



УДК 624.014.2

Агафонкин В.С. – кандидат технических наук, профессор

E-mail: agafonkin@kgasu.ru

Исаева Л.А. – кандидат технических наук, доцент

E-mail: isaeva.5353@mail.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зелёная, д. 1

Новые конструктивные решения полужестких узлов рамных конструкций и особенности их работы

Аннотация

Выполнен анализ конструктивных решений узловых соединений ригелей с колоннами в стальных рамных каркасах. Дана классификация узлов каркасов по совместности угловых и линейных перемещений. Рассмотрены наиболее часто применяемые узлы и особенности их работы. Предложены новые конструктивные решения полужестких узлов. В качестве примера рассмотрены особенности работы полужесткого узла соединения ригеля с колонной с помощью вертикального ребра. Разработана методика оценки податливости такого узла за счет упругих или упруго-пластических деформаций ребра с учетом сдвиговых деформаций от перерезывающей силы. Выполнена оценка влияния сдвига на угловые перемещения ригеля.

Ключевые слова: стальные каркасы, полужесткие узлы, угловые и линейные перемещения, прогиб стержня, сдвиговые деформации.

Широкое применение стальных каркасов в зданиях и сооружениях различного назначения неизбежно связано с вопросами их надежности, уточнения методов расчета, совершенствования компоновочных и конструктивных решений. Среди всего комплекса задач важное место занимает проблема выбора узлового соединения и учета особенностей его работы при формировании расчетных схем и назначении проектных параметров.

Узлы стальных каркасов принято разделять на жесткие, полужесткие и шарнирные [2, 3]. Такая классификация нуждается в более детальном определении типов узлов с позиций особенностей их работы в каркасах зданий и соответствия принимаемым расчетным схемам.

Исследованию работы узловых соединений элементов каркаса с оценкой влияния и учета особенностей конструктивных решений в расчетах при определении НДС посвящено много работ [1, 5, 6, 7, 8]. В работах приводятся различные методики расчета прочности узловых соединений, в том числе по деформированной расчетной схеме [9]. В них отмечается также необходимость учета реальной изгибающей жесткости узловых соединений как одного из путей повышения надежности и эффективности стальных каркасов.

Из анализа распределения изгибающих моментов в элементах многоэтажных рам известно, что узловые моменты в ригелях существенно больше пролетных [4]. Для большинства болтовых узловых соединений, особенно для фланцевых (рис. 1а), в результате их податливости происходит перераспределение изгибающих моментов по элементам каркаса. Количественная оценка такого распределения для известных узлов на болтах в работах не приводится, а деформативность их учитывается в расчетах прочности соединений.

Возникает вопрос о разработке конструктивных решений узлов, в которых возможно определять расчетным путем величину податливости с целью регулирования и выравнивания узловых и пролетных изгибающих моментов, а значит и снижения их максимальных значений в ригелях рам. Это приводит к снижению металлоемкости стальных каркасов. В некоторых работах отмечается возможность выравнивания моментов в сварных узлах с помощью накладок по поясам за счет их деформативности (рис. 1в). Такого типа соединения следует отнести к полужестким.

Авторами приводятся новые конструктивные решения узловых соединений, отвечающих требованиям регулирования и выравнивания пролетных и опорных моментов в ригелях стальных каркасов с целью снижения их металлоемкости. Ставится задача разработки. Кроме этого предлагаются расчетные модели по учету особенностей работы податливых узловых соединений.

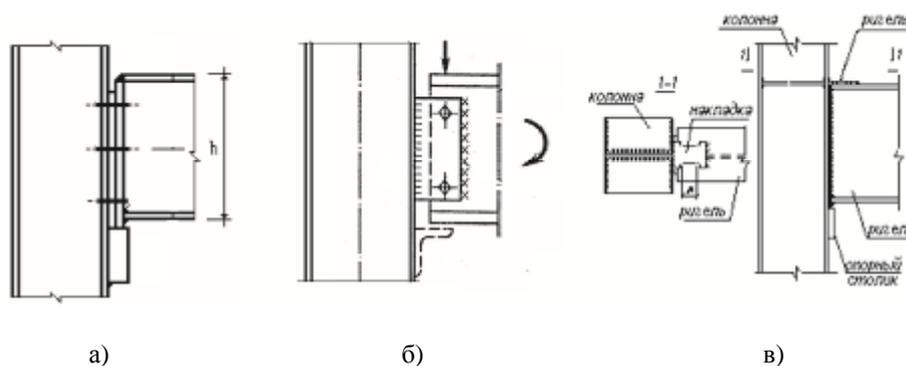


Рис. 1. Узлы рамных каркасов:

а – фланцевого типа; б – через вертикальное ребро; в – с накладкой по верхнему поясу

Предлагаемые новые решения полужестких узлов позволяют реализовывать регулирование и выравнивание моментов при их работе в упругой стадии, что является преимуществом таких узлов по сравнению с узлами, работающими в упруго-пластической стадии. В новых конструктивных решениях узлов поворот опорного сечения обеспечивается упругими деформациями фланцев (рис 2 а, б).

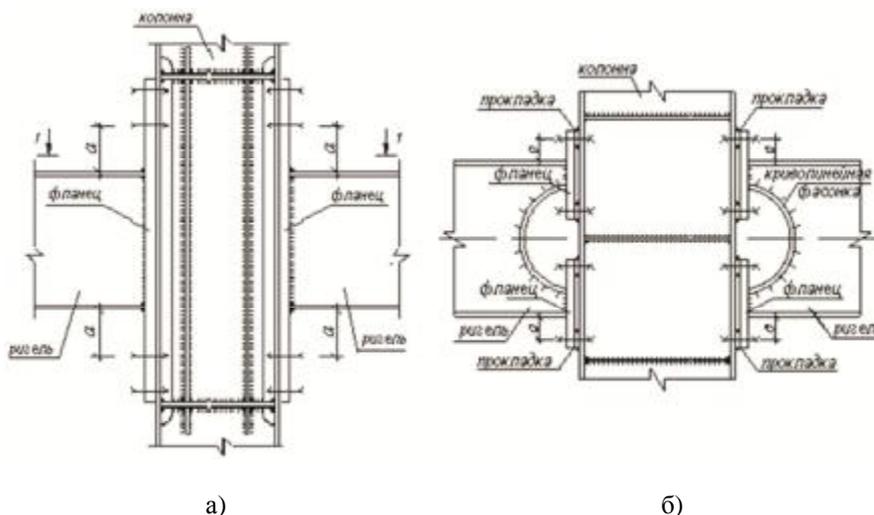


Рис. 2. Новые конструктивные решения полужестких узлов сопряжения ригеля и колонны:
а – с помощью фланца с разрезкой колонны; б – через опорное ребро фланцевого типа

Анализ особенностей работы соединений элементов рамных каркасов показывает, что узлы могут различаться по способности воспринимать силовые воздействия, по совместности угловых и линейных перемещений в узлах по сечению ригеля и колонны. Обобщенная графическая интерпретация узловых соединений разного типа приведена на рис. 3.

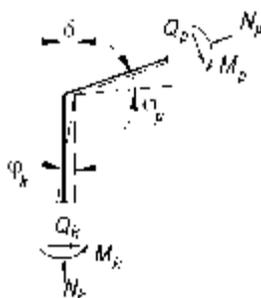


Рис. 3. Схема узловых соединений элементов каркаса

В соответствии с предложенным подходом жесткие узлы способны воспринимать изгибающие моменты, при этом имеется совместность угловых и линейных перемещений по сечению ригеля и колонны:

$$M_{p,k} = 0; N_{p,k} = 0; Q_{p,k} = 0; Dj = j_p - j_k = 0; Dd = d_p - d_k = 0. \quad (1)$$

Шарнирный узел может быть реализован в каркасе как полный или примыкающий шарнир. В случае полного шарнира по сечению ригель-колонна отсутствуют изгибающие моменты как в ригеле, так и в колонне, отсутствует совместность угловых перемещений, а совместность линейных перемещений обеспечена:

$$M_{p,k} = 0; N_{p,k} = 0; Q_{p,k} = 0; Dj = j_p - j_k = 0; Dd = d_p - d_k = 0. \quad (2)$$

В примыкающем шарнире в колонне по сечению ригель-колонна действует изгибающий момент:

$$M_p = 0; M_k = 0; N_{p,k} = 0; Q_{p,k} = 0; Dj = j_p - j_k = 0; Dd = d_p - d_k = 0. \quad (3)$$

Полужесткий узел так же, как и жесткий, может воспринимать изгибающий момент, однако отсутствует совместность угловых или линейных перемещений:

$$M_{p,k} = 0; N_{p,k} = 0; Q_{p,k} = 0; \\ Df = f_p - f_k = 0; Dd = d_p - d_k = 0; \text{ или } Df = f_p - f_k = 0; Dd = d_p - d_k = 0; \quad (4) \\ \text{или } Df = f_p - f_k = 0; Dd = d_p - d_k = 0.$$

Величина возможных перемещений определяется конструктивным решением узлов и должна определяться расчетом. Для конкретного конструктивного решения полужесткого узла соединения ригеля с колонной необходимо определять расчетом податливость по несовместности угловых Dj и линейных Dd перемещений.

Предложенная классификация позволяет определить расчетную схему с учетом особенностей работы узловых соединений по совместности или несовместности деформаций.

В качестве примера рассматривается узел соединения ригеля с колонной с помощью вертикального ребра (рис. 1б). Прочность такого узла для условий жесткого закрепления не обеспечивается. Возможность работы узла может рассматриваться только для случая обеспечения его работы как полужесткого. Расчетом необходимо определить податливость такого узла за счет упругих или упруго-пластических деформаций ребра и установить его геометрические параметры. При этом необходимым условием является обеспечение прочности соединения.

Используется расчетная схема в виде шарнирно опертой балки, нагруженной в пролете вертикальной нагрузкой и моментом на опорах (рис. 4а), предложенная авторами в работе [5]. Податливость узла в работе [5] рассматривалась за счет деформаций ребра только при изгибе (рис. 4б).

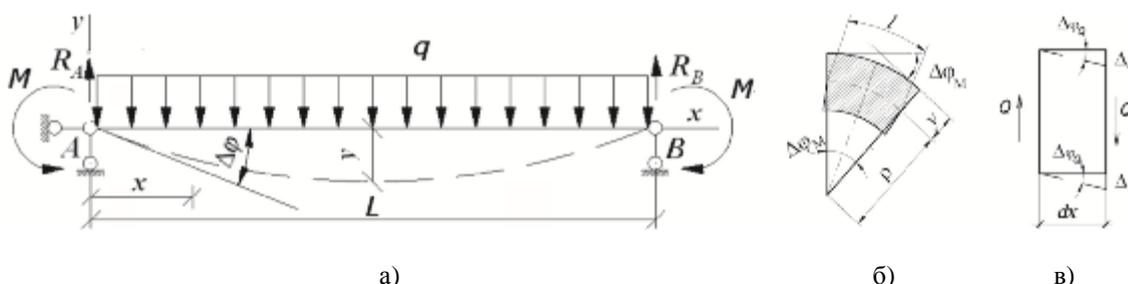


Рис. 4. Схемы деформирования:
а – ригеля; б – опорного ребра при изгибе; в – опорного ребра при сдвиге

При заданных по конструктивным требованиям параметрах сечения ребра определяется опорный момент из условия прочности сечения или прочности сварных швов.

Для определения угла поворота записывается дифференциальное уравнение:

$$EIy''(x) = \frac{R_A \times x^2}{2} - \frac{q \times x^3}{6} - Mx + C, \quad (5)$$

из которого определяется его выражение:

$$Dj = \frac{C}{EI_x} \text{ (град)}, \quad (6)$$

где C – константа интегрирования, вычисляемая из граничных условий.

Для заданного поперечного сечения ребра из условий изгиба определяется его длина (рис. 4 б):

$$l = Dj_M \times r, \quad (7)$$

где Dj_M – угол поворота от изгиба ребра;

$$r = \frac{y}{e}; \quad y = \frac{h_p}{2}; \quad \text{а } h_p \text{ – высота опорного ребра.}$$

Рассмотренная методика не учитывает влияние касательных напряжений на деформации, вызывающие дополнительный поворот узла.

В данной работе дается оценка влияния сдвига от перерезывающей силы на опоре на угловые перемещения ригеля. Угол поворота Dj состоит из суммы угловых перемещений изгиба и сдвига опорного ребра:

$$Dj = Dj_M + Dj_Q, \quad (8)$$

тогда:

$$Dj_M = Dj - Dj_Q, \quad (9)$$

Длина опорного ребра с учетом сдвига определяется по формуле (7).

При действии поперечных сил происходит сдвиг соседних сечений (рис. 4в), который можно представить выражением:

$$D_Q = Dj_Q \times dx, \quad (10)$$

Здесь Dj_Q – угол сдвига соседних сечений в пределах элементарной площадки dx (рис. 4 в).

Зависимость между касательными напряжениями и углом сдвига описывается законом Гука для сдвига $t = Dj_Q \times G$ (здесь G – модуль упругости при сдвиге).

Линейное перемещение сдвига элементарной площадки dx :

$$D_Q = m \frac{Q}{GA} dx, \quad (11)$$

где m – коэффициент неравномерности сдвигов по сечению, зависящий от формы поперечного сечения, для прямоугольного сечения $m=1,2$ для двутаврового профиля приближенно принимают $m = A/A_w$, где A_w – площадь вертикальной стенки.

Тогда угол сдвига:

$$Dj_Q = m \frac{Q}{AG}. \quad (12)$$

Для ригеля из двутавра 40Ш1 пролетом $L=7,5$ м и нагрузке $q=45,7$ кН/м угол сдвига опорного сечения составит:

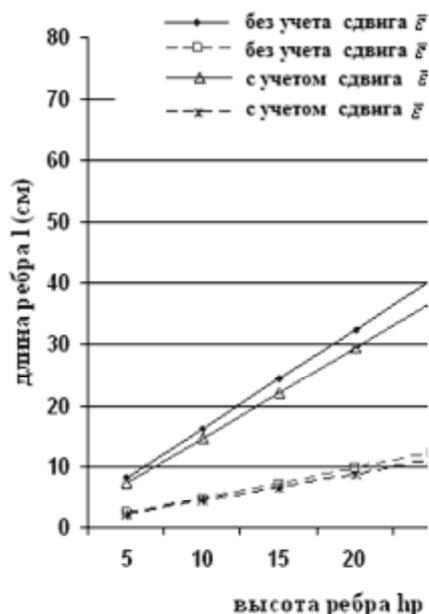
$$Dj_Q = 1,2 \times \frac{17137,5}{0,95 \times 80 \times 0,81 \times 10^6} = 0,000891 \text{ рад.}$$

Угол поворота опорного сечения $Dj = 0,0097$ рад (рис. 4 а).

С учетом сдвига от поперечной силы угол поворота Dj_M от изгиба ребра составит:

$$Dj_M = Dj - Dj_Q = 0,00881 \text{ рад.}$$

Зависимость между параметром l и высотой опорного ребра h_p для случаев ограничения величины пластических деформаций $\bar{\epsilon} = 3$ и $\bar{\epsilon} = 10$ показана на рис. 5. Учет сдвиговых деформаций ведет к уменьшению требуемой величины длины опорного ребра на 10 %.

Рис. 5. Зависимость параметра l от высоты ребра h_p

В результате выполненной работы получены соотношения между длиной ребра и его высотой, соответствующие заданному моменту в опорном сечении и нагрузке.

Установлено, что необходимую податливость соединения можно обеспечить только при работе ребра в упруго-пластической стадии.

Учет сдвига в расчетах податливости узловых соединений с применением опорных ребер ведет к более точному определению перераспределения опорных и пролетных моментов в ригелях стальных каркасов.

В расчетах полужестких узлов стальных рамных каркасов необходимо учитывать особенности работы этих узлов в зависимости от конструктивных решений.

Список библиографических ссылок

1. Святошенко А.Е. Исследование напряженного состояния элементов узловых соединений // Проблемы прочности и пластичности: сб. Нижегород. ун-та им. П.И. Лобачевского. – Н. Новгород, 2006, вып. 68. – С. 169-176.
2. Надольский В., Мартынов Ю. Особенности статического расчета по ТКП EN 1993-1-1 // Строительная наука и техника. – Минск, 2006, № 1. – С. 36-48.
3. Гарднер Л., Нетеркот Д.А. Руководство для проектировщиков к Еврокоду 3: Проектирование стальных конструкций EN 1993-1-1, 1993-1-3, EEN 1993-1-8: пер. с англ. // Минобрнауки РФ, ФГБОУ ВПО МГСУ, 2012. – 224 с.
4. Шебанин В.С., Шебанина Л.П., Бозга В.Г. Расчет стальных каркасов из универсальных элементов переменного сечения с гибкой стенкой // Вестник аграрной науки Причерноморья, 2013, вып. 3 (73). – С. 180-185.
5. Агафонкин В.С., Исаева Л.А. Влияние пластических деформаций на параметры узлов соединений стальных каркасов // Новое в архитектуре, проектировании строительных конструкций и реконструкции. Материалы VIII Всероссийской (II Международной) конференции. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2014. – С. 54-59.
6. Агафонкин В.С., Моисеев М.В. Сварные упругие узловые соединения элементов стальных рамных каркасов // Сборник научных трудов КазГАСУ. – Казань, Издательство КазГАСУ, 2010. – С. 20-23.

7. Молев И.В Святошенко А.Е. Повышение надёжности рамных узлов стальных каркасов // Доклады: XIV Польско Российско-Словацкий семинар Теоретич. основы строит. – Варшава, 2005. – С. 173-178.
8. Святошско А.Е. Анализ конструктивного решения рамного узла стального каркаса. // Тез. докл.: 10-я Нижегородская сессия молодых учёных. Технические науки. – Н. Новгород, 2005. – С. 40-42.
9. Катюшин В.В. Здания с каркасами из стальных рам переменного сечения (расчет, проектирование, строительство) // ОАО Издательство «Стройиздат». – М., 2005. – 656 с.

Agafonkin V.S. – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: agafonkin@kgasu.ru

Isaeva L.A. – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: isaeva.5353@mail.ru

Kazan State University of Architecture and Engineering

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaiya st., 1

New designs of semi-rigid nodes frame structure and features of their work

Resume

The article investigates the work of joints elements of steel framework. The analysis of constructive solutions of joints of crossbars with columns is made. Assessed the impact and accounting the features of constructive decisions in calculations of determining the stress-strain state. It is noted that one of the most important tasks is regulation and alignment of the span and reference points in the cross-bars of steel frames to reduce their metal content.

The authors sought to develop new projects of nodal connections that meet the requirements of regulation and leveling moments on the supports and in spans crossbars in steel frames.

Most of the task match semi nodal connections that are able to perceive the bending moment on a support, but with an extra turn or linear displacement. Presented the classification of frames units at the joint of angular and linear displacement. Considered the most commonly used semi-rigid nodes and assemblies feature of their work. Proposed new projects of semi-rigid assemblies that allows to realize the regulation and alignment of the moments in their work in the elastic stage. As an example, considered the work of a semi-rigid connection crossbars with column with vertical ribs. A method for evaluation of pliability units due to elastic or elastic-plastic deformations of the transverse edges of the lateral force is offered. Assessing the impact of the shift to the angular displacement of crossbars. Determining the ratio between the length of the vertical edges and height to provide a bending moment on a support. It is found that the necessary pliability node can be reached only when the rib in the elastic-plastic stage.

Keywords: steel structures, semi-rigid nodes, angular and linear movement, deflection stem, shear displacement.

Reference list

1. Svyatoshenko A.E. Research of the stress state of the elements junctions // Problems of Strength and Plasticity: Sat. Nizhegor. Zap them. II.I. Lobachevsky. – Nizhny Novgorod, 2006, vol. 68. – P. 169-176.
2. Nadolsky V., Martynov Yu. Features static calculation of TAP EN 1993-1-1 // Construction of Science and Technology. – Minsk, 2006, № 1. – P. 36-48.
3. Gardner L., Nethercote D.A. Guidelines for designers to Eurocode 3: Design of steel structures EN 1993-1-1, 1993-1-3, 1993-1-8 EEN: lane. with English // Ministry of Education and Science RF, FGBOU VPO MGSU, 2012. – 224 p.

4. Shebanin V.S., Shebanina L.P., Bozga V.G. Calculation of steel frames of the universal elements of variable section flexible wall // Bulletin of Agricultural Science Prichernomorya, 2013, vol. 3 (73). – P. 180-185.
5. Agafonkin V.S., Isayeva L.A. Influence of plastic deformation on the parameters of joints for steel frames // The new architecture, structural design and reconstruction. Proceedings of VIII All-Russian (II International) conference. – Cheboksary: Publisher Chuvashia. University Press, 2014. – P. 54-59.
6. Agafonkin V.S., Moiseev M.V. Welded elastic junctions of steel rack elements // Collected scientific works KGASU. – Kazan: Publisher KGASU, 2010. – P. 20-23.
7. Molev I.V., Svyatoshenko A.E. Improving the reliability of frame assemblies of steel frames // Reports: XIV Polish-Russian Slovak seminar Teoret. building foundations. – Warszawa, 2005. – P. 173-178.
8. Svyatoshsnko A.E. Analysis of constructive solutions frame assembly of the steel frame. Text. // Proc. rep.: 10th Nizhnii Novgorod session of young scientists. Technical engineering. – N. Novgorod, 2005. – P. 40-42.
9. Katyushin V.V. Buildings with a framework of steel frames of variable section (calculation, design, construction) // JSC Publisher «Stroyizdat». – M., 2005. – 656 p.