

УДК 624.072.9

А. А. Новоселов, И. А. Хусенова

Численно-аналитические исследования напряженного состояния опорной части элементов стальных связей

Поступила	22.05.2018
Рецензирование	14.06.2018
Принята к печати	03.10.2018

Способность сопротивляться горизонтальным нагрузкам от ветра или от землетрясения является основной задачей системы связей металлических каркасов одноэтажных и многоэтажных зданий. От надежности системы связей зависит прочность и устойчивость металлического каркаса в целом. Но на практике при проектировании зданий внимания связям уделяется крайне мало. Чаще всего предпочитают принимать стандартный вариант решения, не просчитывая и не исследуя другие возможные варианты крепления связей, что влечет за собой в некоторых ситуациях их разрушение при недогруженности здания в целом. В российской строительной практике вопросам напряженного состояния опорной части связей из квадратного или прямоугольного профиля уделяется недостаточное внимание, существующие теоретические варианты расчетов имеют недостаточную точность.

В данной статье рассматриваются численно-аналитические исследования напряженного состояния опорных частей элементов стальных связей, которые выполнены из прямоугольного или квадратного профиля. Для определения напряженного состояния опорных частей связей применялся вычислительный комплекс для прочностного анализа конструкций методом конечных элементов SCAD Office. Рассмотрен наиболее простой и распространенный в российской и зарубежной строительной практике тип опорной части связей. Определено влияние размеров составляющих частей опор связей (толщина ребра, толщина фланца, габарит профиля, толщина профиля) на локальное напряженное состояние. Выполнено сравнение результатов определения напряженного состояния опорных частей связей, полученных по результатам применения нормативных методик, и результатов, полученных с использованием программного продукта. Предложены формулы для определения напряжений, возникающих в стенке основного элемента связей. Даны предложения для конструирования опорной части конструкции.

Ключевые слова: *напряженное состояние, элемент стальных связей, узлы связей, крепление связей, сечение из прямоугольных или квадратных труб.*

Связи стального каркаса являются одним из важнейших несущих элементов как одноэтажных, так и многоэтажных зданий. Их задачи – обеспечение неизменяемости пространственной системы каркаса, устойчивости сжатых элементов, восприятие и передача горизонтальных нагрузок (ветер, сейсмические нагрузки и др.) на фундамент, обеспечение необходимой жесткости каркаса, условий удобства монтажа. Наибольшей популярностью в последнее время стали пользоваться связи, выполненные из прямоугольного или квадратного профиля. Основным привлекательным моментом данного типа сечения является его экономичность. Авторы работы [1] рекомендуют сечение связей из прямоугольного профиля наравне с круглой трубой как основное и предлагают использовать другие типы сечения только в случае невозможности применения трубы. В Республике Казахстан данный тип сечения для элементов связей рекомендуется нормативными документами при наличии сейсмических воздействий [2]. Широ-

кое распространение труб квадратного и прямоугольного сечения достаточно объяснимо. Трубы обладают высокой жесткостью и прочностью при малой материалоемкости. Кроме того, среди их преимуществ можно назвать легкость в санитарной обработке и дезинфекции, компактность сечения.

Одной из проблем, возникающих при проектировании стальных каркасов, является выбор конструктивных решений узлов сопряжений элементов, обеспечивающих прочность, жесткость и надежность здания. В зарубежной практике для элементов связей, выполняемых из прямоугольных или квадратных труб, предлагается три основных типа опорных частей (рис. 1) [3]. В российской практике данные узлы, за исключением узла типа Ф2, также получили широкое распространение. Примером их применения могут являться узлы, приведенные в типовых сериях 1.420.3-36.03 «Каркасы стальные типа “УНИТЕК”» [4] или 1.460.3-15.1КМ [5].

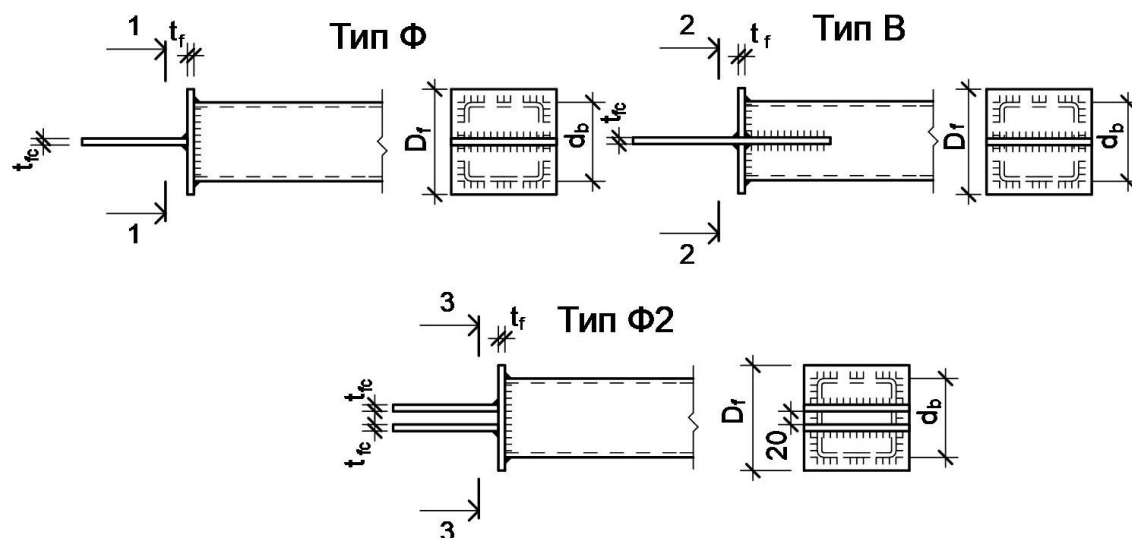


Рис. 1. Варианты опорных частей крепления связей (хвостовиков) из гнutosварных профилей

Наиболее простым в изготовлении и, как следствие, наиболее часто применяемым в практике проектирования является хвостовик типа Ф (рис. 2).

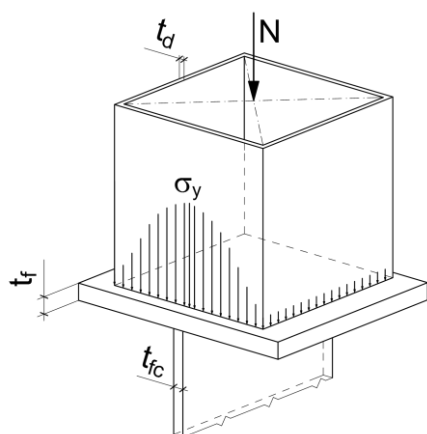


Рис. 2. Напряженное состояние хвостовика связей типа Ф

Под воздействием сосредоточенной силы, приложенной к ребру, в стенке основного элемента связей (трубе) возникают локальные напряжения значительной величины.

В работе [6] был исследован хвостовик типа Ф в программном комплексе «Лира» при следующих данных: профиль квадратного сечения $160 \times 160 \times 4$ мм, фланец и ребро толщиной 10 мм, нагрузка 200 кН. В результате было получено, что при общих напряжениях, действующих в сечении, равных 81,4 МПа, напряжения в опорной зоне составили 347 МПа, т. е. суммарные напряжения превысили общие напряжения более чем в четыре раза.

Согласно действующим в Российской Федерации нормативным документам, расчет данных узлов необходимо выполнять согласно п. 14.4 СП 294.1325800.2017 [7].

С целью определения несущей способности опорных частей связей (хвостовиков) типа Ф было проведено их численное исследование с использованием программного расчетного комплекса SCAD Office и сравнение полученных расчетов с существующими теоретическими методами расчета. Для проведения анализа были смоделированы хвостовики со следующими геометрическими характеристиками: сечение трубы $100 \times 100 \times 4$ (5, 6, 7, 8), $120 \times 120 \times 4$ (5, 6, 7, 8); толщина фланца 10, 12, 14, 16, 18 мм, толщина ребра 10, 12, 14, 16, 18, 20 мм.

Расчеты показали, что значение локальных напряжений, возникающих в стенке трубы, в несколько раз превышает значение общих напряжений. В табл. 1 приведены данные о напряженном состоянии хвостовика связей, выполненных из трубы 100×100 при толщине ребра 10 мм.

Как видно из табл. 1, величина локальных напряжений, возникающих в стенке, может превышать нормальные напряжения более чем в три раза, что может привести к разрушению опорного узла даже при недогруженности элемента в целом.

Существенного изменения напряжений в зависимости от толщины ребра t_{fc} практически не происходит. На рис. 3 приведен график изменения локальных напряжений в зависимо-

Таблица 1

Напряженное состояние хвостовика трубы типа Ф

Толщина стенки, мм	Толщина фланца, мм	Напряжения в стенке, МПа		
		суммарные	нормальные	локальные
4	10	234,0	62,0	172,0
5	10	194,0	49,6	144,4
6	10	166,0	41,3	124,7
7	10	145,0	35,4	109,6
8	10	129,0	31,0	98,0
4	12	210,0	62,0	148,0
5	12	175,0	49,6	125,4
6	12	150,0	41,3	108,7
7	12	132,0	35,4	96,6
8	12	117,0	31,0	86,0
4	14	190,0	62,0	128,0
5	14	159,0	49,6	109,4
6	14	137,0	41,3	95,7
7	14	120,0	35,4	84,6
8	14	107,0	31,0	76,0
4	16	172,0	62,0	110,0
5	16	145,0	49,6	95,4
6	16	125,0	41,3	83,7
7	16	111,0	35,4	75,6
8	16	99,0	31,0	68,0
4	18	156,0	62,0	94,0
5	18	132,0	49,6	82,4
6	18	115,0	41,3	73,7
7	18	102,0	35,4	66,6
8	18	92,0	31,0	61,0

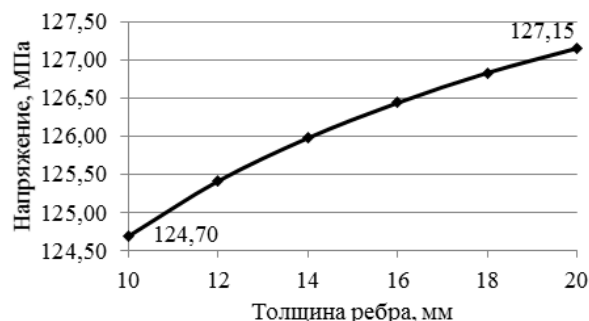


Рис. 3. Зависимость локальных напряжений от толщины ребра

сти от величины толщины ребра. Данные приведены для трубы сечением $100 \times 100 \times 6$ и толщины фланца 10 мм. Как видно из графика, при увеличении толщины ребра в два раза (с 10 до 20 мм) напряжения изменяются в большую сторону всего на 1,5 %.

Влияние габаритов трубы в плане также не существенно (табл. 2), при этом чем больше габарит трубы, тем больше локальные напряжения, возникающие в стенке. Данные о напряженном состоянии хвостовика приведены при следующих одинаковых данных: толщина ребра 10 мм, толщина фланца 10 мм.

Наибольшее влияние на величину локальных напряжений оказывают толщина стенки трубы и толщина фланца (см. табл. 2 и 3). При изменении толщины стенки трубы с 4 до 8 мм локальные напряжения, возникающие в стенке, уменьшаются в 1,75 раза. Изменение толщины фланца с 10 до 18 мм приводит к уменьшению местных напряжений более чем в 1,6 раза.

Все выше перечисленное говорит о необходимости осуществлять, кроме проверок, указанных в СП 294.1325800.2017 «Конструкции стальные. Правила проектирования» [7],

Таблица 2

Зависимость локальных напряжений в хвостовике от габаритов трубы и толщины стенки

Толщина стенки, мм	Локальные напряжения в хвостовике, МПа, при габаритах трубы, мм					
	100 × 100	120 × 120	140 × 140	160 × 160	180 × 180	200 × 200
4	172	177	185	187	191	194
5	144	148	155	157	160	163
6	125	129	134	136	139	141
7	110	114	118	120	122	124
8	98	101	105	108	110	111

Таблица 3

Зависимость локальных напряжений в хвостовике от габаритов трубы и толщины фланца

Толщина фланца, мм	Локальные напряжения в хвостовике, МПа, при габаритах трубы, мм					
	100 × 100	120 × 120	140 × 140	160 × 160	180 × 180	200 × 200
10	125	129	134	136	139	141
12	109	113	117	119	121	123
14	96	99	104	104	106	108
16	84	88	93	92	94	96
18	74	78	83	82	84	85

дополнительную проверку сжатых элементов с учетом действия локальных напряжений. Для теоретической оценки локальных напряжений, возникающих в стенке хвостовика, рассматривались следующие формулы:

– формула (93) СП 294.1325800.2017 [7], предназначенная для проверки хвостовика типа Ф при растяжении:

$$N / \left[R_{yf} t_f D_f / (d_b - t_{fc}) + R_{yd} t_d d_b \right] \leq 1, \quad (1)$$

где N – усилие в элементе связи; R_{yf} – расчетное сопротивление стали фланца; t_f – толщина фланца; D_f – длина фланца вдоль фланца связи; d_b – высота сечения элемента связи (габарит сечения); t_{fc} – толщина ребра; R_{yd} – расчетное сопротивление стали элемента связи; t_d – толщина стенки (полки) элемента связи;

– формула, которая приведена в табл. 7.21 [8] и предназначена для проверки несущей способности стержня решетки, опирающейся на двутавр для Т-образных узлов. С учетом принятых в статье обозначений формула будет выглядеть следующим образом:

$$N / 2R_{yf} t_d l_{ef} \leq 1, \quad (2)$$

где $l_{ef} = t_{fc} + 7t_f \frac{R_{yf}}{R_{yd}}$;

– формула (7.4) [9] для проверки несущей способности стержня решетки:

$$N / 2R_{yf} t_d (t_{fc} + 5t_f) \leq 1; \quad (3)$$

– формула (109) СП 294.1325800.2017 [7], предназначенная для проверки несущей способности элемента вблизи примыкания к поясу двутавра:

$$N \left(1 + \frac{0,1d_b}{t_d} \right) / (\gamma_c \gamma_d R_{yd} A_d) \leq 1, \quad (4)$$

где γ_c – коэффициент условий работы конструкции; γ_d – коэффициент влияния знака усилия в примыкающем элементе, принимаемый равным 1,2 при растяжении и 1,0 – в остальных случаях; A_d – площадь сечения связи;

– формула (26) [10] для проверки несущей способности при растяжении хвостовика типа Ф:

$$N / A_d R_{ud} K_b \leq 1, \quad (5)$$

где R_{ud} – временное сопротивление стали элемента связи; $K_b = 0,14\beta \leq 0,8$; $\beta = 1000 \frac{t_d t_f}{d_b^2}$.

Оценка сходимости теоретических результатов расчета и полученных в результате расчета методом конечных элементов (МКЭ) суммарных напряжений, возникающих вблизи примыкания трубы к фланцу, осуществлялась с использованием критерия согласия Пирсона χ^2 . Критическое значение критерия согласия Пирсона равняется 117,3 при уровне значимости 0,05, т. е. можно считать, что если фактический критерий согласия Пирсона меньше критического значения, то наблюдается соответствие фактических значений и теоретических. В общей сложности сравнивались результаты 150 расчетов, при изменении следующих геометрических характеристик хвостовика связей: сечение трубы 100 × 100 × 4 (5, 6, 7, 8); 120 × 120 × 4 (5, 6, 7, 8); 140 × 140 × 4 (5, 6, 7, 8); 160 × 160 × 4

(5, 6, 7, 8); $180 \times 180 \times 4$ (5, 6, 7, 8); $200 \times 200 \times 4$ (5, 6, 7, 8); толщина фланца 10, 12, 14, 16, 18 мм.

По результатам расчетов фактическое значение критерия согласия Пирсона составит:

- для формулы (1) 5 463,23;
- для формулы (2) 5 450,13;
- для формулы (3) 950,65;
- для формулы (4) 296,35;
- для формулы (5) 2 306,10.

Как видно, ни одна из формул не имеет допустимых показателей критерия согласия Пирсона при заданном уровне значимости. Наилучший показатель получен для формулы (4).

При анализе напряжений, полученных по формулам (1)–(3), можно отметить отсутствие составляющих, учитывающих общие напряжения. В связи с этим были уточнены данные формулы. В результате они получили следующий вид:

$$\frac{N}{\left[\frac{R_{yf} t_f D_f}{d_b - t_{fc}} + R_{yd} t_d d_b \right] + R_{yd} A_d} \leq 1, \quad (6)$$

$$\frac{N}{2R_{yf} t_d \left(t_{fc} + 7t_f \frac{R_{yf}}{R_{yd}} \right) + R_{yd} A_d} \leq 1, \quad (7)$$

$$\frac{N}{2R_{yf} t_d (t_{fc} + 5t_f) + R_{yd} A_d} \leq 1. \quad (8)$$

После чего для этих формул также был рассчитан критерий согласия Пирсона. В результате были получены следующие данные: для

формулы (6) $\chi^2 = 1\,299,94$; для формулы (7) $\chi^2 = 872,19$; для формулы (8) $\chi^2 = 98,90$.

Результаты, полученные по формуле (8), дают хорошую сходимость фактических значений с теоретическими. При этом обращает на себя внимание отсутствие в формуле величины габарита трубы d_b , хотя, как указывалось ранее (см. табл. 2), влияние ее на значение не так велико, с увеличением трубы со 100 до 200 мм локальные напряжения в хвостовике увеличиваются на 12 %. В связи с этим было принято решение о корректировке данной формулы. В результате проведенного анализа предлагается для расчета напряжений, возникающих в опорной части связей, следующая формула:

$$\frac{N}{2,45R_{yd} \frac{D_f}{d_b} t_d (t_{fc} + 4t_f - 2t_d) + R_{yd} A_d} \leq 1. \quad (9)$$

Для данной формулы $\chi^2 = 28,05$, что меньше критического значения критерия согласия Пирсона, равного 117,3 при уровне значимости 0,05, его значение значительно ниже, чем для формулы (8).

По результатам проведенного исследования можно сделать следующий вывод: формула для определения несущей способности опорных частей связей типа Ф, приведенная в действующем нормативном документе СП 294.1325800.2017, дает заниженные значения. Для определения напряженного состояния предлагается формула (9) как для растянутых, так и для сжатых элементов.

Библиографический список

1. Справочник проектировщика. Металлические конструкции / под ред. Н. П. Мельникова. М. : Стройиздат, 1980. 776 с.
2. СН РК 5.04-07.2004. Пособие по расчету и конструированию стальных сейсмостойких каркасов многоэтажных зданий (в развитие СНиП РК 2.03-04-2004) / Комитет по делам строительства и жилищно-коммунального хозяйства, Министерство индустрии и торговли Республики Казахстан. Астана, 2005. Ч. 2. 46 с.
3. Joints in Steel Construction. Simple Connections / The Steel Construction Institute and The British Constructional Steelwork Association. Ascot, Berkshire : Silwood park, 2002. 502 p.
4. Типовые строительные конструкции, изделия и узлы. Сер. 1.420.3-36.03 : Каркасы стальные типа «УНИТЕК». Одноэтажные производственные здания с применением конструкций из профилей стальных гнутых замкнутых сварных квадратных и прямоугольных. Екатеринбург, 2007. Вып. 0-1. 245 с.
5. Типовые строительные конструкции, изделия и узлы. Сер. 1.460.3-15.1KM : Стальные конструкции покрытий одноэтажных производственных зданий с применением ферм с поясами из широкополочных двутавров. М., 1982. Вып. 1. 116 с.
6. Мухин А. В. Напряженно-деформированное состояние узлов ферм из замкнутых гнутосварных профилей : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01. М., 2007. 112 с.
7. СП 294.1325800.2017. Конструкции стальные. Правила проектирования. М., 2017. 158 с.

8. ТКП EN 1993-1-8-2009 (02250). Технический кодекс установившейся практики. Еврокод 3 : Проектирование стальных конструкций. Ч. 1–8 : Расчет соединений / Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь. Минск, 2010. 123 с.

9. Design guide for rectangular hollow section (RHS) joints under predominantly static loading / J. A. Packer, J. Wardenier, X.-L. Zhao, G. J. van der Vegte and Y. Kurobane. Zoetermeer : CIDECT, 2009. 156 p.

10. Руководство по проектированию стальных конструкций из гнутосварных замкнутых профилей. М. : ЦНПИАСС, 1978. 44 с.

A. A. Novoselov, I. A. Khusenova

Numerical-Analytical Studies of Stress State in Supporting Parts of Steel Bracing Elements

Abstract. The resistance to horizontal wind forces or seismic induced forces is the main function of bracing system in steel braced frames. Stressed-state strength of bracing system determines the durability of the steel braced frame first and last.

This paper considers numerical-analytical studies of stress state in supporting parts of steel bracing elements made of rectangular hollow sections. To determine the stress state in supporting parts of bracing system we used computer system for analyzing structure strength by the finite-element programme SCAD Office. The paper considers three types of supporting parts of bracing system which are most widely used in building. The size influence of bracing supporting parts (rib depth, gusset plate depth, profile gabarite, profile depth) on local state of stress has been determined. The results obtained by using normative methods for determining the stress state in support bracing parts have been compared to the results obtained by using software application. The formulae for determining stress which appear in the web of the main bracing element have been suggested. Recommendations for designing of supporting part in steel braced frames have been made.

Key words: *stress state; steel bracing element; bracing connections; bracing fastener; cross-section made of rectangular or square tubes.*

Новоселов Алексей Анатольевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Здания, строительные конструкции и материалы» СГУПС. E-mail: naa@stu.ru

Хусенова Ирина Алексеевна – магистрант направления «Строительство» СГУПС. E-mail: irinanovoselo@yandex.ru