

Несущая способность сварных узлов из труб прямоугольного сечения

Е. И. Васильева¹ М. Р. Гарифуллин²

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

² Университет Тампере, Финляндия, Тампере, Калевантие, 4

Информация о статье обзор

Аннотация

В настоящее время трубчатые конструкции широко применяются при строительстве зданий со стальным каркасом. При проектировании таких конструкций особое внимание уделяется проектированию и расчету узлов сопряжения элементов между собой. В данной статье представлен обзор научных исследований несущей способности сварных узлов из труб прямоугольного сечения, а также методик расчета, используемых в отечественной и зарубежной нормативной документации. В результате проведенного обзора были выявлены достоинства и недостатки существующих методик расчета. Также было отмечено наличие понижающих коэффициентов для узлов из высокопрочных сталей, что осложняет их применение в строительстве. Кроме того, сделан вывод о малой степени изученности работы узлов при действии изгибающего момента из плоскости конструкции.

Ключевые слова: сварные узлы, трубы прямоугольного сечения, расчет узлов, методики расчета, высокопрочные стали

Содержание

1.	Введение	99
2.	Основная часть	99
3.	Заключение	105

1. Введение

Трубчатые элементы обладают рядом преимуществ перед элементами с открытым профилем. Одним из таких преимуществ является их обтекаемая форма, позволяющая снизить ветровую нагрузку на конструкцию в целом. Гладкая внешняя поверхность труб (отсутствие углублений и щелей) создает условия для надежного естественного стока воды. Применение труб с замкнутым профилем также позволяет обеспечить более высокую стойкость конструкции к коррозии, так как они не имеют углов, в области которых у труб с открытым профилем возникает уменьшенная толщина антикоррозионного покрытия. Кроме того, значительно упрощается технология и стоимость антикоррозионной обработки за счет того, что защищать от коррозии требуется только внешнюю поверхность труб. Внутреннее пространство трубчатых элементов может быть использовано для устройства инженерных сетей, а также заполняться бетоном для увеличения прочностных свойств.

В настоящее время конструкции из трубчатых элементов активно проектируются архитекторами и инженерами. Сварные узлы из труб прямоугольного сечения широко применяются при строительстве различных сооружений, имеющих стальной каркас. Это обусловлено сочетанием в них отличных конструктивных характеристик, простоты реализации и привлекательного внешнего вида.

Изучение узлов из труб прямоугольного сечения началось в 60-е годы XX века и сопровождалось многочисленными экспериментами и теоретическими исследованиями. Первые эмпирические формулы для расчета на прочность сварных узлов из труб прямоугольного сечения были предложены в 1970-х годах Eastwood и Wood [1], а также Davie и Giddings [2]. В дальнейшем уравнения были уточнены в работах [3–5].

В данной статье представлен обзор проведенных на данный момент научных исследований несущей способности сварных узлов, а также методик расчета, в том числе использующихся в отечественной и зарубежной нормативной документации. Целью обзора является выявление достоинств и недостатков существующих на данный момент методик расчета сварных узлов из труб прямоугольного сечения.

2. Основная часть

Расчет с применением теории линий разрушения

Значительный рывок в изучении работы трубчатых узлов был совершен Wardenier [6], который предложил методику проектирования, основывающуюся на классической теории линий разрушения Йохансена [7]. Уравнения, предложенные Wardenier, в настоящее время применяются в методиках расчета, описанных в таких нормативных документах как: EN 1993-1-8:2005 [8], ISO 14346:2013 [9] и CIDECT Design Guide No.3 [10].

Уравнения Wardenier использовались в качестве основы в дальнейших исследованиях сварных узлов из труб прямоугольного сечения. Большое количество публикаций посвящено исследованию поведения сварных узлов из труб под действием момента в плоскости конструкции [11–15], а также осевой нагрузки. Davies и Crockett [16–21]. Также проводились экспериментальные исследования поведения Т-образных узлов из труб прямоугольного сечения под действием изгибающего момента и сосредоточенной силы [22]. Davies и Crockett [16] провели комплексное исследование узлов различных конфигураций из труб квадратного сечения, находящихся под воздействием пространственных нагрузок. Учеными даны рекомендации для корректировки существующих методов проектирования узловых соединений.

Большой вклад в изучение поведения сварных узлов из труб прямоугольного сечения внесен Yu [13]. Было проведено комплексное исследование поведения сварных узлов с плоским и пространственным расположением элементов, находящихся под воздействием как осевой нагрузки, так и изгибающих моментов.

Сварные узлы в большинстве случаев обладают конечной гибкостью. Учеными давно предложена идея определения предельного значения деформации, при котором происходит разрушение узла [23–25]. Предложенный Lu метод [25] определения предельной деформации применим лишь в отдельных случаях. Zhao в своей работе [26] опубликовал формулу, относящуюся к Т-образному типу узлов из прямоугольных труб.

В [27] предложена формула для нахождения крутильной жесткости Т-образных узлов из прямоугольных труб. Работа [28] также посвящена методам определения крутильной жесткости сварных Т-образных узлов. Авторы уточнили существующую методику нахождения данной характеристики в плоскости сечения, а также исследовали влияние нормальных напряжений в поясе узла.

Расчет с применением компонентного метода

Несмотря на то, что метод линий разрушения Йохансена позволил с высокой степенью точности рассчитывать прочность трубных узлов, со временем был найден его существенный недостаток: метод не позволял рассчитывать начальную жесткость узлов. При этом, было показано, что жесткость узлов играет ключевую роль при расчете трубных ферм [29–35]. Сварные узлы обладают конечной жесткостью, однако, зачастую при расчетах этой характеристикой пренебрегают, и считается, что элементы конструкции жестко или шарнирно соединены между собой. Большое количество исследований посвящено разработке методики учета жесткостей сварных узлов [25,29,30,32,36].

Решение проблемы расчета жесткости было найдено при помощи компонентного метода. Его суть заключается в том, что узел представляется в виде совокупности взаимодействующих между собой элементов – компонентов. В ходе расчета определяется несущая способность и изгибная жесткость каждого компонента. Исходя из полученных характеристик находятся прочность и жесткость самого узла. При вычислении величины предельной нагрузки предполагается, что усилия, воспринимаемые компонентами узла, не могут превышать их расчетное значение. Прочность и жесткость узла определяется с учетом прочностей и жесткостей его компонентов.

Компонентный метод был впервые предложен Zoetemeijer [37] для болтового соединения балки с колонной, и позже доработан Tschernegg [38]. Новый метод развивался в течение последних 30 лет применительно к различным конструкциям. В частности, компонентный метод был применен для узла примыкания стальной колонны к железобетонной плите [39], для узлов из высокопрочных сталей [40], был разработан 3D компонентный метод [41]. Также был предложен компонентный метод конечных элементов [42], который позволяет упростить процесс проектирования [43].

В нормативном документе EN 1993-1-8:2005 [8] содержатся основные правила для практического применения компонентного метода для расчета несущей способности и жесткости узлов конечной жесткости. Однако, метод предложен лишь для узлов из двутавров и не распространяется на трубные узлы.

Для расчета трубчатых конструкций использование компонентного метода было впервые предложено [44]. Прочностные и жесткостные характеристики компонентов были исследованы в работах [36,45–47]. Огромный вклад в развитие компонентного метода для трубчатых конструкций был сделан в работах [48,49], в которых разработана детальная процедура расчета прочности узлов. Однако, расчету жесткости трубчатых узлов уделено мало внимания.

Новые типы узлов

Существующие нормативные документы содержат простые и достаточно точные методики расчетов, что позволяет инженерам проектировать сварные узлы. Однако после появления новых конфигураций узлов и высокопрочных сталей возникла потребность в разработке новых методик расчета [50].

Примером нового типа узлов может служить сварной узел из прямоугольных труб, повернутых на 45° вокруг своей продольной оси. Данные узлы подразделяются на два вида: с поворотом только пояса (Рис. 1а) и с поворотом обоих элементов (Рис. 1б). Анализ подобных узлов и сравнения их с традиционным типом узла (Рис. 1в) было проведено в работах [51,52]. Исследования показали, что узлы различных конфигураций имеют разные механизмы разрушения. При одинаковых размерах сечений элементов прочность и жесткость узлов новых типов (Рис. 1а, б) больше, чем прочность и жесткость традиционного узла (Рис. 1в) [51,52].

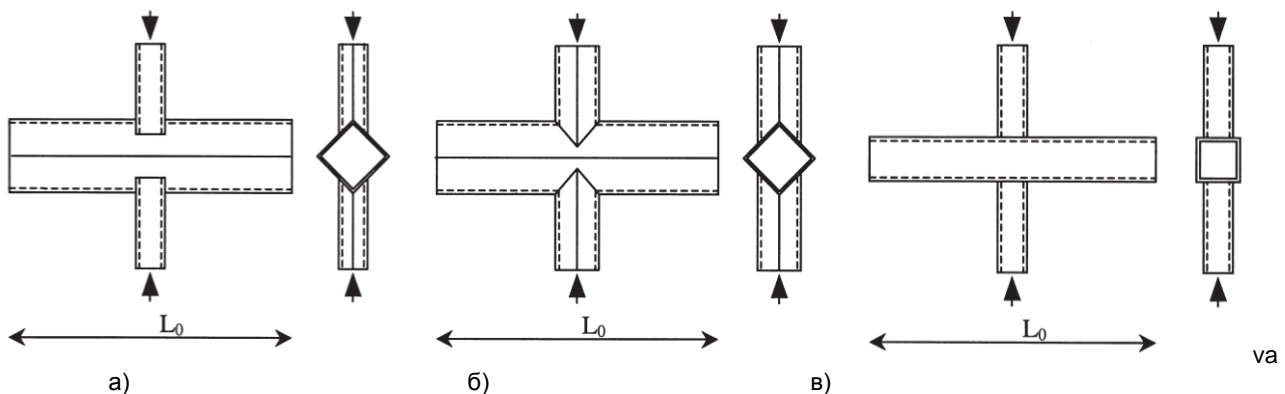


Рис. 1

Схемы исследуемых узлов **Ошибка! Источник ссылки не найден.**[54, с.256]

Крестообразный узел из труб квадратного сечения: а) – с поворотом сечения пояса; б) – с поворотом сечения всех элементов; в) – стандартный узел.

Учеными из Китая [53] были проведены экспериментальные исследования поведения сварных X-образных узлов традиционного и нового типов (Рис. 1), находящихся под действием момента из плоскости конструкции. Было проведено всестороннее параметрическое исследование для определения влияния геометрических характеристик на работу узлов, находящихся под действием изгибающего момента из плоскости конструкции. Учеными также доказано, что ориентация пояса оказывает сильное влияние на прочность и жесткость узлов и зависит от соотношения размеров сечения раскоса и пояса.

Другим направлением развития сварных трудных узлов являются узлы с заполнением из бетона. Такие узлы имеют большой потенциал применения в различного рода конструкциях и их поведение под нагрузкой

также нуждается в изучении. На данный момент проведены экспериментальные исследования сварных узлов с бетонным заполнением [54–57], однако, вопрос все же остается малоизученным.

Влияние сварных швов

При оценке несущей способности сварных узлов необходимо также принимать во внимание характеристики самого сварного шва: как его вид (Рис. 2) и геометрические размеры, так и материал [58,59].

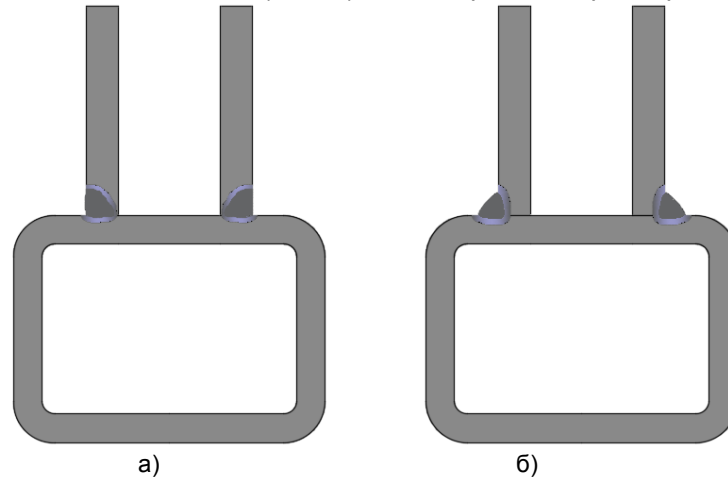


Рис. 2

Виды швов: а) – стыковой; б) – угловой

Изучению влияния изгибающего момента и его ориентации на прочность сварных швов посвящено исследование [60]. В работе [61] представлены и проанализированы результаты недавних исследований в этой области и предложены ключевые аспекты для проектирования сварных швов из ультра-высокопрочных сталей (с пределом текучести от 780 МПа).

На данный момент при проектировании узлов не учитывается упрочняющий эффект сварных швов. Авторами исследований [28,62] отмечено, что размеры сварного шва оказывают значительное влияние на поведение узлов, и подчеркнули необходимость учета данного параметра при проектировании. Авторами [63] проверялась корректность требований норм к толщине сварного шва соединения элементов из высокопрочных сталей, и было доказано, что данная величина в методиках расчета также завышена.

Высокопрочные стали

С развитием промышленности и технологий производства материалов на рынке появились стали с повышенными прочностными характеристиками. Как видно из названия, высокопрочные стали обладают более высоким значением предела текучести по сравнению с обычной сталью. На эту характеристику стоит обращать внимание, например, в случае нахождения конструкций под действием таких нагрузок, при которых возникают пластические деформации. При этом предъявляются высокие требования к пластичности материала.

Использование высокопрочных сталей снижает материалоемкость и вес конструкции. Однако экономия материала при использовании высокопрочных сталей не достигается из-за современных методик расчета, в которых заложены понижающие коэффициенты. В частности, в EN 1993-1-8:2005 расчетное сопротивление узлов, сваренных из элементов с пределом текучести больше 355 МПа, уменьшается введением дополнительного коэффициента 0,9. При использовании сталей с пределом текучести от 460 до 700 МПа в EN 1993-1-12:2007 вводится понижающий коэффициент 0,8. Таким образом, проектная прочность узлов занижается, что в конечном счете нивелирует выигрыш в прочности. Природа данных понижающих коэффициентов до сих пор не ясна. Предположительно, они были введены как следствие недостаточного количества испытаний данной области.

Некоторые ученые задались вопросом необходимости применения понижающих коэффициентов при расчете сварных узлов из высокопрочных сталей [59,64,65]. Основываясь на данных, полученных в ходе лабораторных испытаний, исследователями неоднократно отмечалось, что фактическая прочность узлов превышает расчетные значения, полученные как с учетом понижающего коэффициента, так и без него [66]. Такие выводы на основе испытаний сделаны в работе [63] для узлов из сталей марок S500 и S700, при использовании стали марки S960 применение понижающего коэффициента 0,8 оправдано.

Изучение влияния предела текучести материала сварки и степени проникновения шва в элемент на несущую способность стыкового сварного соединения образцов из сталей марок S700 и S960 показало, что существующие методики расчета дают результаты, сходные с экспериментальными [67]. Было также предложено использовать те же методики для сталей марки S960, но с введением соответствующих коэффициентов.

Поведение элементов из высокопрочных сталей также посвящены некоторые работы. Рядом ученых исследовалась устойчивость трубчатых элементов из ультра-высокопрочных сталей [68] – предложено новое значение предельной гибкости. В работе [69] проведено сравнение работы бесшовных и сваренных труб из стали с пределом текучести 1350 МПа.

Расчет трубных узлов по строительным нормам

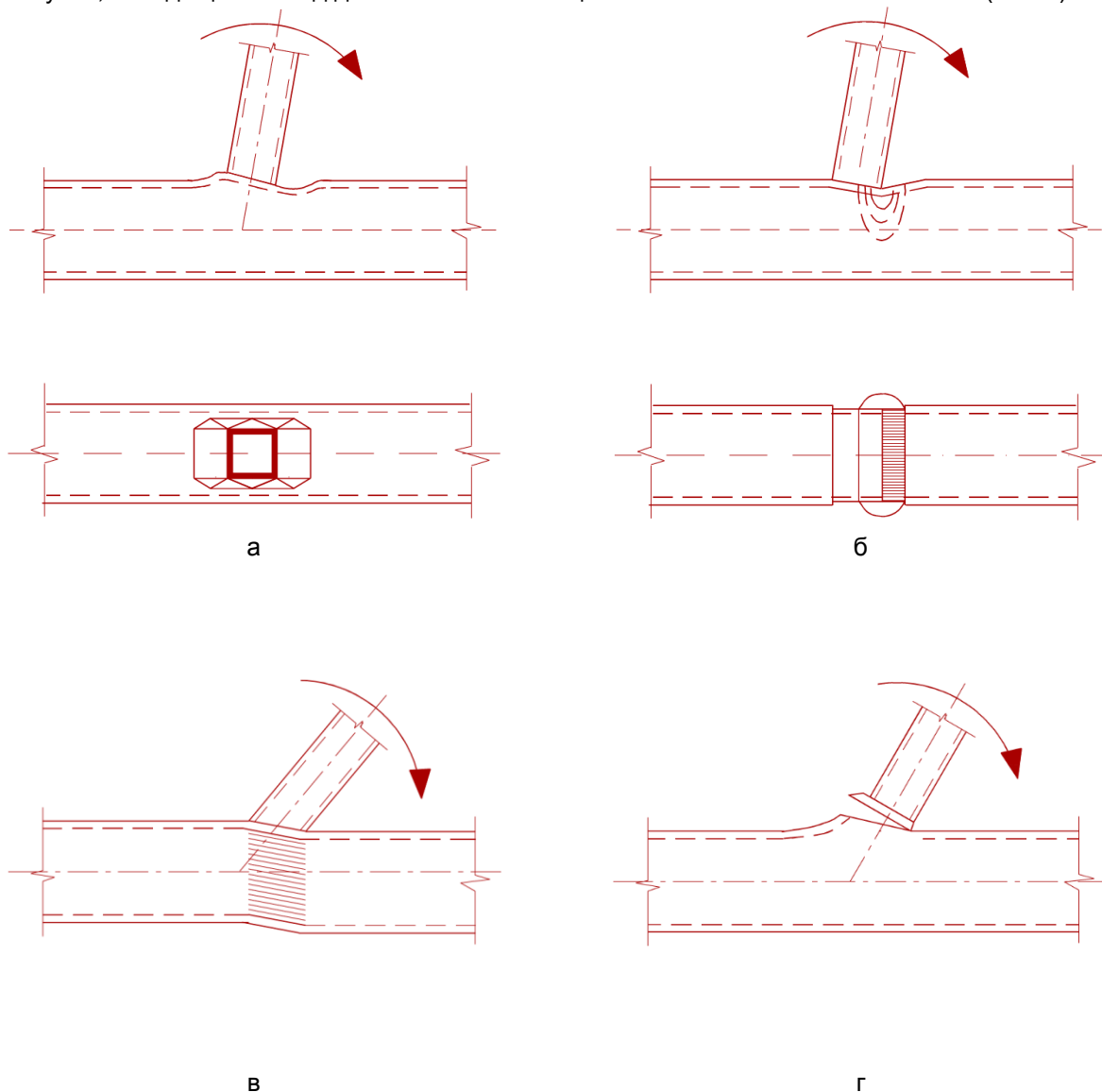
СП 294.1325800.2017 «Конструкции стальные. Правила проектирования» [70] – российский нормативный документ, содержащий методику расчета сварных узлов ферм из гнутосварных профилей. Согласно [70] следует проверять:

- несущую способность стенки (полки) пояса, к которой примыкает элемент решетки;
- несущую способность элемента решетки вблизи примыкания к поясу;
- прочность сварных швов.

В СП 294.1325800.2017 несущая способность узлов рассчитывается на комбинацию действия продольной силы и изгибающего момента в элементе решетки, действующего в плоскости конструкции, а действие изгибающего момента из плоскости узла не учитывается.

Зарубежные нормативные документы также регламентируют процесс проектирования сварных узлов. Согласно EN 1993-1-8:2005 [8], все сварные узлы классифицируются по жесткости на шарнирные, узлы с конечной жесткостью и жесткие.

Согласно EN 1993-1-8:2005 существует шесть моделей потери несущей способности сварного Т-образного узла, находящегося под действием изгибающего момента в плоскости сечения (Рис. 3).



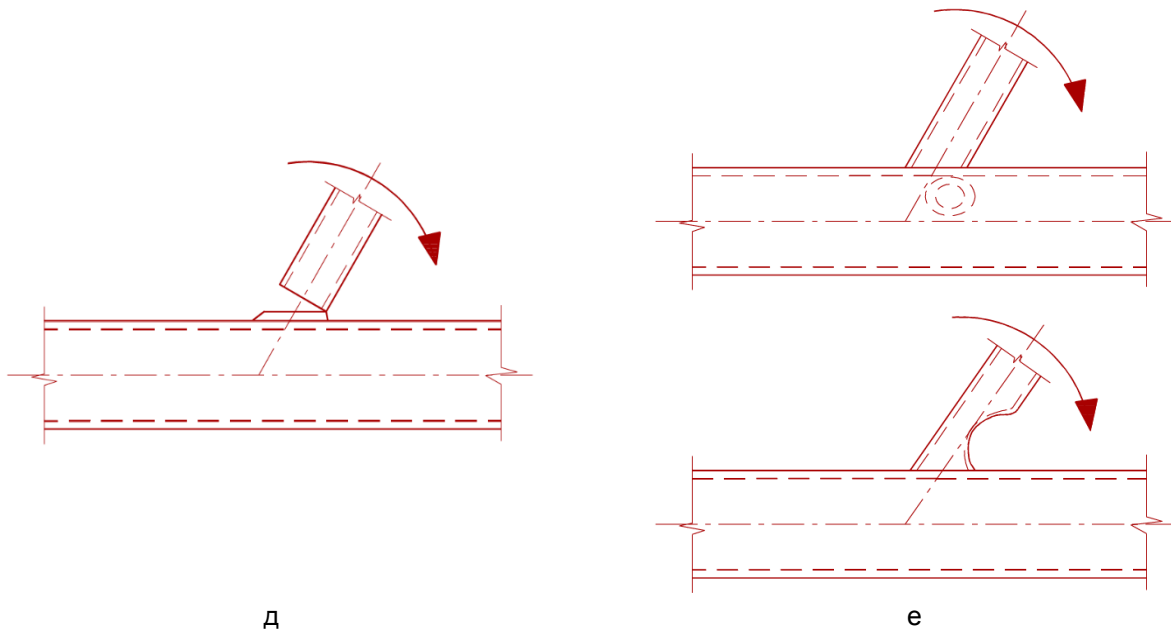


Рис. 3 – схема потери несущей способности сварного узла согласно EN 1993-1-8:2005:

- а) – потеря несущей способности полки пояса: местные пластические деформации; б) – потеря несущей способности стенки пояса: пластические деформации, трещины или потеря устойчивости; в) – разрушение при сдвиге;
- г) – появление трещин, приводящих к вырыву стойки (раскоса) из пояса;
- д) – потеря несущей способности стойки (возникновение трещин по сварному шву или стойке (раскосу)); е) – местная потеря устойчивости элементов.

В EN 1993-1-8:2005 представлены уравнения определения несущей способности для случаев приложения осевой нагрузки вдоль раскоса, а также изгибающих моментов в плоскости и из плоскости конструкции. При этом в случае нагружения узла моментом из плоскости сечения возможны только четыре формы разрушения (Рис. 3а, б, д), а также искривление пояса. Для каждой модели разрушения узла в EN 1993-1-8:2005 приведена соответствующая формула для определения расчетной несущей способности (Таблица 1). Как видно из Таблица 1, преобладание той или иной формы разрушения зависит от коэффициента β . В частности, для узлов с $\beta \leq 0,85$ характерна только потеря несущей способности полки пояса, для узлов с $0,85 \leq \beta \leq 1$ – потеря несущей способности стенки пояса и стойки. Искривление пояса характерно для всех узлов, независимо от β . Наименьшее из найденных значений предельного момента соответствует расчетной прочности всего сварного узла. Схожая методика расчета содержится в CIDECT Design Guide No. 3 [10].

Таблица 1

Расчет несущей способности Т-образного узла из прямоугольных труб при действии изгибающего момента из плоскости конструкции по EN 1993-1-8:2005

Модель потери несущей способности	Расчетная несущая способность узла
	$\beta \leq 0,85$
потеря несущей способности полки пояса (местные пластические деформации)	$M_{op,1,Rd} = k_n f_{y0} t_0^2 \left(\frac{h_1(1+\beta)}{2(1-\beta)} + \sqrt{\frac{2b_0b_1(1+\beta)}{1-\beta}} \right) / \gamma_{M5}$
	$0,85 \leq \beta \leq 1$
потеря несущей способности стенки пояса (пластические деформации, трещины или потеря устойчивости)	$M_{op,1,Rd} = f_{yk} t_0 (b_0 - t_0)(h_1 + 5t_0) / \gamma_{M5}$ $f_{yk} = f_{y0}$
искривление пояса	$M_{op,1,Rd} = f_{y1} (W_{p1,1} - 0,5(1 - b_{eff} / b_1)^2 b_1^2 t_1) / \gamma_{M5}$
	$0,85 \leq \beta \leq 1$
потеря несущей способности стойки (раскоса)	$M_{op,1,Rd} = 2f_{y0} t_0 (h_1 t_0 + b_0 h_0 t_0 (b_0 + h_0)) / \gamma_{M5}$

где:

- h_0 – высота сечения пояса;
- h_1 – высота сечения стойки;
- b_0 – ширина сечения пояса (из плоскости);
- b_1 – ширина сечения стойки (из плоскости);

b_{eff} – эффективная ширина стойки в месте крепления к поясу;
 β – отношение ширины стойки к ширине пояса;
 t_0 – толщина стенки сечения пояса;
 t_1 – толщина стенки сечения стойки;
 f_{y0} – предел текучести пояса;
 f_{y1} – предел текучести стойки;
 f_{yk} – для Т-образных узлов $f_{yk} = f_{y0}$;
 $W_{pl,1}$ – момент сопротивления сечения стойки;
 K_n – коэффициент, определяемый по таблице EN 1993-8-1:2005;
 γ_{M5} – коэффициент надежности при расчете узлов решетчатых ферм ($\gamma_{M5} = 1$);
 $M_{op,1,Rd}$ – расчетная несущая способность узла при действии момента из плоскости конструкции.

Метод конечных элементов

Так как проведение экспериментов над сварными узлами – достаточно сложный и дорогостоящий процесс, конечно-элементный анализ является альтернативным способом изучения сварных узлов. Он позволяет анализировать работу узлов при большом количестве изменений геометрических параметров узлов.

Первой опубликованной работой, посвященной численному моделированию сварного Т-образного узла, находящегося под воздействием статической осевой нагрузки, величина которой превышает предельное значение является [71]. При сравнении результатов численного и лабораторного экспериментов было выявлено соответствие между зависимостями деформаций узла от величины нагрузки, полученными двумя способами. В дальнейшем рядом ученых проводился конечно-элементный анализ трубчатых узлов различных конфигураций: исследовались узлы примыкания балок к колоннам круглого [72] и прямоугольного [73] сечения, сварные узлы из круглых труб [74], пространственные сварные узлы из труб прямоугольного сечения [75,76], при этом модели в основном создавались при помощи пластинчатых конечных элементов ввиду отсутствия достаточно больших компьютерных мощностей. Данный подход существует и в настоящее время, так как поведение сварных трубчатых узлов, находящихся под действием статической нагрузки, может быть достаточно точно смоделировано при помощи пластинчатых конечных элементов [77].

С развитием технологий стало возможным строить модели сварных узлов с использованием объемных конечных элементов. В частности, такие модели необходимы для определения концентрации напряжений при оценке усталостной прочности, а также в случаях, когда необходимо учесть физическую толщину стенок трубчатых элементов [77].

Авторами статьи [78] предложен метод моделирования узловых соединений при помощи балочных элементов. Такой способ позволяет упростить конечно-элементную модель, в то время как модели, построенные при помощи пластинчатых и твердотельных конечных элементов, требуют больших компьютерных мощностей. Кроме того, предложенный метод моделирования позволяет получить точные значения наиболее важных значений: напряжений, перемещений, реакций и собственной частоты соединений.

Сравнительный анализ методов определения прочности узлов на основе метода конечных элементов проведено в работе [79]. В статье [80] проведена оценка несущей способности Т-образного сварного трубчатого узла, находящегося под действием осевой нагрузки.

Учеными определено влияние на результаты конечно-элементного анализа узлов таких элементов как: длина элементов [51,81] и закрепление концов пояса [82].

Суррогатное моделирование

Часто в научной и инженерной практике встречаются задачи, для которых отсутствует аналитическое решение. Для подобных задач активно используется суррогатное моделирование [83–86].

Суррогатная модель создается на основе имеющихся данных, полученных экспериментально или численно, при этом сложная математическая функция заменяется более простой и обеспечивается возможность определения искомой неизвестной в любой точке. Таким образом, получается аппроксимация исходной зависимости, которая может быть быстро вычислена. Методология построения суррогатной модели более подробно описана в работе [87]. В случае, когда исходные данные для построения метамоделли получены с разной точностью (например, при проведении эксперимента и численного анализа), зависимости могут быть восстановлены при помощи модели регрессии на основе гауссовских процессов [88].

В частности, задачи оптимизации сварных трубных ферм требуют учета жесткости узлов [89–91]. Хотя в настоящее время есть аналитическое решение для вычисления жесткости Т-образных узлов, для сварных Y-узлов (с углом между элементами отличным от 90°) аналогичное решение отсутствует. Проведение сложных конечно-элементных расчетов требует больших компьютерных мощностей. Для подобных задач метод суррогатного моделирования позволяет значительно упростить расчет. Данный метод расчета, позволяющий рассчитывать жесткость сварных узлов, представлен в работах [92,93].

3. Заключение

В ходе работы были изучены существующие на данный момент методики расчета сварных узлов из труб прямоугольного сечения и выявлены их достоинства и недостатки. На основании проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

1. Главный недостаток расчета по методу линий разрушения Йохансена – пренебрежение конечной жесткостью сварных узлов. Нахождение жесткости узлов стало возможным с появлением компонентного метода.
2. Использование метода конечных элементов позволяет снизить трудоемкость и стоимость анализа поведения сварных узлов в зависимости от изменения большого количества параметров.
3. При помощи суррогатного моделирования также сокращается трудоемкость расчетов. В частности, данный метод является перспективным методом оптимизации строительных конструкций.
4. Содержащаяся в СП 294.1325800.2017 методика расчета сварных узлов не учитывает влияние изгибающего момента из плоскости конструкции. Зарубежные нормативные документы содержат четкие методики проектирования сварных узлов, учитывающие совместное действие на элементы продольной силы и изгибающих моментов в плоскости и из плоскости конструкции. Тем не менее, существует большое количество нерешенных проблем.
5. Обзор литературы показал, что на сегодняшний день проведено большое количество лабораторных испытаний сварных узлов из труб прямоугольного сечения, в том числе Т-образных. Большинство работ посвящены изучению поведения узлов, находящихся под действием осевой нагрузки, а также момента в плоскости конструкции, случай приложения изгибающего момента из плоскости узла изучен недостаточно.
6. Кроме того, существующие нормы регламентируют правила расчета лишь для узлов из обычных сталей – с пределом текучести до 355 МПа. На данный момент проведено малое количество исследований поведения сварных узлов из высокопрочных сталей (согласно EN 1993-1-8:2005 к ним относятся стали с пределом текучести от 460 МПа). По этой причине в методиках нормативных документов введены понижающие коэффициенты. Следствием этого является неэффективность использования в качестве материала конструкции высокопрочных сталей. Таким образом, существует необходимость дополнительного изучения сварных узлов из сталей высоких марок.

Литература

- [1]. Eastwood W., Wood A.A. The static strength of welded joints in structural hollow sections // Constr. Steelwork. 1971. Vol. 01. P. 6–20.
- [2]. Davie J., Giddings T.W. Research into the strength of welded lattice girder joints in structural hollow sections // CIDECT Rep. 5EC/71/7/E. 1971.
- [3]. Brockenbrough R.L. Strength of square-tube connections under combined loads // J. Struct. Div. 1972. Vol. 98, № 12. P. 2753–2768.
- [4]. Korol R.M., El-Zanaty M., Brady F.J. Unequal width connections of square hollow sections in Vierendeel trusses // Can. J. Civ. Eng. 1977. Vol. 4, № 2. P. 190–201.
- [5]. Kanatani H. et al. Bending tests on T-joints of RHS chord and RHS or H-shape branch // CIDECT Program. 5AF. 1981.
- [6]. Wardenier J. Hollow section joints. Ph.D thesis. Delft University of Technology. Delft, 1982.
- [7]. Johansen K.W. Yield line theory. Cement and Concrete Association. 1962. 181 p.
- [8]. European Committee for Standardization. Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-8: Design of joints (+ AC:2009) // NBN EN 1993-1-8. 2005.
- [9]. ISO 14346:2013. Static design procedure for welded hollow-section joints -- Recommendations, International Institute of Welding.
- [10]. Packer J.A. et al. Design guide for rectangular hollow section (RHS) joints under predominantly static loading. CIDECT Design Guide No. 3. 2nd ed., LSS Verlag. 2009.

References

- [1]. Eastwood W., Wood A.A. The static strength of welded joints in structural hollow sections // Constr. Steelwork. 1971. Vol. 01. P. 6–20.
- [2]. Davie J., Giddings T.W. Research into the strength of welded lattice girder joints in structural hollow sections // CIDECT Rep. 5EC/71/7/E. 1971.
- [3]. Brockenbrough R.L. Strength of square-tube connections under combined loads // J. Struct. Div. 1972. Vol. 98, № 12. P. 2753–2768.
- [4]. Korol R.M., El-Zanaty M., Brady F.J. Unequal width connections of square hollow sections in Vierendeel trusses // Can. J. Civ. Eng. 1977. Vol. 4, № 2. P. 190–201.
- [5]. Kanatani H. et al. Bending tests on T-joints of RHS chord and RHS or H-shape branch // CIDECT Program. 5AF. 1981.
- [6]. Wardenier J. Hollow section joints. Ph.D thesis. Delft University of Technology. Delft, 1982.
- [7]. Johansen K.W. Yield line theory. Cement and Concrete Association. 1962. 181 p.
- [8]. European Committee for Standardization. Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-8: Design of joints (+ AC:2009) // NBN EN 1993-1-8. 2005.
- [9]. ISO 14346:2013. Static design procedure for welded hollow-section joints -- Recommendations, International Institute of Welding.
- [10]. Packer J.A. et al. Design guide for rectangular hollow section (RHS) joints under predominantly static loading. CIDECT Design Guide No. 3. 2nd ed., LSS Verlag. 2009.
- [11]. Tabuchi M., Kanatani H., Kamba T. The local strength of welded RHS T joints subjected to bending moment // CIDECT Rep. 5AF-84/5E, Boston, Massachusetts Int. Inst. Weld.

- [11]. Tabuchi M., Kanatani H., Kamba T. The local strength of welded RHS T joints subjected to bending moment // CIDECT Rep. 5AF-84/5E, Boston, Massachusetts Int. Inst. Weld.
- [12]. Szlendak J. Beam-column welded RHS connections // Thin-Walled Struct. 1991. Vol. 12, № 1. P. 63–80.
- [13]. Yu Y. The static strength of uniplanar and multiplanar connections in rectangular hollow sections. Doctoral dissertation. Delft University of Technology. Delft, 1997.
- [14]. Wardenier J. et al. Hollow sections in structural applications. 2010. 232 p.
- [15]. Packer J.A. Moment connections between rectangular hollow sections // J. Constr. Steel Res. 1993. Vol. 25, № 1–2. P. 63–81.
- [16]. Davies G., Crockett P. The Strength of Welded T-DT Joints in Rectangular and Circular Hollow Section under Variable Axial Loads // J. Constr. Steel Res. 1996. Vol. 37, № 1. P. 1–31.
- [17]. Feng R., Young B. Experimental investigation of cold-formed stainless steel tubular T-joints // Thin-Walled Struct. 2008.
- [18]. Feng R., Young B. Tests and behaviour of cold-formed stainless steel tubular X-joints // Thin-Walled Struct. 2010.
- [19]. Pandey M., Young B. High strength steel tubular X-joints—an experimental insight under axial compression // Tubular Structures XVI. 2019.
- [20]. Zhao X., Hancock G.J. T-Joints in Rectangular Hollow Sections Subject to Combined Actions // J. Struct. Eng. 2007.
- [21]. da C. Neves L.F. et al. Experimental and numerical assessment of RHS T-joints subjected to brace and chord axial forces // Steel Constr. 2016.
- [22]. Zhao X.-L., Hancock G.J. T-joints in rectangular hollow sections subject to combined bending and concentrated force // Research Report - University of Sydney, School of Civil and Mining Engineering. 1990.
- [23]. Yura J.A., Zettlemoyer N., Edwards I.F. Ultimate capacity equations for tubular joints // Offshore Technol. Conf. 1980. № 3690. P. 113–125.
- [24]. Korol R.M., Mirza F.A. Finite element analysis of RHS T-joints // J. Struct. Div. ASCE. 1982. Vol. 108, № 9. P. 2081–2098.
- [25]. Lu L.H. et al. Deformation limit for the ultimate strength of hollow section joints // Proc. Sixth Int. Symp. Tubul. Struct. Tubul. Struct. VI. 1994. P. 341–347.
- [26]. Zhao X.L. Deformation limit and ultimate strength of welded T-joints in cold-formed RHS sections // J. Constr. Steel Res. 2000. Vol. 53, № 2. P. 149–165.
- [27]. Grotmann D., Sedlacek G. Rotational stiffness of welded RHS beam-to-column joints // Cidect 5BB-8/98, Aachen: RWTH-Aachen. 1998.
- [28]. Garifullin M. et al. Initial in-plane rotational stiffness of welded RHS T joints with axial force in main member // J. Constr. Steel Res. 2017. Vol. 139. P. 353–362.
- [29]. Hoshyari I. Dynamic investigation of semi-rigid tubular T-joints. PhD degree thesis. Department of Civil and Mining Engineering, University of Wollongong. 1993. 209 p.
- [30]. Saidani M. Joint flexibility in rectangular hollow section trusses. PhD thesis. The Department of Civil Engineering, The University of Nottingham. 1991. 274 p.
- [31]. Jaspert J.-P. Etude de la semi-rigidité des noeuds poutre-colonne et son influence sur la résistance et la stabilité des ossatures en acier. Doctor of Science thesis. University of Liège (in French), 1991.
- [12]. Szlendak J. Beam-column welded RHS connections // Thin-Walled Struct. 1991. Vol. 12, № 1. P. 63–80.
- [13]. Yu Y. The static strength of uniplanar and multiplanar connections in rectangular hollow sections. Doctoral dissertation. Delft University of Technology. Delft, 1997.
- [14]. Wardenier J. et al. Hollow sections in structural applications. 2010. 232 p.
- [15]. Packer J.A. Moment connections between rectangular hollow sections // J. Constr. Steel Res. 1993. Vol. 25, № 1–2. P. 63–81.
- [16]. Davies G., Crockett P. The Strength of Welded T-DT Joints in Rectangular and Circular Hollow Section under Variable Axial Loads // J. Constr. Steel Res. 1996. Vol. 37, № 1. P. 1–31.
- [17]. Feng R., Young B. Experimental investigation of cold-formed stainless steel tubular T-joints // Thin-Walled Struct. 2008.
- [18]. Feng R., Young B. Tests and behaviour of cold-formed stainless steel tubular X-joints // Thin-Walled Struct. 2010.
- [19]. Pandey M., Young B. High strength steel tubular X-joints—an experimental insight under axial compression // Tubular Structures XVI. 2019.
- [20]. Zhao X., Hancock G.J. T-Joints in Rectangular Hollow Sections Subject to Combined Actions // J. Struct. Eng. 2007.
- [21]. da C. Neves L.F. et al. Experimental and numerical assessment of RHS T-joints subjected to brace and chord axial forces // Steel Constr. 2016.
- [22]. Zhao X.-L., Hancock G.J. T-joints in rectangular hollow sections subject to combined bending and concentrated force // Research Report - University of Sydney, School of Civil and Mining Engineering. 1990.
- [23]. Yura J.A., Zettlemoyer N., Edwards I.F. Ultimate capacity equations for tubular joints // Offshore Technol. Conf. 1980. № 3690. P. 113–125.
- [24]. Korol R.M., Mirza F.A. Finite element analysis of RHS T-joints // J. Struct. Div. ASCE. 1982. Vol. 108, № 9. P. 2081–2098.
- [25]. Lu L.H. et al. Deformation limit for the ultimate strength of hollow section joints // Proc. Sixth Int. Symp. Tubul. Struct. Tubul. Struct. VI. 1994. P. 341–347.
- [26]. Zhao X.L. Deformation limit and ultimate strength of welded T-joints in cold-formed RHS sections // J. Constr. Steel Res. 2000. Vol. 53, № 2. P. 149–165.
- [27]. Grotmann D., Sedlacek G. Rotational stiffness of welded RHS beam-to-column joints // Cidect 5BB-8/98, Aachen: RWTH-Aachen. 1998.
- [28]. Garifullin M. et al. Initial in-plane rotational stiffness of welded RHS T joints with axial force in main member // J. Constr. Steel Res. 2017. Vol. 139. P. 353–362.
- [29]. Hoshyari I. Dynamic investigation of semi-rigid tubular T-joints. PhD degree thesis. Department of Civil and Mining Engineering, University of Wollongong. 1993. 209 p.
- [30]. Saidani M. Joint flexibility in rectangular hollow section trusses. PhD thesis. The Department of Civil Engineering, The University of Nottingham. 1991. 274 p.
- [31]. Jaspert J.-P. Etude de la semi-rigidité des noeuds poutre-colonne et son influence sur la résistance et la stabilité des ossatures en acier. Doctor of Science thesis. University of Liège (in French), 1991.
- [32]. Leston-Jones L. The influence of semi-rigid connections on the performance of steel framed structures in fire. PhD thesis. University of Sheffield, 1997. 405 p.
- [33]. Haakana Ä. In-Plane Buckling and Semi-Rigid Joints of Tubular High Strength Steel Trusses. Master of Science Thesis. Tampere University of Technology, 2014. 94 p.

- [32]. Leston-Jones L. The influence of semi-rigid connections on the performance of steel framed structures in fire. PhD thesis. University of Sheffield, 1997. 405 p.
- [33]. Haakana Å. In-Plane Buckling and Semi-Rigid Joints of Tubular High Strength Steel Trusses. Master of Science Thesis. Tampere University of Technology, 2014. 94 p.
- [34]. Boel H. Buckling Length Factors of Hollow Section Members in Lattice Girders. Master of Science thesis. Department of the Built Environment. Eindhoven University of Technology. Eindhoven, 2010. 412 p.
- [35]. Snijder H.H. et al. Buckling length factors for welded lattice girders with hollow section braces and chords // Proc. Eurosteel 2011. P. 1881 – 1886.
- [36]. Jaspart J.-P. Etude de la semi-rigidité des noeuds poutre-colonne et son influence sur la résistance et la stabilité des ossatures en acier. Doctor of Science thesis. University of Liège (in French), 1991. 650 p.
- [37]. Zoetemeijer P. A design method for the tension side of statically loaded, bolted beam-to-column connections // Heron. 1974. Vol. 20, № 1. P. 1–59.
- [38]. Tschemmerneegg F. et al. Zur Nachgiebigkeit von Rahmenknoten – Teil 1 // Stahlbau. 1987. Vol. 56, № 10. P. 299–306 (in German).
- [39]. Wald F., Sokol Z., Steenhuis M. Proposal of the stiffness design model of the column bases // Connections in Steel Structures III. 1996. 249-258 p.
- [40]. Girão Coelho A.M., Bijlaard F.S.K. Experimental behaviour of high strength steel end-plate connections // J. Constr. Steel Res. 2007. Vol. 63, № 9. P. 1228–1240.
- [41]. Simões da Silva L. Towards a consistent design approach for steel joints under generalized loading // Constr. Steel Res. 2008. Vol. 64, № 9. P. 1059–1075.
- [42]. Heinisuo M., Laasonen M., Ronni H. Integration of joint design of steel structures using product model // Proc. Int. Conf. Comput. Civ. Build. Eng. ICCBE. Nottingham. UK. 2010. P. 323–328.
- [43]. Wald F. et al. Structural Analysis and Design of Steel Connections Using Component-Based Finite Element Model // J. Civ. Eng. Archit. 2015. Vol. 9, № 8. P. 895–901.
- [44]. Weynand K., Jaspart J.-P. Extension of the component method to joints in tubular construction // Proc. 9th Int. Symp. Tubul. Struct. Dusseld. 2001. P. 517–524.
- [45]. Silva L.A.P., Neves L.F.N., Gomes F.C.T. Rotational stiffness of rectangular hollow sections composite joints // J. Struct. Eng. 2003. Vol. 129, № 4. P. 487–494.
- [46]. Málaga-Chuquitaype C., Elghazouli A.Y. Component-based mechanical models for blind-bolted angle connections // Eng. Struct. 2010.
- [47]. Málaga-Chuquitaype C., Elghazouli A.Y. Component-based mechanical models for blind-bolted angle connections // Eng. Struct. 2010. Vol. 32, № 10. P. 3048–3067.
- [48]. Jaspart J.-P. et al. Development of a full consistent design approach for bolted and welded joints in building frames and trusses between steel members made of hollow and / or open sections – Application of the component method. Volume 1 – Practical guidelines // CIDECT Rep. 5BP-4/05. 2005.
- [49]. Weynand K. et al. Component method for tubular joints // CIDECT Rep. 16F – 3/15. 2015.
- [50]. Shi G., Hu F., Shi Y. Recent research advances of high strength steel structures and codification of design specification in China // Int. J. Steel Struct. 2014.
- [51]. Owen J.S., Davies G., Kelly R.B. The influence of member orientation on the resistance of cross joints in square RHS construction // J. Constr. Steel Res. 2001. Vol. 57, № 3. P. 253–278.
- [52]. Christitsas A.D. et al. FEM analysis of conventional and square bird-beak SHS joint subject to in-plane bending moment - experimental study // J. Constr. Steel Res. 2007. Vol. 63, № 10. P. 1361–1372.
- [53]. Chen Y., Feng R., Wang J. Behaviour of bird-beak square hollow section X-joints under out-of-plane bending // J.

- square RHS construction // *J. Constr. Steel Res.* 2001. Vol. 57, № 3. P. 253–278.
- [52]. Christitsas A.D. et al. FEM analysis of conventional and square bird-beak SHS joint subject to in-plane bending moment - experimental study // *J. Constr. Steel Res.* 2007. Vol. 63, № 10. P. 1361–1372.
- [53]. Chen Y., Feng R., Wang J. Behaviour of bird-beak square hollow section X-joints under out-of-plane bending // *J. Constr. Steel Res.* Elsevier Ltd, 2015. Vol. 106. P. 234–245.
- [54]. Xu F., Chen J., Jin W.L. Experimental investigation of SCF distribution for thin-walled concrete-filled CHS joints under axial tension loading // *Thin-Walled Struct.* 2015. Vol. 93. P. 149–157.
- [55]. Hou C., Han L.-H. Analytical behaviour of CFDST chord to CHS brace composite K-joints // *J. Constr. Steel Res.* 2017. Vol. 128. P. 618–632.
- [56]. Feng R., Young B. Tests of concrete-filled stainless steel tubular T-joints // *J. Constr. Steel Res.* Elsevier, 2008. Vol. 64, № 11. P. 1283–1293.
- [57]. Feng R., Young B. Behaviour of concrete-filled stainless steel tubular X-joints subjected to compression // *Thin-Walled Struct.* Elsevier, 2009. Vol. 47, № 4. P. 365–374.
- [58]. Khurshid M., Barsoum Z., Mumtaz N.A. Ultimate strength and failure modes for fillet welds in high strength steels // *Mater. Des.* 2012. Vol. 40. P. 36–42.
- [59]. Pirinen M. The effects of welding heat input on the usability of high strength steels in welded structures. Doctor of Science thesis. Lappeenranta University of Technology. Lappeenranta, 2013. 178 p.
- [60]. Tuominen N., Björk T., Ahola A. Effect of bending moment on capacity of fillet weld // 16th Int. Symp. Tubul. Struct. (ISTS 2017), Melbourne, Aust. 2017.
- [61]. Björk T., Ahola A., Tuominen N. On the design of fillet welds made of ultra-high-strength steel // *Weld. World.* 2018. Vol. 62, № 5. P. 985–995.
- [62]. Havula J. et al. Moment-rotation behavior of welded tubular high strength steel T joint // *Eng. Struct.* 2018. Vol. 172, № 523–537.
- [63]. Feldmann M. et al. Rules on high strength steel. Publications Office of the European Union. Luxembourg, 2016.
- [64]. Zhao X.-L., Heidarpour A., Gardner L. Recent developments in high-strength and stainless steel tubular members and connections // *Steel Constr.* 2014.
- [65]. Javidan F. et al. Effect of weld on the mechanical properties of high strength and ultra-high strength steel tubes in fabricated hybrid sections // *Eng. Struct.* 2016.
- [66]. Günther H.-P. et al. Welded connections of high-strength steels for the building industry // *Weld. World.* 2012. Vol. 56, № 5–6. P. 86–106.
- [67]. Khurshid M., Barsoum Z., Barsoum I. Load Carrying Capacities of Butt Welded Joints in High Strength Steels // *J. Eng. Mater. Technol.* 2015. Vol. 137, № 4.
- [68]. Jiao H., Zhao X.L. Imperfection, residual stress and yield slenderness limit of very high strength (VHS) circular steel tubes // *J. Constr. Steel Res.* 2003. Vol. 59, № 2. P. 233–249.
- [69]. Jiao H., Zhao X.L., Lau A. Hardness and compressive capacity of longitudinally welded very high strength steel tubes // *J. Constr. Steel Res.* 2015. Vol. 114. P. 405–416.
- [70]. СП 294.1325800.2017 Конструкции стальные. Правила проектирования.- М.: Стандартиформ, 2017.-158 с.
- Constr. Steel Res.* Elsevier Ltd, 2015. Vol. 106. P. 234–245.
- [54]. Xu F., Chen J., Jin W.L. Experimental investigation of SCF distribution for thin-walled concrete-filled CHS joints under axial tension loading // *Thin-Walled Struct.* 2015. Vol. 93. P. 149–157.
- [55]. Hou C., Han L.-H. Analytical behaviour of CFDST chord to CHS brace composite K-joints // *J. Constr. Steel Res.* 2017. Vol. 128. P. 618–632.
- [56]. Feng R., Young B. Tests of concrete-filled stainless steel tubular T-joints // *J. Constr. Steel Res.* Elsevier, 2008. Vol. 64, № 11. P. 1283–1293.
- [57]. Feng R., Young B. Behaviour of concrete-filled stainless steel tubular X-joints subjected to compression // *Thin-Walled Struct.* Elsevier, 2009. Vol. 47, № 4. P. 365–374.
- [58]. Khurshid M., Barsoum Z., Mumtaz N.A. Ultimate strength and failure modes for fillet welds in high strength steels // *Mater. Des.* 2012. Vol. 40. P. 36–42.
- [59]. Pirinen M. The effects of welding heat input on the usability of high strength steels in welded structures. Doctor of Science thesis. Lappeenranta University of Technology. Lappeenranta, 2013. 178 p.
- [60]. Tuominen N., Björk T., Ahola A. Effect of bending moment on capacity of fillet weld // 16th Int. Symp. Tubul. Struct. (ISTS 2017), Melbourne, Aust. 2017.
- [61]. Björk T., Ahola A., Tuominen N. On the design of fillet welds made of ultra-high-strength steel // *Weld. World.* 2018. Vol. 62, № 5. P. 985–995.
- [62]. Havula J. et al. Moment-rotation behavior of welded tubular high strength steel T joint // *Eng. Struct.* 2018. Vol. 172, № 523–537.
- [63]. Feldmann M. et al. Rules on high strength steel. Publications Office of the European Union. Luxembourg, 2016.
- [64]. Zhao X.-L., Heidarpour A., Gardner L. Recent developments in high-strength and stainless steel tubular members and connections // *Steel Constr.* 2014.
- [65]. Javidan F. et al. Effect of weld on the mechanical properties of high strength and ultra-high strength steel tubes in fabricated hybrid sections // *Eng. Struct.* 2016.
- [66]. Günther H.-P. et al. Welded connections of high-strength steels for the building industry // *Weld. World.* 2012. Vol. 56, № 5–6. P. 86–106.
- [67]. Khurshid M., Barsoum Z., Barsoum I. Load Carrying Capacities of Butt Welded Joints in High Strength Steels // *J. Eng. Mater. Technol.* 2015. Vol. 137, № 4.
- [68]. Jiao H., Zhao X.L. Imperfection, residual stress and yield slenderness limit of very high strength (VHS) circular steel tubes // *J. Constr. Steel Res.* 2003. Vol. 59, № 2. P. 233–249.
- [69]. Jiao H., Zhao X.L., Lau A. Hardness and compressive capacity of longitudinally welded very high strength steel tubes // *J. Constr. Steel Res.* 2015. Vol. 114. P. 405–416.
- [70]. SP 294.1325800.2017 Konstruksii stalnyye. Pravila proyektirovaniya.- M.: Standartinform, 2017.-158 s.
- [71]. Puthli R. Geometrical non-linearity in collapse analysis of thick shells, with application to tubular joints // *Heron.* 1981. Vol. 26, № 2. P. 1–31.
- [72]. de Winkel G.D. The static strength of I-beam to circular hollow section column connections. PhD thesis. Delft University of Technology, Delft, The Netherlands. 1998. 230 p.
- [73]. Lu L.H. The static strength of I-beam to rectangular hollow section column connections. PhD thesis. Delft University of Technology, Delft, The Netherlands. 1997. 206 p.
- [74]. Makino Y., Kurobane Y., Ochi K. Ultimate capacity of tubular double K-joints // *Weld. Tubul. Struct. Proc. Second*

- [71]. Puthli R. Geometrical non-linearity in collapse analysis of thick shells, with application to tubular joints // *Heron*. 1981. Vol. 26, № 2. P. 1–31.
- [72]. de Winkel G.D. The static strength of I-beam to circular hollow section column connections. PhD thesis. Delft University of Technology, Delft, The Netherlands. 1998. 230 p.
- [73]. Lu L.H. The static strength of I-beam to rectangular hollow section column connections. PhD thesis. Delft University of Technology, Delft, The Netherlands. 1997. 206 p.
- [74]. Makino Y., Kurobane Y., Ochi K. Ultimate capacity of tubular double K-joints // *Weld. Tubul. Struct. Proc.* Second Int. Conf. Held Boston, Massachusetts, USA. Pergamon, 1984. P. 451–458.
- [75]. Liu D. et al. Static strength of multiplanar DX joints in rectangular hollow sections // *Proc. 5th Int. Symp. Tubul. Struct.* Nottingham, UK. 1993. Vol. E&FN Spon., P. 419–428.
- [76]. van der Vegte G.J. et al. Numerical simulation of experiments on multiplanar tubular steel X-joints // *Int. J. Offshore Polar Eng.* 1991. Vol. 1, № 3. P. 200–207.
- [77]. Vegte G.J. van der, Wardenier J., Puthli R.S. FE analysis for welded hollow-section joints and bolted joints // *Proc. Inst. Civ. Eng. - Struct. Build.* 2010. Vol. 163, № 6. P. 427–437.
- [78]. Moazed R., Fotouhi R., Szyszkowski W. Out-of-plane behaviour and FE modelling of a T-joint connection of thin-walled square tubes // *Thin-Walled Struct.* 2012. Vol. 51. P. 87–98.
- [79]. Kostaski N., Packer J.A., Puthli R.. A finite element method based yield load determination procedure for hollow structural section connections // *J. Constr. Steel Res.* 2003. Vol. 59, № 4. P. 453–471.
- [80]. de Matos R.M.M.P. et al. Resistance and elastic stiffness of RHS “T” joints: part I - axial brace loading // *Lat. Am. J. Solid Struct.* 2015. Vol. 12, № 11. P. 2159–2179.
- [81]. van der Vegte G.J., Makino Y. Further research on chord length and boundary conditions of CHS T- and X-joints // *Adv. Steel Constr.* 2010. Vol. 6, № 3. P. 879–890.
- [82]. Packer J. et al. Discussion on the paper “Experimental and numerical assessment of RHS T-joints subjected to brace and chord axial forces”, by Nizer et al., *Steel Construction* 9 (2016), No. 4, pages 315–322 // *Steel Constr.* 2017. Vol. 10, № 1. P. 89–90.
- [83]. Grihon S. et al. Surrogate Modeling of Stability Constraints for Optimization of Composite Structures // *Surrog. Model. Optim.* 2013. P. 359–391.
- [84]. Koziel S., Leifsson L. *Surrogate-Based Modeling and Optimization: Applications in Engineering*. Springer New York, 2013. 412 p.
- [85]. Roux W.J., Stander N., Haftka R.T. Response surface approximations for structural optimization // *Int. J. Numer. Methods Eng.* 1998.
- [86]. Queipo N. V. et al. Surrogate-based analysis and optimization // *Progress in Aerospace Sciences*. 2005.
- [87]. Бурнаев Е.В., Приходько П.В. Методология построения суррогатных моделей для аппроксимации пространственно неоднородных функций // *ТРУДЫ МФТИ*. 2012. Vol. 4 (1). P. 1–14.
- [88]. Бурнаев Е.В., Зайцев А.А. Суррогатное моделирование разноточных данных в случае выборки большого размера // *Информационные процессы*. 2015. Vol. 15 (1). P. 97–109.
- Int. Conf. Held Boston, Massachusetts, USA. Pergamon, 1984. P. 451–458.
- [75]. Liu D. et al. Static strength of multiplanar DX joints in rectangular hollow sections // *Proc. 5th Int. Symp. Tubul. Struct.* Nottingham, UK. 1993. Vol. E&FN Spon., P. 419–428.
- [76]. van der Vegte G.J. et al. Numerical simulation of experiments on multiplanar tubular steel X-joints // *Int. J. Offshore Polar Eng.* 1991. Vol. 1, № 3. P. 200–207.
- [77]. Vegte G.J. van der, Wardenier J., Puthli R.S. FE analysis for welded hollow-section joints and bolted joints // *Proc. Inst. Civ. Eng. - Struct. Build.* 2010. Vol. 163, № 6. P. 427–437.
- [78]. Moazed R., Fotouhi R., Szyszkowski W. Out-of-plane behaviour and FE modelling of a T-joint connection of thin-walled square tubes // *Thin-Walled Struct.* 2012. Vol. 51. P. 87–98.
- [79]. Kostaski N., Packer J.A., Puthli R.. A finite element method based yield load determination procedure for hollow structural section connections // *J. Constr. Steel Res.* 2003. Vol. 59, № 4. P. 453–471.
- [80]. de Matos R.M.M.P. et al. Resistance and elastic stiffness of RHS “T” joints: part I - axial brace loading // *Lat. Am. J. Solid Struct.* 2015. Vol. 12, № 11. P. 2159–2179.
- [81]. van der Vegte G.J., Makino Y. Further research on chord length and boundary conditions of CHS T- and X-joints // *Adv. Steel Constr.* 2010. Vol. 6, № 3. P. 879–890.
- [82]. Packer J. et al. Discussion on the paper “Experimental and numerical assessment of RHS T-joints subjected to brace and chord axial forces”, by Nizer et al., *Steel Construction* 9 (2016), No. 4, pages 315–322 // *Steel Constr.* 2017. Vol. 10, № 1. P. 89–90.
- [83]. Grihon S. et al. Surrogate Modeling of Stability Constraints for Optimization of Composite Structures // *Surrog. Model. Optim.* 2013. P. 359–391.
- [84]. Koziel S., Leifsson L. *Surrogate-Based Modeling and Optimization: Applications in Engineering*. Springer New York, 2013. 412 p.
- [85]. Roux W.J., Stander N., Haftka R.T. Response surface approximations for structural optimization // *Int. J. Numer. Methods Eng.* 1998.
- [86]. Queipo N. V. et al. Surrogate-based analysis and optimization // *Progress in Aerospace Sciences*. 2005.
- [87]. Burnayev Ye.V., Prikhodko P.V. Metodologiya postroyeniya surrogatnykh modeley dlya approksimatsii prostranstvenno neodnorodnykh funktsiy // *TRUDY MFTI*. 2012. Vol. 4 (1). P. 1–14.
- [88]. Burnayev Ye.V., Zaytsev A.A. Surrogatnoye modelirovaniye raznotochnykh dannyykh v sluchaye vyborok bolshogo razmera // *Informatsionnyye protsessy*. 2015. Vol. 15 (1). P. 97–109.
- [89]. Diaz C. et al. Optimum design of semi-rigid connections using metamodels // *J. Constr. Steel Res.* 2012. Vol. 78. P. 97–106.
- [90]. Stavroulakis G.E. et al. A neural network approach to the modelling, calculation and identification of semi-rigid connections in steel structures // *J. Constr. Steel Res.* 1997. Vol. 44, № 1–2. P. 91–105.
- [91]. de Lima L.R.O. et al. Neural networks assessment of beam-to-column joints // *J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng.* 2005. Vol. 27, № 3. P. 314–324.
- [92]. Garifullin M. et al. Effect of Fillet Welds on Initial Rotational Stiffness of Welded Tubular Joints // *Procedia Eng.* 2016. Vol. 165. P. 1643–1650.
- [93]. Heinisuo M. et al. Surrogate model for rotational stiffness of welded tubular Y-joints // *Proc. METNET Semin.* 2015 Budapest. 2015. P. 18–39.

- [89]. Díaz C. et al. Optimum design of semi-rigid connections using metamodels // J. Constr. Steel Res. 2012. Vol. 78. P. 97–106.
- [90]. Stavroulakis G.E. et al. A neural network approach to the modelling, calculation and identification of semi-rigid connections in steel structures // J. Constr. Steel Res. 1997. Vol. 44, № 1–2. P. 91–105.
- [91]. de Lima L.R.O. et al. Neural networks assessment of beam-to-column joints // J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng. 2005. Vol. 27, № 3. P. 314–324.
- [92]. Garifullin M. et al. Effect of Fillet Welds on Initial Rotational Stiffness of Welded Tubular Joints // Procedia Eng. 2016. Vol. 165. P. 1643–1650.
- [93]. 93. Heinisuo M. et al. Surrogate model for rotational stiffness of welded tubular Y-joints // Proc. METNET Semin. 2015 Budapest. 2015. P. 18–39.

Васильева, Е. И., Гарифуллин М.Р. Несущая способность сварных узлов из труб прямоугольного сечения // Alfabuild. 2019. № 5 (12). С. 98-111.

Vasileva, E., Garifullin, M. Resistance of welded RHS Alfabuild. 2019. 5 (12). Pp. 98-111. (rus)

Resistance of welded RHS joints

Ekaterina Vasileva¹ Marsel Garifullin²

¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia

² University Of Tampere, Finland, Tampere, Kalevantie, 4

Article info

review article

Abstract

Welded tubular structures are used in a wide range of trusses and frames. In the design of steel structures, Particular attention is paid to the design of joints. The article presents a literature review on the current design methods and rules for welded rectangular hollow section joints. The review discusses the advantages and disadvantages of the presented design methods. Moreover, attention is paid to the reduction coefficients for joints made of high strength steel, which does not allow to obtain all economic benefits from using high strength steels in the construction industry. In addition, there is still a lack of research on tubular joints under out-of-plane bending.

Keywords:

welded joint, rectangular hollow section, design of joints, design methods, high strength steel

¹ Corresponding author

1. +7(921)0988072, vaska96@yandex.ru (Vasileva Ekaterina, undergraduate)