9, 1554–1570.
13. Ai-Kah Soh, Chee-Kiong Soh. (1991) SCF Equations for DT/X square-to-round tubular joints. *J. Construct. Steel Research*, 9, 81–95.

14. Chang E., Dover W.D. (1996) Stress concentration factor parametric equations for tubular X and DT joints. *Int. J. Fatigue*, 18, 6, 363–387.
15. Morgan M.R., Lee M.M.K. (1997) New parametric equations for stress concentration factors in tubular K-joints under balanced axial loading. *Ibid*, 19, 4, 309–317.
16. Morgan M.R., Lee M.M.K. (1998) Prediction of stress concentrations and degrees of bending in axially loaded tubular K-joints. *J. Construct. Steel Res*, 45, 1, 67–97.
17. Rodriguez J.E., Brennan F.P., Dover W.D. (1998) Minimization of stress concentration factors in fatigue crack repairs. *Int. J. Fatigue*, 20, 10, 719–725.
18. Karamanos S.A., Romeijn A., Wardenier J. (1999) Stress concentrations in multi-planar welded CHS XX-connections. *J. Construct. Steel Res*, 5, 259–282.
19. Lee M.M.K. (1999) Estimation of stress concentrations in single-sided welds in offshore tubular joints. *Int. J. Fatigue*, 21, 895–908.
20. Dekker C.J., Brink H.J. (2000) Nozzles on spheres with outward weld area under internal pressure analysed by FEM and thin shell theory. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 7, 399–415.
21. Maddox S.J., Manteghi S. (2002) Fatigue tests on duplex stainless steel tubular t-joints. *Welding in the World*, 46, 3/4, 12–19.
22. Dong P., Hong J.K., Osage D., Prager M. (2003) Assessment of ASME's FSRF rules for vessel and piping welds using a new structural stress method. *Ibid*, 47, 1/2, 31–43.
23. Dong P., Hong J.K. (2004) The master S-N curve approach to fatigue of piping and vessel welds. *Ibid*, 48, 1/2, 28–36.
24. Finlay J.P., Rothwell G., English R., Montgomery R.K. (2003) Effective stress factors for reinforced butt-welded branch outlets subjected to internal pressure or external moment loads. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 80, 311–331.
25. Dong P., Prager M., Osage D. (2007) The design master S-N curve in ASME Div 2 rewrite and its validations. *Welding in the World*, 51, 5/6, 53–63.
26. Qadir M., Redekop D. (2009) SCF analysis of a pressurized vessel–nozzle intersection with wall thinning damage. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 86, 541–549.
27. Ahmadi H., Lotfollahi-Yaghin M. A., Aminfar M. H. (2011) Distribution of weld toe stress concentration factors on the central brace in two-planar CHS DKT-connections of steel offshore structures. *Thin-Walled Structures*, 49, 1225–1236.
28. Acevedo C., Nussbaumer A. (2012) Effect of tensile residual stresses on fatigue crack growth and S–N curves in tubular joints loaded in compression. *International Journal of Fatigue*, 46, 171–180.
29. Habibi N., H-Gangaraj S.M., Farrahi G.H. et al. (2012) The effect of shot peening on fatigue life of welded tubular joint in offshore structure. *Materials and Design*, 43, 250–257.
30. Chung J., Wallerand R., Hélias-Brault M. (2013) Pile fatigue assessment during driving. 5th Fatigue Design Conference, Fatigue Design 2013. *Procedia Engineering*, 6, 451–463.
31. Li Y., Zhou X.P., Qic Z.M., Zhang Y.B. (2014) Numerical study on girth weld of marine steel tubular piles. *Applied Ocean Research*, 44, 112–118.
32. Вершинский С.В., Винокуров В.А., Куркин С.А. и др. (1975) Проектирование сварных конструкций в машиностроении. Москва, Машиностроение.
33. Vershinsky, S.B., Vinokurov, V.A., Kurkin, S.A. et al. (1975) *Design of welded structures in machine building*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
34. Lotsberg I. (1998) Stress concentration factors at circumferential welds in tubulars. *Marine Structures*, 11, 207–230.
35. Lotsberg I. (2004) Fatigue design of welded pipe penetrations in plated structures. *Ibid*, 17, 29–51.
36. Lotsberg I. (2009) Stress concentrations due to misalignment at butt welds in plated structures and at girth welds in tubulars. *International Journal of Fatigue*, 33, 1337–1345.
37. Lotsberg I. (2008) Stress concentration factors at welds in pipelines and tanks subjected to internal pressure and axial force. *Marine Structures*, 21, 138–159.
38. Lotsberg I. (2011) On stress concentration factors for tubular Y- and T-joints in frame structures. *Ibid*, 24, 60–69.
39. Lotsberg I. (2016) *Fatigue design of marine structures*. Cambridge University Pres.
40. Cheng B., Qian Q., Zhao X.L. (2015) Stress concentration factors and fatigue behavior of square bird-beak SHS T-joints under out-of-plane bending. *Engineering Structures*, 99, 677–684.
41. Cheng B., Qian Q., Zhao X.L. (2015) Numerical investigation on stress concentration factors of square bird-beak SHS T-joints subject to axial forces. *Thin-Walled Structures*, 94, 435–445.
42. Tong L., Xu G., Liu Y. et al. (2015) Finite element analysis and formulae for stress concentration factors of diamond bird-beak SHS T-joints. *Ibid*, 86, 108–120.
43. Mukhtar F.M., Al-Gahtani H.J. (2016) Finite element analysis and development of design charts for cylindrical vessel-nozzle junctures under internal pressure. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 41, 10, 4195–4206.
44. Chen Y., Wan J., Hu K. et al. (2017) Stress concentration factors of circular chord and square braces K-joints under axial loading. *Ibid*, 113, 287–298.
45. Юхимец П.С. (2015) Оценка остаточного ресурса поврежденного тройника. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 3, 26–31.
46. Yukhimets, P.S. (2015) Evaluation of residual life of a damaged T-joint. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, 3, 26-31.
47. Moffat D.G., Mistry J., Moore S.E. (1999) Effective stress factor correlation equations for piping branch junctions under internal pressure loading. *J. Press Vessel Technol.*, 121(2), 121–126.
48. Губайдулин Р.Г., Тиньгаев А.К., Лупин В.А. (2012) Исследование напряженного состояния сварных соединений бесфасонных трубчатых узлов. *Вестник ЮУрГУ, Серия «Металлургия»*, 18, 3, 31–36.
49. Gubajdulin, R.G., Tingaev, A.K., Lupin, V.A. (2012) Investigation of stress state of welded joints of non-faceted tubular assembly. *Vestnik YuUrGU, Seriya Metallurgiya*, 18(3), 31-36 [in Russian].
50. Маковецкая-Абрамова О.В., Хлопова А.В., Маковецкий В.А. (2014) Исследование концентрации напряжений при сварке трубопроводов. *Технико-технологические проблемы сервиса*, 2(28), 25–27.
51. Makovetskaya-Abramova, O.V., Khloпова, A.V., Makovetsky, V.A. (2014) Examination of stress concentration in welding of pipelines. *Tekhn.-Tekhnol. Problemy Servisa*, 2(28), 25-27 [in Russian].
52. Федосеева Е.М., Ольшанская Т.В., Игнатов М.Н. (2011) Моделирование нестационарных процессов в сварном соединении трубопровода. *Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело»*, 5, 376–382.
53. Fedoseeva, E.M., Olshanskaya, T.V., Ignatov, M.N. (2011) Modeling of nonstationary processes in welded joint of pipelines. *Neftegazovoe Delo: Elektronny Nauchny Zhurnal*, 5, 376-382 [in Russian].
54. Бут В.С., Олейник О.И. (2014) Развитие в Украине технологий ремонта дуговой сваркой магистральных трубопроводов в условиях эксплуатации. *Автоматическая сварка*, 5, 42–50.
55. But, V.S., Olejnik, O.I. (2014) Development of technologies of repair by arc welding of operating main pipelines in Ukraine. *The Paton Welding J.*, 5, 40-47.

МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ЛОКАЛЬНИХ НАПРУЖЕНЬ У ЗВАРНИХ З'ЄДНАННЯХ ТРУБ (Огляд)

П.М. Ткач, А.В. Молтасов, І.Г. Ткач, С.М. Прокопчук

ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Для зварних з'єднань трубопроводів і елементів зварних конструкцій, в тому числі трубчастих, характерні зміни перерізу в зоні шва. У місцях зміни форми виникає місцеве підвищення напружень або їх концентрація. Ступінь концентрації часто набуває вирішального значення при визначенні напружено-деформованого стану конструкції в цілому, впливає на довговічність при циклічних навантаженнях, а також впливає на процес зародження та розвитку тріщин. У цій статті наведено огляд робіт, присвячених методикам визначення максимальних локальних напружень, що діють в зоні концентрації напружень, яка викликана геометричною формою зварних з'єднань трубопроводів і трубчастих конструкцій. Бібліогр. 49, табл. 1, рис. 4.

Ключові слова: зварні з'єднання трубопроводів, трубчасті конструкції, геометрія зварного шва, локальні напруження, коефіцієнт концентрації напружень

METHODS FOR DETERMINATION OF LOCAL STRESSES IN WELDED PIPED JOINTS (Review)

P.N. Tkach, A.V. Moltasov, I.G. Tkach, S.N. Prokopchuk

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 03150, 11 Kazimir Malevich Str., Kyiv, Ukraine.

E-mail: office@paton.kiev.ua

For welded joints of pipelines and elements of welded structures, including piped ones, changes in the weld zone section are typical. In places of shape change, a local increase in stresses or their concentration occurs. The degree of concentration often plays a decisive role in determining the stress-strain state of the structure as a whole, affects the service life under cyclic loads, and also affects the process of crack nucleation and propagation. This article provides a review of works on methods for determining the maximum local stresses acting in the zone of stress concentration caused by the geometric shape of welded joints of pipelines and piped structures. 49 Ref., 1 Tabl., 4 Fig.

Keywords: pipeline welded joints, piped structures, weld geometry, local stresses, stress concentration factor

Поступила в редакцію 29.10.2018

Подписка – 2019 на журнал «Автоматическая сварка»

www.patonpublishinghouse.com/rus/journals/as

Подписной индекс 70031

Украина		Зарубежные страны	
на полугодие	на год	на полугодие	на год
990 грн.	1980 грн.	90 дол. США	180 дол. США

В стоимость подписки включена доставка заказной бандеролью.



Подписку на журнал «Автоматическая сварка» можно оформить непосредственно через редакцию или по каталогам подписных агентств:

ДП «Преса», «Пресцентр», «Меркурій» (Україна); каталог «Газеты. Журналы» агентства «Роспечать», Объединенный каталог «Пресса России» (Россия); каталог АО «Казпочта» Издания Украины (Казахстан); каталог зарубежных изданий «Белпочта» (Беларусь).

Подписка – 2019 на журнал «The Paton Welding Journal»

www.patonpublishinghouse.com/eng/journals/tpwj

Подписной индекс 21971



Украина		Страны дальнего зарубежья	
на полугодие	на год	на полугодие	на год
2400 грн.	4800 грн.	192 дол. США	384 дол. США

В стоимость подписки включена доставка заказной бандеролью.

Правила для авторов, лицензионные соглашения, архивные выпуски журналов на сайте издательства www.patonpublishinghouse.com.

В 2019 г. в открытом доступе выпуски журналов с 2009 по 2017 гг. в формате *.pdf.

Подписано к печати 20.02.2019. Формат 60×84/8. Офсетная печать.

Усл. печ. л. 9,14. Усл.-отт. 9,99. Уч.-изд. л. 10,44.

Печать ООО «ДИА». 03022, г. Киев-22, ул. Васильковская, 45.

© Автоматическая сварка, 2019