УДК 69.033.8

© В. С. Широков, ведущий инженер
(ООО «СамараНИПИнефть», Самара, Россия)
E-mail: ShirokovViacheslav@gmail.com
© Т. Е. Гордеева, канд. техн. наук, доцент
(Самарский государственный технический
университет, Самара, Россия)
E-mail: Ftgs-sgasu@mail.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2020-17-6-90-96

© V. S. Shirokov, leading engineer
(LLC «SamaraNIPIneft», Samara, Russia)
E-mail: ShirokovViacheslav@gmail.com
© Т. Е. Gordeeva, PhD in Sci. Tech., Associate Professor
(Samara State Technical University,
Samara, Russia)
E-mail: Ftgs-sgasu@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ЖЕСТКОСТИ УЗЛА СОЕДИНЕНИЯ РИГЕЛЯ СО СТОЙКОЙ МОДУЛЬНОГО ЗДАНИЯ

RESEARCH OF JOINT CONNECTION RIGIDNESS OF CROSSBAR AND COLUMN IN A MODULAR BUILDING

Рассматривается жесткость узловых соединений модульных зданий. Исследуются узлы соединения стоек и ригелей сечением в виде квадратных труб. Исследование проведено компонентным методом конечных элементов с применением программного комплекса IDEA StatiCA, классификация жесткостей узлов принята согласно Eurocode 3. Рассматриваются узловые соединения с непосредственным примыканием ригеля к стойке, а также соединения с ребром жесткости. В ходе работы получены значения вращательных жесткостей узловых соединений при различных параметрах. Установлены граничные характеристики, при которых узловые соединения следует считать жесткими.

Ключевые слова: модульные здания, вращательная жесткость, жесткие узлы, полужесткие узлы.

The paper considers the joint connection rigidity in a modular building. The joint connection of columns and crossbars with a cross section in the form of square pipes are investigated. The study was carried out by the component finite element method using the IDEA StatiCA software package, the classification of joint connections was adopted according to Eurocode 3. The authors consider two types of joint connections, namely, the ones with an angle stiffener and the ones without an angle stiffener. In the course of research, there were obtained the values of the rotational rigidity of joint connections for various parameters. The boundary characteristics at which joint connections should be considered rigid have been established.

Keywords: modular buildings, rotational rigidity, rigid joints, semi-rigid joints.

Модульные здания — сооружения, состоящие из объемных блок-модулей. При этом каждый модуль является законченным объектом с точки зрения строительных конструкций, т. е. имеет геометрически неизменяемый каркас, способный самостоятельно выдерживать нагрузки, действующие на него. Принципиальная схема одного блок-модуля представлена на рис. 1.

В статье [1] отмечается, что узловые соединения ригелей и стоек играют важную роль при проектировании несущего стального каркаса модульных зданий. Также указано, что для обеспечения необходимых эксплуатационных параметров необходимо обеспечивать жесткое сопряжение ригелей и стоек. Данный узел должен иметь достаточную вращательную жесткость,

чтобы обеспечить геометрическую неизменяемость каркаса (см. рис. 1).

В механике принято разделение узлов соединения элементов на шарнирные и жесткие, а также полужесткие. Условия соединения, принятые для расчета, сильно влияют на распределение усилий в элементах системы. Поэтому крайне важно правильно оценивать и учитывать жесткость узлов [2, 3].

В отечественной практике строительства принятие решения о жесткости (шарнирности) узлов металлических конструкций сводится к применению известных конструктивных решений, для которых многолетним опытом использования подтверждено соответствие конструктивного исполнения и расчетных допущений.

Рис. 1. Схема несущего каркаса блок-модуля: 1 — нижняя рама основания; 2 — верхняя рама потолка; 3 — стойка

Однако при разработке и применении новых нестандартных решений по соединению элементов возникает необходимость определения действительной вращательной жесткости узла. Методика определения вращательной жесткости приведена в Eurocode 3, который устанавливает критерии и границы для жестких, полужестких и шарнирных узлов [3]. Данные границы основаны на сравнении начальной вращательной жесткости узла $S_{j,ini}$ и изгибной жесткости примыкающего элемента. Согласно Eurocode 3, узел следует классифицировать как жесткий при условии:

$$S_{j,ini} \geq k_b EI_b / L_b, \quad (1)$$

где $k_b = 25$ — коэффициент для рам каркасов без системы связей; E — модуль упругости стали;

I_b, L_b — момент инерции и длина ригеля, соответственно.

Вращательную жесткость для некоторых видов узлов можно определять компонентным методом, который описан в Eurocode 3, для более сложных узлов используется метод конечных элементов (МКЭ) [4, 5]. МКЭ позволяет определить жесткость любого узла, однако имеет существенный недостаток, связанный со сложностью построения расчетной схемы. Этот недостаток без потери качества устраняет компонентный метод конечных элементов (КМКЭ), реализованный в ПК IDEA StatiCA [6, 7]. При помощи данного программного комплекса можно довольно быстро провести значительное количество вычислений с разными параметрами, что позволяет классифицировать по жесткости тип узлового соединения, а не только один конкретный узел. В данной статье для исследования вращательной жесткости узла используется учебная версия ПК IDEA StatiCA.

Существует множество вариантов узловых сопряжений модульных зданий, которые зависят в первую очередь от сечений элементов горизонтальных рам и стоек [8–10]. При этом возможны разные варианты соединения: на сварке, на болтах, через специальные коннекторы. Одним из самых распространенных узлов модульных зданий в строительной практике является узел соединения стоек и ригелей, выполненных из прямоугольных или квадратных труб, на сварке (рис. 2). Подобные узлы описаны в литературе [11–15] и широко используются в проектной

Рис. 2. Схема узла «труба — труба»: 1 — стойка; 2 — ригель; 3 — ребро; 4 — опорная пластина

практике. Далее данный узел будем обозначать «труба — труба».

Предметом данного исследования является вращательная жесткость узлового соединения ригеля и стойки модульного здания типа «труба — труба».

Рассматривается узел соединения элементов каркаса модульного здания из квадратных труб с непосредственным примыканием друг к другу. Ригели привариваются к стойкам по всему периметру. Сверху стоек имеется опорная плита, которая играет роль заглушки, а также служит элементом для соединения модулей по высоте либо опирания стропильных конструкций. Для обеспечения большей жесткости устраивается ребро в месте соединения ригеля и стойки, однако имеются решения и без ребра.

В данной статье рассматривается два варианта узлового соединения: без ребра и с ребром. В узле сходится три несущих элемента (стойка и два ригеля), однако при исследовании жесткости примыкания элемента нет необходимости моделировать оба ригеля.

Расчетная модель узла в ПК IDEA StatiCA состоит из стойки с заглушкой, к которой приварен ригель (рис. 3). Стойка является опорным элементом и имеет внизу закрепления по всем шести направлениям. Перемещения ригеля ограничены вертикальной плоскостью. К свободному концу ригеля приложен единичный момент M_{Ed} . При определении вращательной жесткости узла важен предельный момент $M_{j,Rd}$, который программный комплекс вычисляет самостоятельно, важно лишь направление момента M_{Ed} .

В ходе исследования рассчитан ряд схем с разными параметрами соединяемых элементов. Принят следующий набор сечений элементов:

- стойки: квадратные трубы 60×4, 60×5, 60×6, 70×4, 70×5, 70×6, 80×4, 80×5, 80×6, 90×4, 90×5, 90×6, 100×4, 100×5, 100×6, 120×4, 120×5, 120×6;
- ригели: квадратные трубы 60×4, 60×5, 60×6, 70×4, 70×5, 70×6, 80×4, 80×5, 80×6, 90×4, 90×5, 90×6, 100×4, 100×5, 100×6, 120×4, 120×5, 120×6.

К стойкам одного сечения поочередно крепились ригели различных сечений размерами, не превышающими габаритов стойки. Фрагмент сводных результатов определения вращательной жесткости $S_{j,ini}$ приведен в таблице.

Из представленной таблицы видно, что толщина стенки ригеля сильно не влияет, а в некоторых случаях даже оказывает негативный эффект, на жесткость соединения. С увеличением толщины полки стойки увеличивается жесткость самой полки, что приводит к уменьшению угла поворота, а следовательно, к повышению вращательной жесткости узла. Наибольшей жесткостью обладают соединения стоек и ригелей одинаковой ширины сечения, так как в этом случае стенки стоек непосредственно включаются в работу и являются по сути ребрами жесткости.

Для большей наглядности на рис. 4 приведен график изменения вращательной жесткости крепления ригеля из трубы 100×4 к стойкам различного сечения. Сплошной кривой показана минимальная вращательная жесткость $S_{j,R}$ соединения, при которой узел можно считать жестким в зависимости от пролета. Горизонтальными линиями показаны значения вращательной жесткости $S_{j,ini}$, вычисленной в ПК IDEA StatiCA для различных сечений стоек. То есть узел является жестким, если горизонтальная линия располагается выше кривой $S_{j,R}$. Например, при креплении ригеля из трубы 100×4 к стойке из трубы 120×6 при пролете ригеля более 6 м узел является жестким, при пролете менее 5 м — полужестким.

Согласно рис. 4 узловое решение при непосредственном креплении ригеля к стойке может быть как жестким, так и полужестким. Причем

Рис. 3. 3D-модель узла в ПК IDEA StatiCA: C — стойка; B — ригель

Значения вращательной жесткости $S_{j,ini}$ при различных сечениях стоек и ригелей

Элемент		Ригель											
		80×4	80×5	80×6	90×4	90×5	90×6	100×4	100×5	100×6	120×4	120×5	120×6
Стойка	80×4	1,7	1,8	1,4	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	80×5	2,4	2,4	2,1	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	80×6	3,1	3,8	2,9	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	90×4	0,9	1,0	0,8	2,2	2,3	1,8	–	–	–	–	–	–
	90×5	1,4	1,4	1,2	3,0	2,9	2,6	–	–	–	–	–	–
	90×6	1,9	2,3	1,8	3,9	4,6	3,6	–	–	–	–	–	–
	100×4	0,8	0,8	0,6	1,2	1,2	1,0	2,7	2,8	2,2	–	–	–
	100×5	1,1	1,1	1,0	1,7	1,7	1,6	3,6	3,6	3,3	–	–	–
	100×6	1,5	1,8	1,4	2,4	2,8	2,2	4,7	5,5	4,4	–	–	–
	120×4	0,7	0,7	0,6	0,9	0,9	0,8	1,2	1,2	1,0	3,8	4,0	3,2
	120×5	0,9	0,9	0,9	1,2	1,2	1,1	1,7	1,7	1,5	5,1	5,0	4,6
	120×6	1,2	1,5	1,2	1,6	1,9	1,6	2,3	2,6	2,2	6,7	7,7	6,2

с увеличением сечения ригеля увеличивается и минимальный пролет, при котором узел можно считать жестким, кривая $S_{j,R}$ как бы перемещается вверх относительно горизонтальных линий $S_{j,ini}$. Так, при сопряжении со стойкой 120×4 узел крепления ригеля в зависимости от его сечения является жестким при следующих значениях пролета:

- для труб 60×4 — более 5,7 м;
- для труб 70×4 — более 7,6 м;

- для труб 80×4 — более 8,4 м;
- для труб 90×4 — более 9,5 м;
- для труб 100×4 — более 9,9 м.

Таким образом, для того чтобы узел соединения классифицировать как жесткий, ригель должен иметь больший пролет по мере увеличения его сечения, а модульные здания имеют поперечный размер менее 3 м. Поэтому для повышения вращательной жесткости узла следует добавить

Рис. 4. График предельной вращательной жесткости для ригеля из трубы 100×4

ребро жесткости. На рис. 5 представлена модель узла с ребром в ПК IDEA StatiCA. Параметры узловых соединения приняты такие же, как для узла, описанного на рис. 3, но с добавлением ребра толщиной 4 мм. В рамках исследования изменялась высота ребра h_p .

В ходе исследования определены вращательные жесткости с ребром для четырех узловых соединений «стойка-ригель»: 80×4 — 80×4, 90×4 — 90×4, 100×4 — 100×4 и 120×4 — 120×4.

Рис. 5. 3D-модель узла с ребром в ПК IDEA StatiCA

На рис. 6 представлен график изменения вращательной жесткости узла крепления ригеля из трубы 100×4 с ребром к стойке из трубы 100×4. Сплошной кривой показана вращательная жесткость $S_{j,ini}$, вычисленная в ПК IDEA StatiCA при различных размерах ребра h_p . Горизонтальными линиями показаны минимальные значения вращательной жесткости для различных пролетов ригеля, при которых узловое соединение следует считать жестким.

Из представленного графика на рис. 6 видно, что ребро значительно повышает вращательную жесткость узлового соединения. При этом при приближении высоты ребра к высоте сечения ригеля происходит резкое нарастание $S_{j,ini}$. При следующих соотношениях высоты ребра к высоте сечения ригеля вращательная жесткость устремляется в бесконечность, т. е. узел является однозначно жестким при любом пролете ригеля:

- для 80×4 — 1,125;
- для 90×4 — 1,22;
- для 100×4 — 1,30;
- для 120×4 — 1,33.

Для всех рассмотренных вариантов узловых соединений общий характер изменения вращательных жесткостей соответствует графикам, приведенным на рис. 4 и 6.

Рис. 6. Вращательная жесткость узла крепления трубы 100×4 с ребром

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Узловые соединения с непосредственным примыканием ригеля к стойке в зависимости от пролета ригеля могут быть как жесткими, так и полужесткими.

2. На вращательную жесткость узла не влияет толщина стенки ригеля.

3. С увеличением толщины полки стойки повышается жесткость узлового соединения.

4. Наибольшей вращательной жесткостью обладают соединения с равными ширинами сечений ригеля и стойки.

5. Ребра жесткости значительно повышают вращательную жесткость узла.

6. При значениях высоты ребра порядка 1,3...1,5 высоты сечения ригеля вращательная жесткость устремляется в бесконечность и узел является однозначно жестким.

Библиографический список

1. Широков В. С., Соловьев А. В. Анализ конструктивного исполнения серийных модульных зданий // Градостроительство и архитектура. 2018. № 1 (30). С. 24–27. DOI: 10.17673/Vestnik.2018.01.4.
2. Туснина В. М., Платонова В. Д. Численный анализ жесткости фланцевых узлов «балка-колонна» // Промышленное и гражданское строительство. 2020. № 9. С. 28–33. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.09.28-33.
3. Бакшанский И. С., Жабинский А. Н. Влияние конструктивных особенностей болтовых фланцевых узлов на распределение внутренних усилий в поперечной раме здания // Проблемы современного строительства: материалы Междунар. науч.-техн. конф. Минск, 28 мая 2019 г. Минск: БНТУ, 2019. С. 49–59.
4. Надольский В. В. Расчет и конструирование фланцевого соединения элементов прямоугольного сечения, подверженных центральному растяжению // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки. 2018. № 8. С. 121–130.
5. Рюмин В. В. Анализ податливости рамных узлов на высокопрочных болтах // Современные строительные конструкции из металла и древесины. 2012. № 16 (1). С. 216–223.
6. Sabatka L., Wald F., Kabeláč J., Kolaja D., Pospíšil M. Structural analysis and design of steel connections using component-based finite element model // Journal of Civil Engineering and Architecture. 2015. № 9. Pp. 895–901. DOI:10.17265/1934-7359/2015.08.002.

7. Бароев Р. В. Расчёт узлов стальных конструкций компонентным методом конечных элементов // URL: http://isicad.ru/ru/articles.php?article_num=20749 (дата обращения: 19.10.2020).

8. Холопов И. С., Широков В. С., Соловьев А. В. Усиление несущих конструкций и узловых соединений быстровозводимого модульного здания с целью обеспечения его безопасной эксплуатации // Вестник Липецкого государственного технического университета. 2015. № 4 (26). С. 56–62.

9. Bong-Ho Cho, Jae-Sub Lee, Hongjin Kim, Dae-Jin Kim. Structural performance of a new blind-bolted frame modular beam-column connection under lateral loading // Applied Sciences. 2019. № 9 (9), 1929. DOI:10.3390/app9091929.

10. Andrew William Lacey, Wensu Chen, Hong Hao, Kaiming Bi. New interlocking inter-module connection for modular steel buildings: Experimental and numerical studies // Engineering Structures. 2019. Vol. 198, 109465. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109465>.

11. Liew J. Y. R., Dai Z., Chua Y. S. Steel concrete composite systems for modular constructions of high-rise buildings // 12th International Conference on Advances in Steel-Concrete Composite Structures (ASCCS 2018). Universitat Politècnica de València, València, Spain, June 27-29, 2018. Pp. 59–65. DOI: <http://dx.doi.org/10.4995/ASCCS2018.2018.7220>.

12. Sze Dai Pang, J Y Richard Liew Liew, Ziquan Dai, Yanbo Wang. Prefabricated prefinished volumetric construction joining techniques review // 2016 Modular and Offsite Construction (MOC) Summit. Edmonton, Alberta, Canada, September 29 - October 01, 2016. Pp. 249–256. DOI: <http://dx.doi.org/10.4995/ASCCS2018.2018.7220>.

13. En-Feng Deng, Liang Zong, Yang Ding, Zhe Zhang, Jun-Feng Zhang, Feng-Wei Shi, Li-Ming Cai, Shu-Cai Gao. Seismic performance of mid-to-high rise modular steel construction – A critical review // Thin-Walled Structures. 2020. Vol. 155, 106924. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106924>.

14. Andrew William Lacey, Wensu Chen, Hong Hao, Kaiming Bi. Effect of inter-module connection stiffness on structural response of a modular steel building subjected to wind and earthquake load // Engineering Structures. 2020. Vol. 213, 110628. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110628>.

15. Andrew William Lacey, Wensu Chen, Hong Hao, Kaiming Bi. Structural response of modular buildings – An overview // Journal of Building Engineering. 2018. Vol. 16. Pp. 45–56. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.job.2017.12.008>.

References

1. Shirokov V. S., Solov'ev A. V. Analiz konstruktivnogo ispolneniya seriynykh modul'nykh zdaniy [Analysis

of the structural design of serial modular buildings]. *Gradostroitel'stvo i arkhitektura – Urban Planning and Architecture*, 2018, no. 1 (30), pp. 24–27. DOI: 10.17673/Vestnik.2018.01.4.

2. Tushina V. M., Platonova V. D. *Chislennyi analiz zhestkosti flantsevykh uzlov «balka-kolonna»* [Numerical analysis of the rigidity of flange assemblies “beam-column”]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo – Industrial and Civil Engineering*, 2020, no. 9, pp. 28–33. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.09.28-33.

3. Bakshanskiy I. S., Zhabinskiy A. N. *Vliyanie konstruktivnykh osobennostey boltovykh flantsevykh uzlov na raspredelenie vnutrennikh usiliy v poperechnoy rame zdaniya* [Influence of design features of bolted flange units on the distribution of internal forces in the transverse frame of the building]. *Trudy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. Minsk, 28 maya 2019 g «Problemy sovremennogo stroitel'stva»* [Proceedings of International Scientific and Technical University. conf. Minsk, May 28, 2019 “Problems of Modern Construction”]. Minsk, BNTU Publ., 2019, pp. 49–59.

4. Nadol'skiy V. V. *Raschet i konstruirovaniye flantseвого soedineniya elementov pryamougol'nogo secheniya, podverzhennykh tsestral'nomu rastyazheniyu* [Calculation and design of the flange connection of rectangular cross-section elements subjected to central tension]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya F. Stroitel'stvo. Prikladnye nauki – Bulletin of Polotsk State University. Series F. Construction. Applied Sciences*, 2018, no. 8, pp. 121–130.

5. Ryumin V. V. *Analiz podatlivosti ramnykh uzlov na vysokoprochnykh boltakh* [Analysis of the compliance of frame assemblies on high-strength bolts]. *Sovremennyye stroitel'nye konstruksii iz metalla i drevesiny – Modern building structures made of metal and wood*, 2012, no. 16 (1), pp. 216–223.

6. Sabatka L., et al. *Structural analysis and design of steel connections using component-based finite element model*. *Journal of Civil Engineering and Architecture*, 2015, no. 9, pp. 895–901. DOI: 10.17265/1934-7359/2015.08.002.

7. Baroev R. V. *Raschyot uzlov stal'nykh konstruksiy komponentnym metodom konechnykh elementov* [Calculation of the steel structures of the component by finite element method]. Available at: http://isicad.ru/ru/articles.php?article_num=20749 (accessed: 19.10.2020).

8. Kholopov I. S., Shirokov V. S., Solov'ev A. V. *Usilenie nesushchikh konstruksiy i uzlovykh soedineniy*

bystrovozvodimogo modul'nogo zdaniya s tsel'yu obespecheniya ego bezopasnoy ekspluatatsii [Strengthening of load-bearing structures and nodal connections of a pre-fabricated modular building in order to ensure its safe operation]. *Vestnik Lipetskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of Lipetsk State Technical University*, 2015, no. 4 (26), pp. 56–62.

9. Bong-Ho Cho, Jae-Sub Lee, Hongjin Kim, Dae-Jin Kim. Structural performance of a new blind-bolted frame modular beam-column connection under lateral loading. *Applied Sciences*. 2019, no. 9 (9), 1929. DOI: 10.3390/app9091929.

10. Andrew William Lacey, Wensu Chen, Hong Hao, Kaiming Bi. New interlocking inter-module connection for modular steel buildings: Experimental and numerical studies. *Engineering Structures*, 2019, vol. 198, 109465. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109465>.

11. Liew J. Y. R., Dai Z., Chua Y. S. *Steel concrete composite systems for modular constructions of high-rise buildings*. Proceedings of the 12-th International conference on advances in steel-concrete composite structures (ASCCS 2018). Universitat Politècnica de València Publ., València, Spain, June 27–29, 2018, pp. 59–65. DOI: <http://dx.doi.org/10.4995/ASCCS2018.2018.7220>.

12. Sze Dai Pang, J Y Richard Liew Liew, Ziquan Dai, Yanbo Wang. *Prefabricated prefinished volumetric construction joining techniques review*. Proceedings of the Modular and Offsite Construction (MOC) Summit 2016. Edmonton, Alberta, Canada, September 29 – October 01, 2016, pp. 249–256. DOI: <http://dx.doi.org/10.4995/ASCCS2018.2018.7220>.

13. En-Feng Deng, et al. Seismic performance of mid-to-high rise modular steel construction. A critical review. *Thin-Walled Structures*, 2020, vol. 155, 106924. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106924>.

14. Andrew William Lacey, Wensu Chen, Hong Hao, Kaiming Bi. Effect of inter-module connection stiffness on structural response of a modular steel building subjected to wind and earthquake load. *Engineering Structures*, 2020, vol. 213, 110628. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110628>.

15. Andrew William Lacey, Wensu Chen, Hong Hao, Kaiming Bi. Structural response of modular buildings. An overview. *Journal of Building Engineering*, 2018, vol. 16, pp. 45–56. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2017.12.008>