

УДК 624.014

РАСЧЕТ И КОНСТРУИРОВАНИЕ ФЛАНЦЕВОГО СОЕДИНЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ПРЯМОУГОЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ, ПОДВЕРЖЕННЫХ ЦЕНТРАЛЬНОМУ РАСТЯЖЕНИЮ

канд. техн. наук, доц. В.В. НАДОЛЬСКИЙ
(Белорусский национальный технический университет, Минск)

Представлен обзор национальных и зарубежных рекомендаций по расчету фланцевых соединений. Показано, что при большой распространенности фланцевых соединений на высокопрочных болтах, их методики расчета являются приближенными и обладают ограничениями по области применения. Предложен новый более универсальный метод расчета фланцевого соединения элементов из труб на основе модифицированного метода эквивалентного Т-образного элемента, используемого в Еврокодах для расчета фланцевых соединений элементов из двутавров. Предложенная методика является более универсальной и может быть адаптирована для фланцевых соединений с ребрами жесткости. Численный анализ и анализ посредством метода конечных элементов показал возможность дальнейшего развития предложенной методики. Отмечены перспективные направления развития методов расчета фланцевых соединений, в том числе и метода конечных элементов.

Ключевые слова: *сопротивление, модель сопротивления, фланцевое соединение, линии текучести, конечно-элементная модель.*

Введение. Фланцевое соединение является одним из наиболее распространенных и эффективных типов монтажного болтового соединения элементов из труб, в особенности для соединения растянутых поясов ферм. Такие соединения имеют массу преимуществ: возможность монтажа в любых климатических условиях, высокую надежность, простой контроль соединения, возможность демонтажа без повреждения несущих элементов.

Исследованию фланцевых соединений посвящены работы исследователей В.В. Бирюлева, Л.И. Гладштейна, В.В. Каленова, В.В. Катюшина, А.Ю. Клюкина, С.Д. Шафрая, С.А. Шафрая, J. Packer, L. Bruno, P. Birketmoe, В. Kato, А. Mukai и др. Одним из ведущих исследователей фланцевых соединений на постсоветском пространстве был В.В. Каленов. В 1980-х годах он провел серию испытаний Т-образных фланцев, являющихся элементарной составляющей фланцевых соединений, а также натуральных фланцевых соединений растянутых элементов открытого и замкнутого профиля; обобщил полученные данные, результаты экспериментов других ученых и существующую теоретическую базу.

В настоящее время изучение фланцевых соединений на территории стран СНГ ведется недостаточно активно. Основной акцент делается на развитие КЭ моделей для оценки НДС и действительной работы фланцевого соединения. В частности, в Республике Беларусь расчеты стальных конструкций выполняются согласно требованиям СНиП П-23-81* [1] или Еврокод 3 [2], но в данных стандартах нет методик по расчету фланцевого соединения элементов из замкнутого профиля. Это обстоятельство вызывает трудности при проектировании фланцевых соединений элементов из труб. В национальной практике проектирование значительно облегчают следующие документы: Рекомендации по расчету, проектированию, изготовлению и монтажу фланцевых соединений стальных строительных конструкций [3], Пособие по проектированию к СНиП П-23-81* [4], Серия по применению ферм из замкнутых гнутосварных профилей прямоугольного сечения [5], СТО 0041-2004 [6] и освещенность данного вопроса в литературе, например в [7]. В европейской системе нормирования ТКП EN 1993-1-8 «Стальные конструкции. Расчет соединений» [2] существуют разделы, посвященные расчету фланцевых соединений элементов из двутавров (раздел 6) и узлов сопряжения элементов замкнутого профиля (раздел 7), но в данном нормативном документе не рассматриваются фланцевые соединения элементов из замкнутого профиля (труб). Известна европейская методика расчета NCCI (Non Contradictory Complementary Information¹) Design models for splices in structural hollow sections [7–9], которая основывается на руководстве «Design guide for rectangular hollow section (RHS) joints under predominantly static loading» [10].

В рамках данного исследования выполнен обзор и сравнительный анализ подходов к расчету фланцевых соединений в соответствии с традициями национальной [3] и зарубежной [9; 10] практики. Рассмотрен метод расчета фланцевых соединений, разработанный на основе методики Т-образного элемента, регламентированной в ТКП EN 1993-1-8 [2]. Представлены численные примеры реализации рассмотренных методов. Выполнен анализ фланцевого соединения посредством КЭ модели, использованной в программе IDEA StatiCa.

¹Серия специально разработанных справочных документов с дополнительной информацией, не вошедшей в Еврокоды, и направленных на поддержание использования Еврокодов.

Расчет фланцевого соединения по национальной методике [3]. Фланцевые соединения, работающие на растяжение, следует выполнять только с предварительно напряженными высокопрочными болтами [3, п. 1.2]. Фланцевые соединения элементов в виде прямоугольных труб, подверженные центральному растяжению, следует использовать для передачи усилия, не превышающего 2500 кН [3, п. 4.20]. Для элементов фланцевого соединения следует применять высокопрочные болты диаметром 24 мм (М24); использование болтов М20 и М27 можно допускать в тех случаях, когда постановка болтов М24 невозможна или нерациональна. При конструировании, как правило, следует применять следующие сочетания диаметра болтов и толщин фланцев: М20 / 20 мм, М24 / 25 мм, М27 / 30 мм [3, п. 4.2–4.4]. Следует использовать болты из стали 40Х «селект» климатического исполнения ХЛ с временным сопротивлением не менее 1100 МПа, а также высокопрочные гайки и шайбы к ним по ГОСТ 22353-77–ГОСТ 22356-77.

«Фланцевые соединения элементов из гнутосварных профилей прямоугольного или квадратного сечений, подверженных воздействию центрального растяжения, следует выполнять **со сплошными фланцами и ребрами жесткости**, расположенными, как правило, вдоль углов профиля. Толщина ребер жесткости не должна превышать 1,2 толщины элементов основного профиля, ширина определяется размерами фланца и профиля, длина – не менее 1,5 высоты меньшей стороны профиля» [3, п. 4.16]. Для фланцевых элементов соединения следует принимать листовую сталь по ГОСТ 19903-74* марок 09Г2С-15 по ГОСТ 19282-73* и 14Г2АФ-15 по ТУ 14-105-465-82 с гарантированными механическими свойствами в направлении толщины проката. Фланцы могут быть выполнены из других марок низколегированных сталей (С345, С375 по ГОСТ 27772-88*), при этом сталь должна соответствовать следующим требованиям: категория качества стали (только для марок С345 и С375) – 3 или 4, в зависимости от требований к материалу конструкции; относительное сужение стали в направлении толщины проката $\psi \geq 15\%$, минимальное для одного из трех образцов $\psi \geq 10\%$.

Прочность соединения следует считать обеспеченной, если

$$N \leq n \cdot K_2 \cdot B_p, \text{ при } 20 \leq t \leq 40 \text{ мм}, \quad (1)$$

где n – количество болтов в соединении; K_2 – коэффициент, принимаемый по таблице 5 [3] в зависимости от диаметра болтов и толщины фланца (см. таблицу 1); B_p – расчетное усилие растяжения болтов [3, п. 5.7].

Таблица 1. – Значение коэффициента K_2 [3, таблица 5]

Диаметр болта	Толщина фланца t , мм	K_2
М20	$t \geq 20$	0,85
М24	$20 \leq t < 25$	0,8
	$t \geq 25$	0,85
М27	$25 \leq t < 30$	0,8
	$t \geq 30$	0,85

Расчетное усилие растяжения B_p болтов следует принимать равным:

$$B_p = R_{bh} \cdot A_{bn}, \quad (2)$$

где $R_{bh} = 0,7 R_{bun}$ – расчетное сопротивление растяжению высокопрочных болтов; R_{bun} – нормативное сопротивление стали болтов; A_{bn} – площадь сечения болта нетто.

Сварные швы фланца с присоединяемым профилем следует выполнять угловыми, без разделки кромок. В обоснованных случаях может быть допущена сварка с разделкой кромок [3, п. 4.2]. Расчет прочности сварных швов соединения фланца с профилем замкнутого сечения выполняется в соответствии с требованиями СНиП [1] с учетом глубины проплавления корня шва на 2 мм по трем сечениям [3, п. 5.10]:

- по металлу шва (сечение 1)

$$\frac{N}{\beta_f \cdot (k_f + 2 \text{ мм}) \cdot l_w} \leq R_{wf} \cdot \gamma_{wf} \cdot \gamma_c / \gamma_n; \quad (3)$$

- по металлу границы сплавления с профилем (сечение 2)

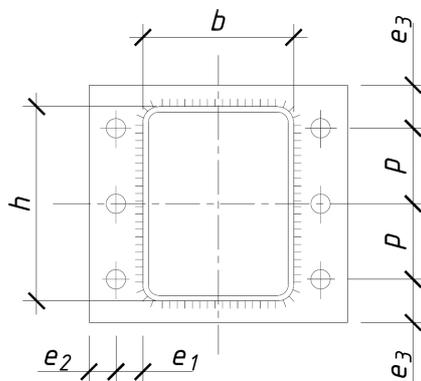
$$\frac{N}{\beta_z \cdot k_f \cdot l_w} \leq R_{wz} \cdot \gamma_{wz} \cdot \gamma_c / \gamma_n; \quad (4)$$

- по металлу границы сплавления с фланцем в направлении толщины проката (сечение 3)

$$\frac{N}{(k_f + 1,4 \text{ мм}) \cdot l_w} \leq R_{th} \cdot \gamma_{wz} \cdot \gamma_c / \gamma_n \quad (5)$$

Здесь (в формулах (3)–(5)) k_f – катет сварного шва; l_w – расчетная длина шва, принимаемая меньше его полной длины на 10 мм; β_f, β_z – коэффициенты, принимаемые согласно таблице 34* СНиП [1]; γ_{wf}, γ_{wz} – коэффициенты работы шва; γ_c – коэффициент условий работы сварного соединения; R_{wf}, R_{wz} – расчетные сопротивления угловых швов срезу (условному) по металлу шва и металлу границы сплавления с профилем соответственно; R_{th} – расчетное сопротивление растяжению стали в направлении толщины фланца.

Расчет фланцевого соединения по европейской методике [9]. Основные базовые положения данной методики изложены в [10], инженерное представление методики реализовано в справочной информации NCCI [9], однако следует отметить, что данный документ обладает рядом спорных положений и неточностей по отношению к оригиналу, которые будут указаны далее. Все геометрические параметры, используемые в расчетной методике, представлены на рисунке 1.



h – высота сечения профиля; b – ширина сечения профиля; t_p – толщина фланца;
 p – шаг болтов; e_1 – расстояние от центра отверстия до стенки профиля;
 e_2, e_3 – расстояния от центра отверстия до ближайшей кромки фланца

Рисунок 1. – Геометрические параметры фланцевого соединения труб прямоугольного очертания

Согласно [9] при конструировании соединения следует придерживаться следующих рекомендаций:

- толщина фланца назначается в пределах $12 \text{ мм} \leq t_p \leq 26 \text{ мм}$, так как данная методика экспериментально подтверждена только для данного диапазона толщин фланца;
- ось крайнего ряда болтов во фланцевом соединении не должна располагаться за контуром замкнутого профиля;
- расстояние между болтами p должно быть не менее $2,2d_0$, но не более $14t$ и 200 мм . Рекомендуемый шаг болтов равен от 3 до 5 диаметров отверстия болтов d_0 ;
- диаметр отверстий для болтов $d_0 = d + 2 \text{ мм}$ при $d \leq 24 \text{ мм}$ и $d_0 = d + 3 \text{ мм}$ при $d > 24 \text{ мм}$;
- расстояние e_2 и e_3 должны быть более $1,2d_0$; при этом для минимизации эффекта рычага расстояние e_2 рекомендуется назначать не более $1,25e_1$.

В соответствии с данной методикой проверяются следующие компоненты фланцевого соединения:

- прочность и деформации фланца;
- прочность болтов на растяжение;
- прочность сварных швов, прикрепляющих фланец к профилю.

Несущая способность фланцевого соединения $N_{p,Rd}$ по прочности и деформациям фланца определяется согласно следующей процедуре:

- вычисляется параметр ослабления δ :

$$\delta = 1 - d_0 / p; \quad (6)$$

- параметр жесткости соединения:

$$K = \frac{4(e_1 - 0,5d + t)}{0,9 f_{yp} p / \gamma_{M0}}, \quad (7)$$

где f_{yp} – предел текучести фланца.

Примечание. В формуле для параметра K , возможно, допущена ошибка, так как в книге [10] уточнено, что коэффициент 0,9 получен как $1/\gamma_{M0}$, во время написания этой книги в ENV к Еврокоду 3 частный коэффициент γ_{M0} принимался равным 1,1, поэтому, возможно, для параметра K формула должна быть записана следующим образом:

$$K = \frac{4(e_1 - 0,5d + t)}{f_{yp} P / \gamma_{M0}}. \quad (8)$$

с) вычисляется коэффициент α :

$$\alpha = \left(\frac{K \cdot F_{t,Rd}}{t_p^2} - 1 \right) \cdot \frac{e_{eff} + d/2}{\delta \cdot (e_1 + e_{eff} + t)}, \text{ но } \alpha \geq 0. \quad (9)$$

где $F_{t,Rd}$ – расчетная несущая способность одного болта на растяжение; e_{eff} – эффективное плечо приложения рычажной силы, принимается равным меньшему из расстояний e_2 или $1,25e_1$.

д) несущая способность фланцевого соединения по прочности и деформациям

$$N_{p,Rd} = \frac{t_p^2 \cdot (1 + \delta\alpha) \cdot n_b}{K \cdot \gamma_{M2}}. \quad (10)$$

Несущая способность фланцевого соединения $N_{b,Rd}$ по прочности болтов

$$N_{b,Rd} = n_b \cdot k_2 \cdot f_{ub} \cdot A_s / \gamma_{M2}, \quad (11)$$

где $k_2 = 0,9$ – коэффициент; f_{ub} – временное сопротивление болта на растяжение; γ_{M2} – частный коэффициент безопасности несущей способности болта; n_b – количество болтов в соединении.

Сварные швы рассчитываются согласно требованиям, изложенным в ТКП EN 1993-1-8 [2], при этом согласно [9] несущую способность можно определить из двух условий:

а) из условия равнопрочности с сечением трубы:

$$a \geq t \cdot f_y \cdot \left(\frac{\beta_w \cdot \gamma_{M2}}{f_u / \sqrt{2}} \right), \quad (12)$$

где f_y – предел текучести профиля; β_w – поправочный коэффициент, принимаемый в зависимости от класса стали более слабого соединяемого элемента; f_u – временное сопротивление растяжению более слабого соединяемого элемента, Н/мм².

Либо можно воспользоваться формулами:

$$a \geq 0,93 t \text{ – для стали S235,}$$

$$a \geq 0,96 t \text{ для стали S275,}$$

$$a \geq 1,11 t \text{ для стали S355.}$$

Примечание. Следует отметить, что данный подход может быть небезопасным, так как при работе фланцевого соединения с рядами болтов, расположенными только по двум граням профиля, распределение усилий происходит только по этим двум граням профиля. Дополнительно следует отметить, что необходимо ограничивать толщину шва наименьшей толщиной из свариваемых листов. В ТКП EN 1993-1-8 [2] нет ограничений максимальной толщины сварного шва, однако теоретические исследования и указания национальных норм строго ограничивали максимальный катет (следовательно, и толщину) углового шва. Согласно пункту 12.8 СНиП [5] катеты угловых швов должны быть не более $1,2 t$, где t – наименьшая толщина соединяемых элементов, тогда толщина шва должна быть не более $0,85 t$.

б) из условия восприятия приложенного растягивающего усилия:

$$a \geq \left(\frac{N_{Ed}}{2h} \right) \cdot \left(\frac{\beta_w \cdot \gamma_{M2}}{f_u / \sqrt{2}} \right). \quad (13)$$

В этом случае расчетная длина сварного шва принята равной $2h$, так как в зависимости от жесткости фланца привариваемый периметр замкнутого профиля может подвергаться неравномерному распределению напряжений.

Размещение болтов по всему контуру профиля

Согласно рекомендациям [10] при размещении болтов по всему контуру трубы допускается использовать описанную выше методику, при этом параметр t необходимо исключить из выражения $e_1 - d/2 + t$. Если форма сечения трубы прямоугольная либо расстояния между болтами отличаются друг от друга, в расчетах принимается минимальный шаг болтов. Чтобы эта расчетная модель работала, болты должны располагаться вблизи стенок профиля.

Пример реализации метода. Исходные данные для примера представлены в разделе «Анализ». Расчет выполнен для типа узла I, представленного на рисунке 3.

Прочность фланца:

$$N_{p,Rd} = \frac{t_p^2 \cdot (1 + \delta\alpha) \cdot n}{K \cdot \gamma_{M2}} = \frac{20^2 \cdot (1 + 0,78 \cdot 0,474) \cdot 4}{4,64 \cdot 1,25} = 378,1 \text{ кН},$$

где $\delta = 1 - d_0 / p = 1 - 22 / 100 = 0,78$.

$$K = \frac{4(e_1 - 0,5d + t)}{0,9 f_{yp} p_2 / \gamma_{M0}} = \frac{4(40 - 0,5 \cdot 20 + 6)}{0,9 \cdot 345 \cdot 100 / 1} = 4,64 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^2 / \text{Н};$$

$$\alpha = \left(\frac{K \cdot F_{t,Rd}}{t_p^2} - 1 \right) \cdot \frac{e_{eff} + d/2}{\delta \cdot (e_1 + e_{eff} + t)} = \left(\frac{4,64 \cdot 10^{-3} \cdot 141,1 \cdot 10^3}{20^2} - 1 \right) \cdot \frac{40 + 20/2}{0,78 \cdot (40 + 40 + 6)} = 0,474.$$

Прочность болтов:

$$N_{b,Rd} = n_b \cdot k_2 \cdot f_{ub} \cdot A_s / \gamma_{M2} = 4 \cdot 0,9 \cdot 800 \cdot 2,45 / 1,25 = 564 \text{ кН}.$$

Прочность швов: $N_{w,Rd} = a \cdot 2h \cdot f_u / (2^{0,5} \cdot \beta_w \cdot \gamma_{M2}) = 8 \cdot 2 \cdot 140 \cdot 470 \cdot (1,41 \cdot 0,9 \cdot 1,25) = 662 \text{ кН}.$

Расчет фланцевого соединения на основе Т-образного элемента. В рамках предложенной методики сопротивление болтов и фланца определяется по методу Т-образного элемента, в котором линии текучести вокруг болтов преобразуются в «эквивалентную» расчетную длину Т-образного элемента.

Более подробное описание метода Т-образного элемента можно найти в [2; 11].

Далее будут представлены основные положения предлагаемого метода.

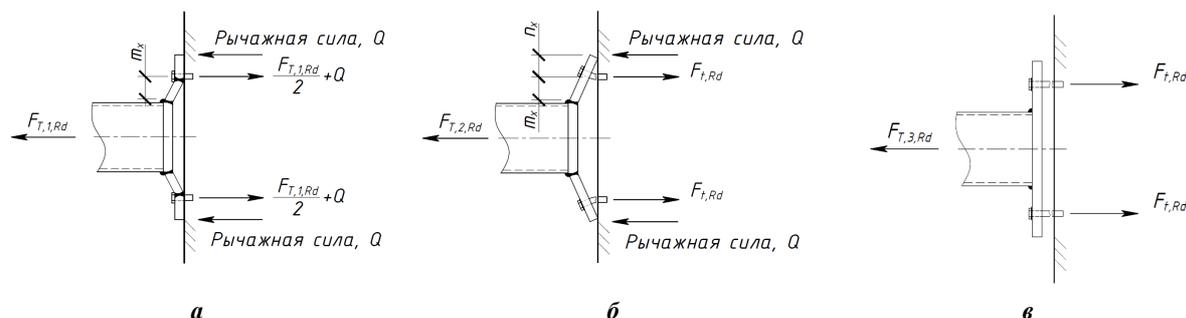


Рисунок 2. – Виды отказа фланцевого соединения в рамках методики Т-образного элемента: полное развитие пластических деформаций во фланце (а); разрыв болтов с развитием деформаций во фланце (б); разрыв болтов (в)

Расчетную несущую способность Т-образного элемента следует принимать равной наименьшей из трех возможных видов отказа (см. рисунок 2):

$$F_{T,1,Rd} = 4 M_{el,Rd} / m; \quad (14)$$

$$F_{T,2,Rd} = (2 \cdot M_{el,Rd} + n \cdot F_{T,3,Rd}) / (m + n); \quad (15)$$

$$F_{T,3,Rd} = n_b \cdot k_2 \cdot f_{ub} \cdot A_s / \gamma_{M2}. \quad (16)$$

Обозначения приняты согласно таблице 6.2 ТКП EN 1993-1-8 [2], за исключением двух параметров моделей: m и M_{pl} . Согласно ТКП EN 1993-1-8 параметр m – это расстояние от центра болта до сварного шва, однако для фланцевого соединения элементов из труб следует ожидать, что зона изгиба фланца бу-

дет смещаться внутрь фланца за счет изгиба стенки труб и, следовательно, расстояние m будет больше, чем для Т-элемента, поэтому в рамках настоящего исследования расстояние m принято равным $e_1 + 0,5t$.

Согласно ТКП EN 1993-1-8 при определении сопротивления Т-образного элемента допускается развитие пластических деформаций. По этой причине в расчетах фигурирует сопротивление фланца изгибу в пластической стадии M_{pl} . Однако для фланцевого соединения элементов из труб, которое наиболее часто применяется для стыка нижних растянутых поясов ферм, следует ограничивать деформативность стыка, так как это может существенно повлиять на прогибы и перераспределение усилий в элементах ферм. В связи с этим до отсутствия уточненных результатов дальнейших исследований была принята более безопасная предпосылка о недопущении развития пластических деформаций, ввиду этого параметр M_{pl} заменен на M_{el} и вычисляется следующим образом:

$$M_{el} = l_{eff} \cdot t_p^2 \cdot f_{yp} / (6 \gamma_{M0}). \quad (17)$$

Для каждого ряда болтов эффективная длина эквивалентного элемента определяется по одной из возможных линий текучести, соответствующей размещению болтов. Данные линии текучести назначаются согласно рекомендациям ТКП EN 1993-1-8 [2]. Возможные линии текучести для фланцевого соединения с двумя рядами болтов представлены в таблице 2. Для более детального понимания физической подосновы определения линий текучести рекомендуются сведения, изложенные в [11].

Таблица 2. – Принципиальные схемы возможных линий текучести для определения эффективной длины Т-элемента

Некруговое расположение, $l_{eff,nc}$	
$\sum l_{eff,nc} = 2 \cdot (e + 0,5p) + (n - 2) p$	$\sum l_{eff,nc} = n(4m_x + 1,25e_x)$
$\sum l_{eff,nc} = 2 \cdot (2m_x + 0,625e_x + e) + (n - 2) \cdot (4m_x + 1,25e_x)$	$\sum l_{eff,nc} = (2m_x + 0,625e_x + e) + (n - 1) \cdot (4m_x + 1,25e_x)$
$\sum l_{eff,nc} = (2m_x + 0,625e_x + 0,5p) + (n - 2) \cdot p + (e + 0,5p)$	$\sum l_{eff,nc} = 2 \cdot (2m_x + 0,625e_x + 0,5p) + (n - 2) \cdot p$
Круговое расположение, $l_{eff,cp}$	
$\sum l_{eff,cp} = 2 \cdot (\pi m_x + p) + (n - 2) \cdot 2p$	$\sum l_{eff,cp} = n \cdot 2\pi m_x$
$\sum l_{eff,cp} = 2 \cdot (\pi m_x + 2e) + (n - 2) \pi m_x$	$\sum l_{eff,cp} = 2 \cdot (2e + p) + (n - 2) \cdot 2p$

Пример реализации метода. Исходные данные для примера представлены в разделе «Анализ». Расчет выполнен для типа узла I (рисунок 3).

1. Для рассматриваемого примера минимальная эффективная длина T-элемента составляет 180 мм, что соответствует ширине фланца (см. таблицу 2).

2. Определяем вероятность возникновения эффекта рычага. Находим зажимную длину болта L_b и предельное значение L_b^* (таблица 6.2 [2]):

$$L_b = 2t_p + 2t_{ш} + 0,5(t_{сб} + t_г) = 2 \cdot 20 + 2 \cdot 3 + 0,5(14 + 16) = 61 \text{ мм},$$

где $t_{ш} = 3$ мм – толщина шайбы; $t_{сб} = 14$ мм – толщина головки болта; $t_г = 16$ мм – толщина гайки.

$$L_b^* = 8,8 \cdot m^3 \cdot A_s \cdot n_b / (l_{ef} \cdot t_p^3) = 8,8 \cdot 40^3 \cdot 2,45 \cdot 2 / (180 \cdot 20^3) = 191 \text{ мм}.$$

Так как $L_b \leq L_b^*$, то возможно появление эффекта рычага.

3. Изгибающий момент, воспринимаемый фланцем в упругой стадии $M_{el,Rd}$

$$M_{el,Rd} = l_{ef} \cdot t_p^2 \cdot f_{yp} / (6 \gamma_{M0}) = 180 \cdot 20^2 \cdot 345 / 6 = 4,14 \text{ кН}\cdot\text{м}.$$

4. Несущая способность фланцевого соединения:

а) по прочности и ограничениям деформаций фланца,

$$F_{T,1,Rd} = 4 M_{el,Rd} / m = 4 \cdot 4,14 / 40 = 414 \text{ кН};$$

б) при разрыве болтов, $F_{T,3,Rd}$:

$$F_{T,3,Rd} = n_b \cdot k_2 \cdot f_{ub} \cdot A_s / \gamma_{M2} = 4 \cdot 0,9 \cdot 800 \cdot 2,45 / 1,25 = 564 \text{ кН};$$

с) при разрыве болтов и развитии ограниченных деформаций во фланце $F_{T,2,Rd}$:

$$F_{T,2,Rd} = (2 \cdot M_{el,Rd} + n \cdot F_{T,3,Rd}) / (m + n) = (2 \cdot 4,14 + 564 \cdot 0,04) / (0,04 + 0,04) = 386 \text{ кН}.$$

5. Несущая способность соединения по сварному шву $N_{w,Ed}$, кН:

$$N_{w,Rd} = a \cdot 2h \cdot f_u / (2^{0,5} \cdot \beta_w \cdot \gamma_{M2}) = 8 \cdot 2 \cdot 140 \cdot 470 / (1,41 \cdot 0,9 \cdot 1,25) = 662 \text{ кН}.$$

Анализ

Анализ национальной методики. В рамках отечественной методики конструирование фланцевого соединения обеспечивает его несущую способность, предъявляются требования к диаметрам болтов и толщинам фланцев, постановке дополнительных ребер жесткости, что позволяет вести расчет соединения только по прочности болтов и прочности сварных швов (прочность и деформации фланца обеспечиваются конструктивными требованиями). Такие принципы позволяют спроектировать соединение, равнопрочное сечению элемента. Следует отметить, что данное соединение, по всей видимости, будет неэкономичным, однако с учетом развития исследований того времени и целесообразностью высокой надежности соединений, следует считать рекомендации национальной методики эффективными и целесообразными.

Анализ европейской методики. Широкое распространение на европейской территории получили фланцевые узлы с двухрядным и четырехрядным расположением болтов без ребер жесткости, по этой причине европейская методика разработана только для такого типа узлов. С производственной точки зрения такие типы узлов обладают неоспоримой простотой изготовления, однако достичь равнопрочности соединения и элементов в таком случае практически невозможно, так как прочность таких соединений ограничена прочностью сварных швов. При двухрядном и четырехрядном расположении болтов можно предположить, что швы работают только вдоль граней с болтами (иногда эта предпосылка не идет в запас прочности, так как наиболее интенсивно швы будут работать около болтов и угловых зон профиля). При этом расчетная толщина шва назначается меньше толщины профиля, и прочностные свойства угловых швов – меньше свойств стали профиля. Анализ показывает, что при двухрядном расположении болтов можно достичь 30...40% прочности профиля соединяемых элементов, а при четырехрядном расположении болтов – 60...70%. Остается не исследованным вопрос деформативности таких видов соединений, так как в расчетной методике заложено допущение развития пластических деформаций и, как следствие, фланцы будут обладать значительными деформациями.

Анализ методик расчета фланцевого соединения на численных примерах. Для анализа рассмотрены три конфигурации узла, представленные на рисунке 3. Конструктивное решение представлено для соединения элементов квадратного сечения $140 \times 140 \times 10$, из стали S355, фланцы приняты из пластины² t20,

² Рациональным решением является использование толщины фланца, приблизительно равной диаметру болтов.

из стали S355, болты³ приняты класса прочности 8.8, M20, толщина сварного шва⁴ принята 8 мм, для типа III ребра приняты из пластины t8 и приварены сварным швом толщиной 4 мм. Результаты представлены в таблице 3. Поскольку области применения отечественной и зарубежной методики не совпадают, то сравнить данные подходы на численном примере не представляется возможным. Как видно, предложенная методика на основе T-образного элемента более универсальна и позволяет выполнить расчет узла всех трех конфигураций.

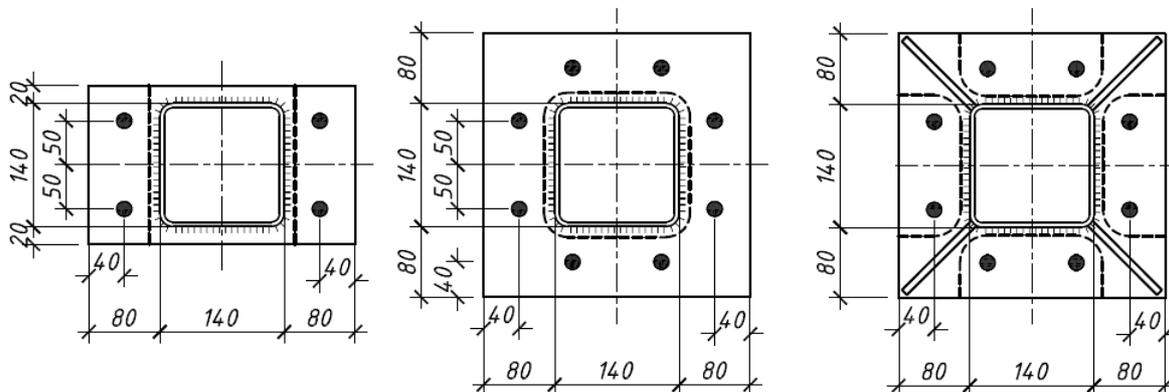


Рисунок 3. – Конфигурации фланцевых соединений с двухрядным (тип I) и четырехрядным расположением болтов без ребер жесткости (тип II) и с ребрами жесткости (тип III)

Таблица 3. – Сравнение методов расчета фланцевых соединений

Методика расчета	Вид отказа	Тип I	тип II	Тип III
T-образного элемента	Прочность и деформации фланца	414 386	736 748	1604 984
	Прочность болтов	564	1129	1129
	Прочность швов	662	1324	1698
Европейская	Прочность и деформации фланца	378	750	–
	Прочность болтов	564	1129	
	Прочность швов	662	1324	
Отечественная	Прочность болтов и фланца	–	–	933
	Прочность швов	–	–	1973
КЭ метод		410	775	1080

Анализ посредством МКЭ. На сегодняшний день наиболее универсальным можно считать метод расчета посредством метода конечных элементов. Данное направление является очень актуальным и довольно интенсивно развивается, здесь следует отметить исследования [12; 13]. Однако при всей мощи данного метода следует отметить ряд основных нерешенных по настоящее время вопросов и сдерживающих применение КЭ метода. Основные проблемы связаны с созданием КЭ модели и интерпретацией результатов, что, как правило, требует больших теоретических знаний и практического опыта построения КЭ модели. Существенно упрощает практическую реализацию расчетов соединений посредством МКЭ программный продукт IDEA StatiCa, разработанный в Чехии при существенной поддержке научного сообщества. Данный продукт позволяет выполнить качественный анализ соединений.

Все три типа соединения были смоделированы в программе IDEA StatiCa, результаты представлены на рисунке 4. Предельное значение пластических деформаций принято 0,2%. Для типа I соединений по КЭ методу расчетное сопротивление составило 410 кН, при этом характер работы соответствует классическим представлениям работы T-элемента, за исключением зоны развития максимального изгибающего момента: эта зона смещается внутрь профиля, тогда как в модели T-элемента она находится по грани сварного шва. Для типа II соединений по КЭ методу расчетное сопротивление составило 775 кН, при этом характер работы и линии текучести более сложные, чем по представлениям работы T-элемента:

³ Рекомендуется принимать болты M20, M24, M30 класса прочности 8.8. При использовании болтов класса прочности 10.9 следует обратить внимание на их ограниченную деформативность.

⁴ Рекомендуется назначать толщину шва не более $0,85t$ (что соответствует требованиям п. 12.8 СНиП [5]). В отдельных случаях допускается назначение толщины шва не более наименьшей из толщин свариваемых листов. Поскольку для типа соединения I и II доминирующая форма отказа связана с прочностью швов, то выполнен анализ конструктивных решений профиля на $140 \times 140 \times 10$ для того, чтобы увеличить толщину шва до 8 мм.

зоны развития максимального изгибающего момента располагаются не только по периметру профиля, но и включают угловые зоны за счет изгибных деформаций фланца в двух направлениях. Для типа III соединений по КЭ методу расчетное сопротивление составило 1080 кН, при этом характер работы и линии текучести более сложные, чем по представлениям Т-элемента: в конкретном примере более интенсивный изгиб фланца возникал вдоль линии ребер жесткости.

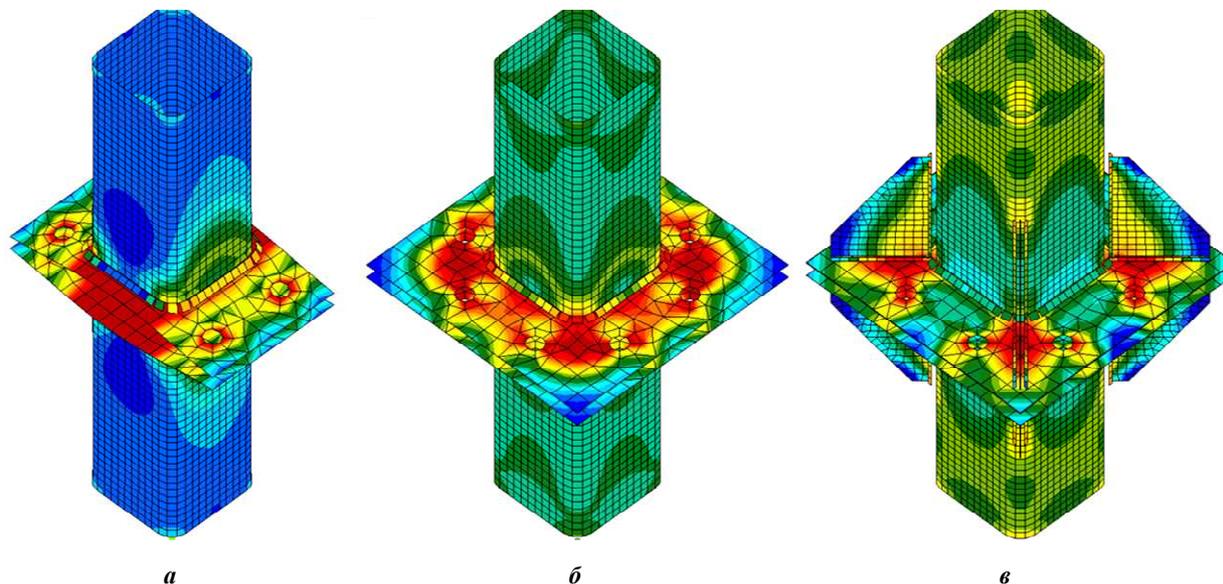


Рисунок 4. – Напряженно-деформированное состояние фланцевых соединений с двухрядным расположением болтов (а) – тип I; с четырехрядным расположением болтов без ребер жесткости (б) – тип II; с четырехрядным расположением болтов с ребрами жесткости (в) – тип III

Заключение. Обзор рекомендаций по расчету фланцевых соединений показал, что при большой распространенности фланцевых соединений на высокопрочных болтах их методики расчета являются приближенными и обладают ограничениями по области применения.

Метод расчета, представленный в европейских рекомендациях [9], на практике прост в реализации, но при этом следует отметить некоторые ограничения области применения: узкий диапазон применимости по толщине фланца, отсутствие указаний по расчету при наличии дополнительных ребер жесткости. Также в источнике [9], получившем наибольшее распространение, имеются отклонения и неточности по отношению к оригинальному изложению данной методики [10].

В национальных рекомендациях [3] соединения конструируются согласно требованиям (толщина фланца должна находиться в пределах $20 \text{ мм} \leq t_f \leq 40 \text{ мм}$; рекомендуемые диаметры болтов; обязательно наличие дополнительных ребер жесткости), которые заведомо обеспечивают жесткость и прочность фланца, как следствие, остается только проверка прочности болтов и сварных соединений, из которых наиболее критичной является прочность болтов.

Предложен новый более универсальный метод расчета фланцевого соединения элементов прямоугольного сечения на основе модифицированного метода эквивалентного Т-образного элемента, используемого в ТКП EN 1993-1-8 [2] для расчета фланцевых соединений элементов из двутавров. Предлагаемая методика представляет интерес, в силу своей большей универсальности и может быть адаптирована для фланцевых соединений с ребрами жесткости.

Численный анализ и анализ рассмотренных соединений посредством КЭ метода в программе IDEA StatiCa показал возможность дальнейшего развития данной методики. Также на основании проведенного анализа можно отметить большую перспективу развития методов расчета, основанных на КЭ методе. В качестве дальнейших направлений исследований следует отметить необходимость более широкой верификации предложенного метода расчета, в том числе с дополнительным анализом на КЭ моделях и натурных испытаниях. Заметим, что большинство исследований сосредоточены на вопросах прочности фланцевого соединения, при этом не уделяется должного внимания вопросам жесткости и стадиям работы материала с учетом уровня нагружения. Как правило, в общепринятой теории развитие пластических деформаций можно допустить для редких событий, таких как проверки предельных состояний несущей способности при статических нагрузках. В свою очередь, для знакопе-

ременных нагрузок и проверок предельных состояний эксплуатационной пригодности следует не допускать развитие пластических деформаций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стальные конструкции. Нормы проектирования : СНиП II-23-81* / ЦНИИСК. – М., 1990.
2. Еврокод 3 Проектирование стальных конструкций. Часть 1-8. Расчет соединений : ТКП EN 1993-1-8-2009. – Минск : М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь. – 2010.
3. Рекомендации по расчету, проектированию, изготовлению и монтажу фланцевых соединений стальных строительных конструкций / СО Стальмонтаж, ВНИПИ Промстальконструкция, ЦНИИПСК им. Мельникова. – М., 1988. – 83 с.
4. Пособие по проектированию стальных конструкций (к СНиП II-23-81*) / ЦНИИСК. – М., 1989. – 148 с.
5. Стальные конструкции покрытий производственных зданий пролетами 18, 24 и 30 м с применением замкнутых гнутосварных профилей прямоугольного сечения типа «Молодечно». Чертежи КМ : Серия 1.460.3-14 / ОАО Проектный институт. Ленпроектстальконструкция. – М., 1981.
6. Конструкции стальные строительные. Болтовые соединения. Проектирование и расчет : СТО 0041-2004 / ЗАО «ЦНИИПСК им. Мельникова. – М., 2004.
7. Металлические конструкции : учеб. пособие для строительных вузов / В.В. Горев [и др.]. – М. : Высш. шк., 2004. – Т. 1 : Элементы конструкций. – 469 с.
8. Надольский, В.В. Европейская методика расчета фланцевого соединения элементов из труб / В.В. Надольский, Е.С. Бояринцева // Теория и практика исследований и проектирования в строительстве с применением систем автоматизированного проектирования (САП) : сб. ст. II Междунар. науч.-техн. конф. – Брест : Изд-во БрГТУ, 2018. – С. 109–114.
9. Design models for splices in structural hollow sections : NCCI // Access Steel. – 2010. – 10 p.
10. Design guide for rectangular hollow section (RHS) joints under predominantly static loading / J.A. Packer [et al.] // CIDECT. – 2009. – P. 83–89.
11. Joints in Steel Construction : Moment Connections / The Steel Construction Institute // Silwood Park. – Berkshire. – 160 p.
12. Напряженно-деформированное состояние высокопрочных болтов фланцевых соединений в укрупнительных стыках стропильных ферм / А.А. Семенов [и др.] // Инженерно-строительный журнал. – 2014. – № 5. – С. 54–62.
13. Перельмутер, А.В. Расчетные модели фланцевых соединений рамных узлов металлических конструкций и их программная реализация в «SCAD Office» / А.В. Перельмутер, Э.З. Крискунов, В.В. Юрченко // CADMaster. – 2010. – № 3. – С. 110–115.

Поступила 11.06.2018

CALCULATION AND CONSTRUCTION OF THE FLANGE CONNECTION OF RECTANGULAR ELEMENTS SUBJECTED TO THE AXIAL TENSION

V. NADOLSKI

The review of domestic and foreign recommendations on the calculation of flange connections showed that with a high prevalence of flange connections with high-strength bolts, their calculation methods are approximate and have limitations in the field of application. A new more universal method for calculating the flange connection based on the modified equivalent T-element method used in Eurocodes for calculating the flange connections of I-beam elements is suggested. The proposed technique is of great interest, since it is more universal and can be adapted for flange joints with stiffeners. Numerical analysis and analysis by the FE method showed the possibility of further development of the proposed technique. Prospective directions of development of methods for calculating flange connections, including the FE method, have been noted.

Keywords: *resistance, resistance model, flange connection, flow lines, finite element model.*