УДК 624.04 DOI: 10.33979/2073-7416-2024-116-6-4-14

ЗЕМЛЯНУХИН А.Д.[1], КАШЕВАРОВА Г.Г.[1], СОН М.П.[1]
[1] ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь, Россия.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОДАТЛИВЫХ ФЛАНЦЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Аннотация. *В данной работе представлены результаты исследования податливых фланцевых соединений в стальном каркасе. Расчет несущей способности и податливости фланцевых соединений является важным этапом проектирования и требует учета различных факторов, таких как анализ механических свойств материалов, геометрия, условия эксплуатации и тип нагрузок. Основная задача расчета сооружений – это обеспечение безопасности конструкций при минимизации затрат. Для этого необходимо использовать расчетные схемы, соответствующие реальной физической работе конструкций. При решении этой задачи использованы: натурные эксперименты, метод конечных элементов и аналитический метод предельного равновесия (МПР), который традиционно применяется в механике разрушения конструкций. Исследовано влияние изгибной жесткости фланца на процесс разрушение соединения. Предложено новое конструктивное решение податливого узла балки с колонной, для которого свойственна простота расчета и монтажа.*

Ключевые слова: *Т-образное соединение, фланцевый узел, численный эксперимент, податливое соединение.*

A.D. ZEMLYANUKHIN[1], G. KASHEVAROVA[1], M.P. SON[1].
[1]Perm national research polytechnic university, Perm, Russia

EXPERIMENTAL AND THEORETICAL STUDIES OF MALLEABLE FLANGE JOINTS

Abstract. *This paper presents the results of a study of pliable flange connections in steel frame. Calculation of the load carrying capacity and ductility of flange connections is an important design stage and requires consideration of various factors such as analysis of mechanical properties of materials, geometry, operating conditions and type of loads. The main objective of structural design is to ensure structural safety while minimizing cost. For this purpose, it is necessary to use calculation schemes that correspond to the real physical operation of structures. In solving this problem, the following were used: full-scale experiments, finite element method and analytical method of limit equilibrium (LEM), which is traditionally used in structural fracture mechanics. The influence of bending stiffness of the flange on the process of joint failure is investigated. A new design solution of a pliable beam-column assembly is proposed, which is characterized by simplicity of calculation and assembly.*

Keywords: *T-stub joint, flange connection, numerical experiment, semi rigid connection.*

Введение

В 2024 году в России значительно выросло производство стальных конструкций. В первом квартале 2024 года производство металлопродукции в России выросло на 16%, достигнув 1,14 млн тонн. Объем ввода в эксплуатацию жилых и нежилых зданий также существенно увеличился. Наибольший рост отмечается в промышленном секторе – 57,8%.

© Землянухин А.Д., Кашеварова Г.Г., Сон М.П., 2024

Несмотря на сложную экономическую ситуацию в РФ наблюдается потребность в новом строительстве как жилых, так и нежилых зданий. Применение фланцевых соединений в стальном каркасе позволяет снизить время строительства и ускорить ввод здания в эксплуатацию. Сборка данных соединений возможна в любых климатических условиях. Фланцевые соединения доказали свою надежность, долговечность и устойчивость к различным нагрузкам, в том числе динамическим. Главное достоинство использования фланцевых соединений — это превращение процесса строительства в процесс сборки его элементов путем соединения фланцев болтами.

Основные положения по проектированию фланцевых соединений изложены в нормативной документации. В РФ обязательным к выполнению при проектировании является СП16, где в одной из глав приведены общие указания по применению фланцевых соединений в строительстве. Имеется серия 2.440-2 рамных и шарнирных узлов, разработанная в 1989 г., в которой приводятся различные соединения, в том числе, фланцевые узлы примыкания балок к колонне. Отдельные пункты СП, где упоминаются фланцевые соединения, регламентируют общие принципы, но не дают инженерной методики расчета фланцевых соединений. В зарубежных нормах Еврокода EN 1993-1-1 есть разделы, посвященные фланцевым соединениям. В разделах приводится аналитическая методика расчета, основанная на компонентном методе расчета узлов. При помощи компонентного метода возможно выполнить расчет по первой и второй группе предельных состояний. Применение опыта других стран возможно, но иногда идет в разрез с положениями действующих российских норм.

Исследования фланцевых соединений ведутся и в настоящее время. Так, например, в научной публикации представлены натурные испытания фланцевых соединений с целью определения влияния зазоров во фланцевых соединениях [17] на напряженно-деформированное состояние узла. Согласно эксперименту, сделан вывод о работоспособности фланцевых соединений с зазорами до 2 мм, величина которых обусловлена перекосами полок или смещением колонн на монтаже.

В научной публикации [15] представлено исследование, включающее натурный эксперимент и математическое моделирование Т-образных фланцевых соединений. Цель исследования направлено на оценку влияния зазора во фланцевом соединении на несущую способность фланца. Авторы исследования установили степень влияния грибовидности на несущую способность фланца. Установлено, что наличие зазоров 1,5 мм в зоне болтов и грибовидность фланцев приводит к изменению условий развития рычажных сил и снижает несущую способность не более чем на 3 процента. В качестве одной из проблем проектирования фланцевых соединений по существующим зарубежным и отечественным методикам авторы Ведяков М. В. и Конин Д. В. отмечают то, что для упрощения расчета используется гипотеза недеформируемости плоскости контакта (полки колонны или фланца). При рассмотрении узла в сборе, с учетом деформирования, возникает рычажный эффект. Согласно экспериментальным данным, величина рычажного усилия может составлять до 40% от предельных за счет гибкости фланца и полки колонны.

Расчет несущей способности и податливости фланцевых соединений является важным этапом проектирования и требует учета различных факторов, таких как анализ механических свойств материалов, геометрия, условия эксплуатации и тип нагрузок. Учитывать податливость узла нужно, а в некоторых сооружениях необходимо. С другой стороны, расчет податливости представляет собой трудоемкую задачу. Есть необходимость разработки инженерной методики расчета податливых соединений, позволяющей запроектировать узел без проведения численных или натурных экспериментов, при этом механика расчета узла должна быть предельно простой.

Цель данного исследования состоит в развитии эффективных методов расчета несущей способности фланцевых соединений на основе экспериментальных и численных методов с целью разработки оптимальных узлов примыкания балки к колонне.

Модели и методы.

Для расчета фланцевых соединений с учетом развития пластических деформаций применяют метод предельного равновесия [6,7]. При этом различают три возможных механизма разрушения: 1- развитие глубоких пластических деформаций во фланце, 2- разрушение болтов с частичным развитием пластических деформаций во фланце, 3- разрушение болтов [8, 9]. На рис. 1 показаны механизмы разрушения соединения с увеличением соотношения изгибной жесткости фланца к прочности болтов.

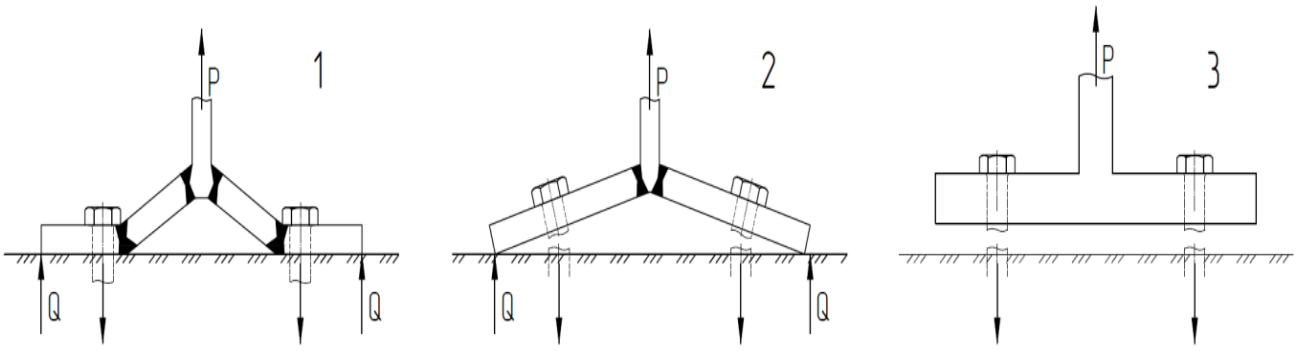


Рисунок 1 – Сценарии разрушения Т-образных фланцев

При использовании относительно тонких фланцев разрушение соединения происходит вследствие развития пластических деформаций во фланце. Несущая способность соединения в этом случае определяется несущей способностью самого фланца, а усилие в болтах не достигают предела несущей способности.

С возрастанием изгибной жесткости фланца, разрушение соединения происходит вследствие разрушения болтов при частичном развитии пластических деформаций во фланце.

При значительной жёсткости фланца разрушение соединения происходит вследствие разрушения болтов, нагруженных внешними силами. Несущая способность такого соединения зависит от несущей способности болтов на растяжение [10].

Необходимо отметить, что развитие пластических деформаций во фланцах и в сечениях соединяемых элементов в околофланцевой зоне вызывает значительное повышение общей деформативности конструкции [11, 12], которая должна быть соответствующим образом учтена дальнейшим нелинейным анализом металлического каркаса в целом.

В рамках комплексного исследования несущей способности узлов фланцевых соединений на кафедре «Строительные конструкции и вычислительная механика» ПНИПУ была проведена серия натурных экспериментов моделей образцов [4]. Испытания проводились на специально спроектированном для этого стенде, позволяющем давать суммарную нагрузку на узел до 200т. Принципиально испытания можно разделить на две серии, с использованием двух типов узлов: с двусторонним примыканием балок к колонне (ФС+) и с односторонним примыканием балки (ФСт).

Кроме того, образцы отличались классом прочности болтов (8.8, 10.9), толщинами фланцев (14мм, 16мм, 20мм, 30мм), схемой нагружения (с центральным сжимающим домкратом, или без него). Дополнительно для моделирования болтов с учетом податливости резьбы, была проведена серия испытаний на разрыв болтов класса прочности 8.8 и 10.9.

Рисунок 2 – Натурные испытания узлов фланцевых соединений

Рисунок 3 – Испытания болтов различных классов прочности

В расчетном программном комплексе ANSYS методом конечных элементов выполнены расчеты фланцевых соединений с учетом развития в них пластических деформаций (рис.4). На основе натурных экспериментов проведена верификация и валидация расчетной модели [5].

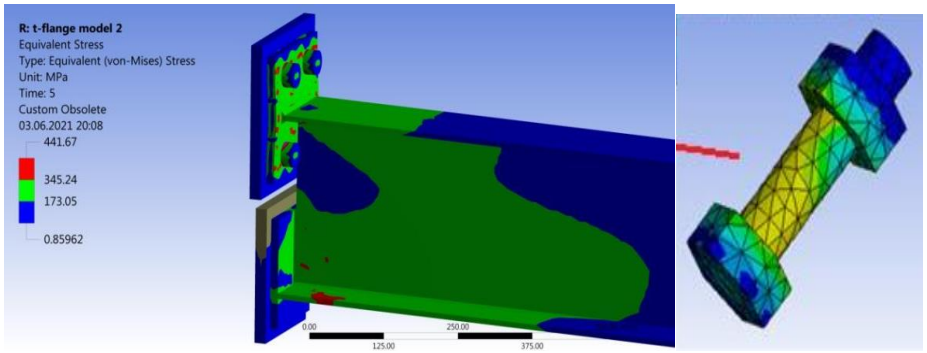


Рисунок 4 – КЭ расчетная модель фланцевого соединения

Результаты исследования и их анализ

Для разработки методики инженерного (аналитического) расчета фланцевого соединения были подготовлены расчетные модели Т-образного фланца (рис.5). Переменными параметрами в данном расчете выступают: толщина фланца t и расстояние до болта e. В расчете применена билинейная диаграмма Прандтля, предел текучести 345 МПа без упрочнения материала [13,14]. В модели использованы болты М24 с предварительным натяжением 244 кН (рис.6).

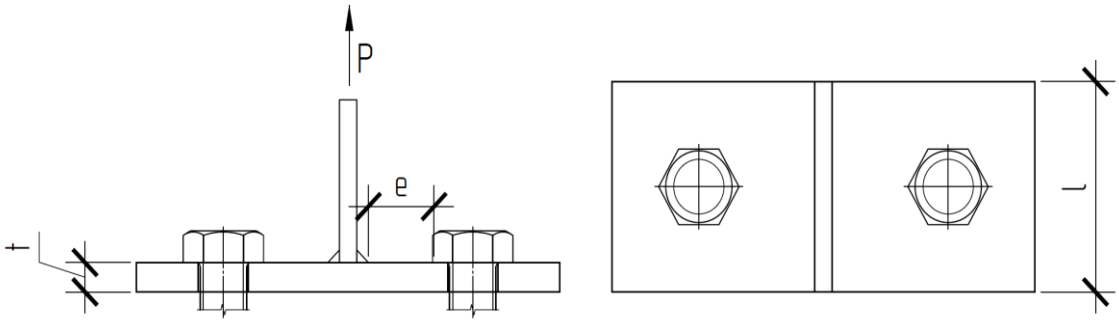


Рисунок 5 – Расчетная схема Т-образных фланцев

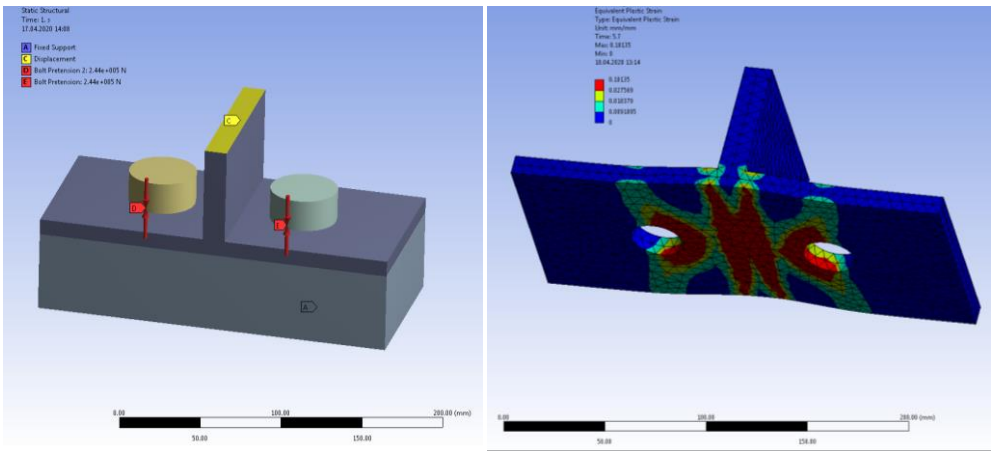


Рисунок 6 – Геометрия расчетной модели, Распределение пластических деформаций Т-образного фланца

Т-фланец можно рассмотреть, как две жестко защемленные балки, пролетом e (рис.5). Переход в пластическое состояние Т-фланца происходит возле болтов и катетов при силе (P). Силу (P) предлагается определять по формуле (1), которая получена на основании статического расчета.

$$P = \frac{l \cdot R_y \cdot t^2}{e} \quad (1)$$

Здесь: R_y- предел текучести стали, l- ширина фланца, e- расстояние от грани болта до катета сварного шва, t- толщина фланца.

Формула (1) имеет ограничение использования, выраженное в, зависящее от соотношения толщин и размеров. Выбор оптимального соотношения толщины фланца к расстоянию между болтом и сварным швом *t/e* определялось на основании численной модели, для чего были построены графики зависимости усилия *P*, приложенного к Т-фланцу, от перемещения точки приложения (рис.7) для фланцев различного размера и толщины. Сила образования пластического течения фланца в численном эксперименте определялась на пересечении двух касательных при приведении графика к билинейному. Полученные соотношения экспериментальных данных и численного расчета ($P_{экс}/P$) приведены в таблице

1. Оптимальное соотношение *t/e*, при котором формула (1) показывает хорошую сходимость, составляет 0,3-0,35.

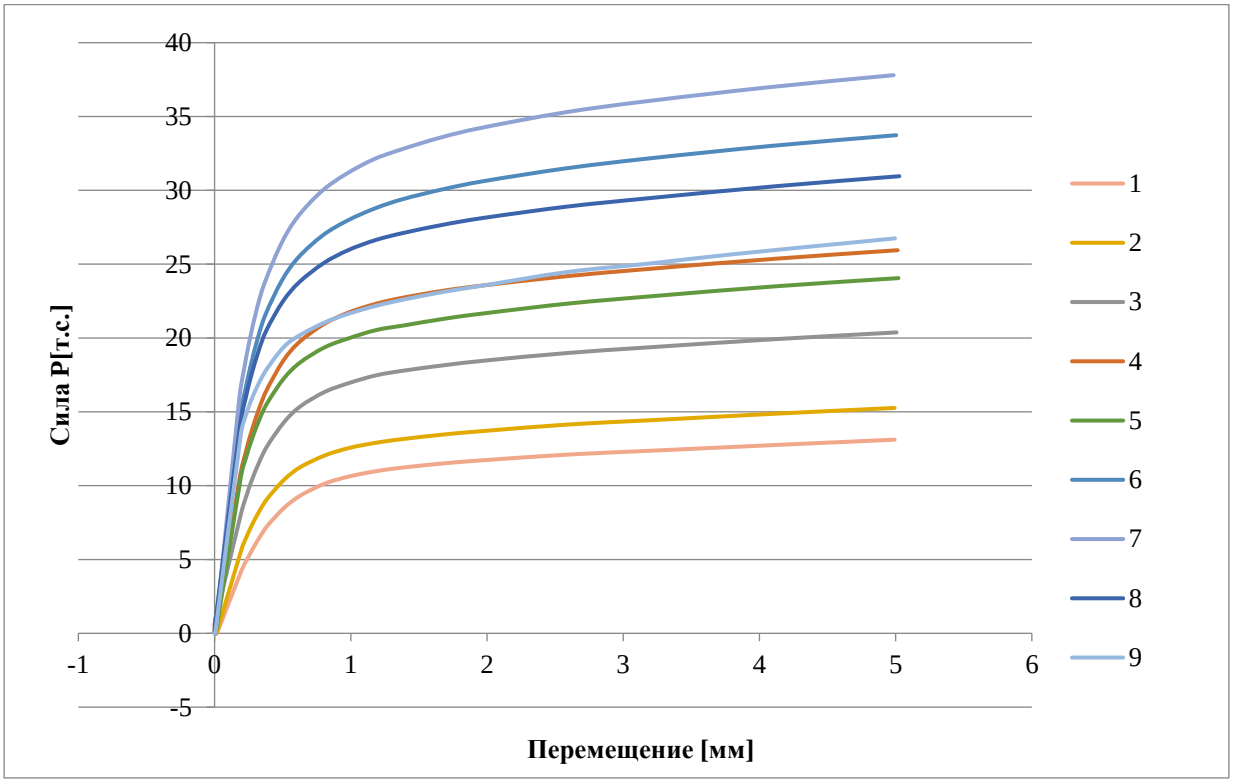


Рисунок 7 – Графики зависимости перемещений от силы, приложенной к фланцу. 1-9 номер численного эксперимента соответствует таблице

Таблица 1– Соотношения аналитического расчета и численного эксперимента

№ фланца	1	2	3	4	5	6	7	8	9
t/e	0.29	0.34	0.41	0.48	0.52	0.59	0.60	0.64	0.87
$P_{экс}/P$ [%]	101.5	100.87	93.40	85.77	87.96	82.54	85.88	81.34	90.00

Рассмотрим ригель сечения двутавр, прикрепленный упругоподатливыми узлами к колоннам и нагруженный равномерно распределенной нагрузкой. Оптимальная жесткость данного узла та, при которой металлоемкость ригеля будет наименьшей. То есть эпюра моментов будет иметь одинаковые по модулю значения изгибающих моментов в пролете и на опорах балки. А именно:

$$\mathrm{M}_c = |\mathrm{M}_{sup}| = \frac{q \cdot l^2}{16}, \qquad (2)$$

где M_c- момент в пролете балки, M_{sup}- момент на опорах балки.

Жесткость опоры, позволяющая получить данное распределение изгибающих

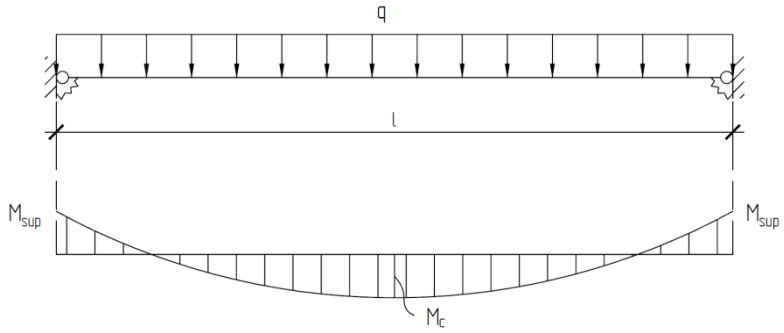


Рисунок 8 – Расчетная схема балки

моментов в балке (рис.8), может быть вычислена на основании статического расчета балки по формуле:

$$c = \frac{6 \cdot E \cdot I_x}{l}, \quad (3)$$

Здесь *c*-жесткость опоры, *E*-модуль упругости, I_x- момент инерции, *l*-пролет балки. Обозначив *i* как погонную жесткость балки равную $\frac{E \cdot I_x}{l}$, формула (3) примет вид:

$$c = 6 \cdot i \quad (4)$$

Узел должен обладать достаточной начальной жесткостью $c \geq 6 \cdot i$, иначе проектное значение момента в узле не будет достигнуто.

Реализовать податливый узел с постоянной жесткостью (линейным графиком деформирования под нагрузкой) весьма сложно. Возникает множество случайных факторов, способных повлиять на расчетную жесткость. Для строительных конструкций допустимо применение узлов с выраженной площадкой текучести. Применимость данных решений подтверждено множеством исследований и строительной практикой. Усилие $P_{fl.}$, при котором происходит переход в пластику, подбирается конструктивно, в зависимости от момента на опоре M_{sup} . Требуемая податливость узла должна обеспечивать возможность поворота опорного сечения на угол, определяемый по формуле:

$$\theta_{\text{оп}} = \frac{M_{sup}}{6 \cdot i} \quad (5)$$

В качестве основного компонента узла используем фланцевое соединение, рассчитанное по методу разбиения на простые Т-образные элементы фланцев (Рис.1). Для податливого узла применим схему отказа №1, так как схемы №2,3 приводят к хрупкому разрушению. Несущей способности болтов должно быть достаточно для реализации отказа по первой схеме предельного состояния.

Вторичные компоненты узла, способные увеличить податливость (такие как деформация стенки колонны, растяжение болтов, изгиб полки колонны), в расчете фигурировать не будут. Конструирование узла следует выполнять таким образом, чтобы вклад вторичных компонентов в общую податливость узла был пренебрежимо мал. Достигается это установкой ребер и накладок в сечение колонны и балки.

Переход в пластическое состояние Т-фланца будем определять по формуле (1). Конструирование Т-образного фланца (толщина и размеры) выполним, используя соотношения толщины фланца к расстоянию между болтами t/e=0,3:0,35.

Требуемая несущая способность Т-фланца определяется исходя из опорного момента балки и должна быть ограничена несущей способностью элемента, к которому он закрепляется, в случае двутавровой балки это верхняя полка балки (6).

$$P_{fl} = \frac{M_{sup.}}{h_b - t_{s.}} < t_{s.} \cdot b \cdot R_y, \quad (6)$$

где h_b- высота балки, $t_{s.}$- толщина полки балки, b- ширина полки балки, R_y- предел текучести стали. Габариты Т-фланца, толщину фланца, расстояние между болтами.

Предлагаемый податливый узел крепления балки представляет собой фланцевую пластину, закрепленную на болтах, и опорный столик, воспринимающий сжимающее усилие и поперечную нагрузку. Верхний (растянутый) фланец приваривается к балке исключительно в зоне полки. Поперечное усилие передается через опорный столик. Податливость узла реализуется в растянутой зоне балки, при образования пластических деформаций в Т-фланце. Сжатая зона балки передает усилие через контактное взаимодействие между нижней пластиной и полкой колонны.

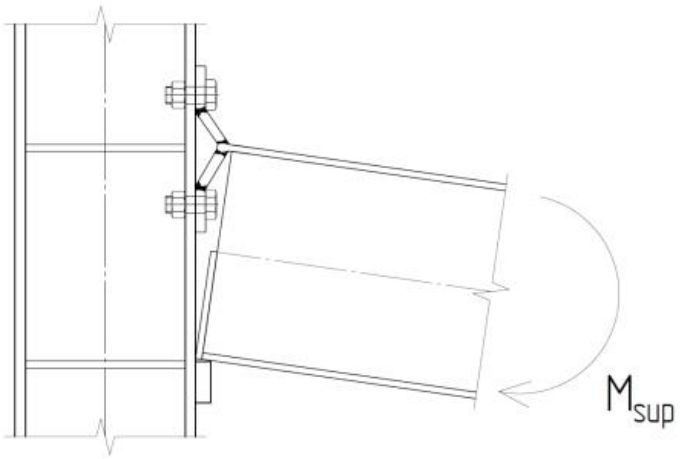


Рисунок 9 – Схема работы фланцевого узла

Несущая способность балки зависит от расчетной схемы (типа применяемых узлов). Максимальная несущая способность достигается для схемы №4 (Рис.10) при равных изгибающих моментах в пролете и на опоре. Несущая способность рассмотренного нами узла ограничивается несущей способностью полки двутавра. Соответственно максимальная несущая способность балки сечения 30Б2, закрепленной по схеме №3 (Рис.10), составит 67кН/м.

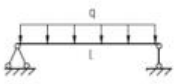
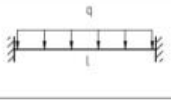
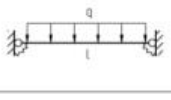
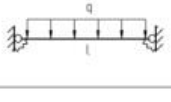
№	Расчетная схема	M_{max}	q[kN/m] I30
1		$ql^2/8$	37 kN/m
2		$ql^2/12$	55 kN/m
3		$ql^2/8-M_{sup}$	67 kN/m
4		$ql^2/16$	73 kN/m

Рисунок 10 – Максимальный изгибающий момент в зависимости от расчетной схемы

Выводы

1. Податливые соединения имеют ряд преимуществ перед жесткими и значительно проще в изготовлении. Реализовать податливость узла возможно при использовании пластической работы фланцевого соединения;
2. Аналитическое описание пластической работы фланцевого соединения дает хорошую корреляцию при соотношении толщины фланца к расстоянию от грани болта до катета сварного шва (t/e) 0,3-0,35;
3. Предложено новое конструктивное решение податливого узла балки с колонной, для которого свойственна простота расчета и монтажа;
4. Рассмотренный узел соединения балок с колоннами позволяет перераспределять изгибающие моменты по длине балки. Максимальная нагрузка на балку, закрепленную в предложенных узлах, в 1,22 больше расчетной несущей способности жесткозакрепленной балки данного сечения и в 1.8 раз выше, чем для шарнирно закрепленной балки, что подтверждено и численными экспериментами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сон М.П., Землянухин А.Д., Математическое моделирование фланцевых соединений в расчетном комплексе Ansys // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. – Т.2. – 2017. – С.73-79.
2. Сон М.П. Фланцевые соединения в строительных конструкциях // Вестник ПНИПУ. –2018. – №1–С. 125–135.
3. Володин М.В., Катюшин В.В., Конин Д.В., Олуромби А.Р., Рычков С.П., Нормирование требований к проектированию и приемке фланцевых соединений на основании экспериментальных данных и расчетов // Строительная механика и расчет сооружений. –2020. –№1(288).-С. 62–73.
4. Beam to column flange connection: from elasticity to destruction (theory and experiment) I. Shardakov, A. Shestakov, M. Son , A. Zemlanuhin , G. Kashevarova, I. Glot // ECF22 - Loading and Environmental Effects on Structural Integrity, p 360
5. Моделирование фланцевого соединения в расчетном комплексе ANSYS / М. П. Сон, А. Д. Землянухин // Строительство и архитектура. Опыт и современные технологии. - 2017. - Вып. 9: по материалам IX Всерос. молодеж. конф. аспирантов, молодых ученых и студентов Современные технологии в строительстве. Теория и практика, (Ч.2, сент., 2017 г.)- 8 с.
6. Sumner E. A., Murray T M. Behaviour and design of multi-row extended end- plate moment connections // Proceedings of International Conference Advances in Structures (ASCCA'03). — Sydney, 2003.
7. Undermann D., Schmidt B. Moment Resistance of Bolted Beam to Column Connections with Four Bolts in each Row // Proceedings of IV European Conference on Steel and Composite Structures "Eurosteel 2005".— Maastricht, 2005.
8. Pisarek Z., Kozlowski A. End-plate steel joint with four bolts in the row // Proceeding of the International Conference "Progress in Steel, Composite and Aluminium Struc- tures"// Gizejowski, Kozlowski, Sleczka & Ziolko (eds.) / Taylor & Francis Group, London, 2006. — pp. 257-826.
9. Sokol Z., Wald F., Delabre V., Muzeau J. P, Svarc M. Design of end plate joints subject to moment and normal force // Eurosteel Coimbra, 2002. — pp. 12191228.
10. Urbonas K., Daniunas A. Behaviour of steel beam-to-beam connections under bending and axial force // Proceedings of 8th International Conference "Modern Building Materials, Structures and Techniques" (Lithuania, Vilnius, May 19-21, 2004).
11. Cerfontaine F., Jaspart J. P. Analytical study of the interaction between bending and axial force in bolted joints // Eurosteel Coimbra, 2002. — pp. 9971006.
12. Jaspart J. P General report: session on connections // Journal of Constructional Steel Research, 2000. — Vol. 55. — pp. 69-89.
13. Надольский В.В., Статистические характеристики погрешности численных моделей несущей способности для стальных элементов // Строительство и реконструкция. –2023. –№3.-С. 17–34.
14. Федорова Н.В., Колчунов В.И., Бушова О.Б., Расчет параметров деформирования железобетонных рам при разрушении ригелей по наклонному сечению // Строительство и реконструкция. –2023. –№2.-С. 90–100.
15. Ведяков И.И., Конин Д.В., Олуромби А.Р., Нахвальнов П.В. Учет пластических деформаций при расчете фланцевых соединений // Строительные конструкции, здания и сооружения. - №10. – 2021. – с. 9-16.

16. Бузало Н.А., Евтушенко С.И., Черныховский Б.А., Невельский О.В., Экспериментальное исследование фланцевых соединений элементов стального каркаса, получивших повреждения // Строительные материалы. - №10. – 2023. – с. 39-44.

17. Туснин А.Р., Платонова В.Д. , Экспериментальные исследования влияния зазоров во фланцевых соединениях на напряженно-деформированное состояние узла. // Вестник МГСУ. - №18. – 2023. – с. 1763-1779.

18. Ведяков И.И., Суслов Л.С., Марисюк А.А., Кашин О.В., Новожилов М. В. Несущая способность стального каркаса многоэтажного модульного здания с учетом жесткости быстросборных соединений // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2023. № 6. С. 8–44.

19. Каленов В. В, Соскин А. Г., Евдокимов В. В. Исследования и расчет усталостной прочности фланцевых соединений растянутых элементов конструкций.// Болтовые и специальные монтажные соединения в стальных строительных конструкциях. Международный коллоквиум. – 1989. – Труды. Т.2 – С. 41-17.

20. Серпик И.Н., Школяренко Р.О. Влияние наклонных ребер жесткости в узлах соединения двутавров на передачу бимоментов. Строительство и реконструкция. 2021;(3):47-58.

21. Перельмутер А. В., Тур В.В. Готовы ли мы перейти к нелинейному анализу при проектировании // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2017. Vol. 13. Issue 3. Pp. 86-102.

REFERENCES

1. Son M.P., Zemlyanuhin A.D., Matematicheskoe modelirovanie flancevyh soedinenij v raschetnom komplekse Ansys. *Sovremennye tekhnologii v stroitel'stve. Teoriya i praktika.* – T.2. – 2017. – pp.73-79. (Rus.)

2. Son M.P. Flancevye soedineniya v stroitel'nyh konstrukciyah. *Vestnik PNIPU.* –2018. –Vol. 1–pp. 125–135. (Rus.)

3. Volodin M.V., Katyushin V.V., Konin D.V., Olurombi A.R., Rychkov S.P., Normirovanie trebovanij k proektirovaniyu i priemke flancevyh soedinenij na osnovanii eksperimental'nyh dannyh i raschetov. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenij*. –2020. –Vol. 1(288).-pp. 62–73.(Rus.)

4. Beam to column flange connection: from elasticity to destruction (theory and experiment) I. Shardakov, A. Shestakov, M. Son , A. Zemlanuhin , G. Kashevarova, I. Glot. ECF22 - Loading and Environmental Effects on Structural Integrity, p 360

5. Son M.P., Zemlyanuhin A.D., Modelirovanie flancevogo soedineniya v raschetnom komplekse ANSYS. *Stroitel'stvo i arhitektura. Opyt i sovremennye tekhnologii.* - 2017. - Vol. 9: po materialam IX Vseros. molodezh. konf. aspirantov, molodyh uchenyh i studentov Sovremennye tekhnologii v stroitel'stve. Teoriya i praktika, (Vol.2, 2017 g.)- p 8.

6. Sumner E. A., Murray T M. Behaviour and design of multi-row extended end- plate moment connections. *Proceedings of International Conference Advances in Structures (ASCCA'03).* — Sydney, 2003.

7. Undermann D., Schmidt B. Moment Resistance of Bolted Beam to Column Connections with Four Bolts in each Row. *Proceedings of IV European Conference on Steel and Composite Structures "Eurosteel 2005"*. — Maastricht, 2005.

8. Pisarek Z., Kozlowski A. End-plate steel joint with four bolts in the row. *Proceeding of the International Conference "Progress in Steel, Composite and Aluminium Struc- tures.* London, 2006. — pp. 257-826.

9. Sokol Z., Wald F., Delabre V., Muzeau J. P, Svarc M. Design of end plate joints subject to moment and normal force. *Eurosteel Coimbra,* 2002. — pp. 12191228.

10. Urbonas K., Daniunas A. Behaviour of steel beam-to-beam connections under bending and axial force. *Proceedings of 8th International Conference "Modern Building Materials, Structures and Techniques"* (Lithuania, Vilnius, May 19-21, 2004).

11. Cerfontaine F., Jaspart J. P. Analytical study of the interaction between bending and axial force in bolted joints. *Eurosteel Coimbra,* 2002. — pp. 9971006.

12. Jaspart J. P General report: session on connections. *Journal of Constructional Steel Research,* 2000. — Vol. 55. — pp. 69-89.

13. Nadolski V.V., Statistical characteristics of the numerical model uncertainties for steel elements. // *Building and Reconstruction.* –2023. –№3.- pp. 17–34.

14. Fedorova N.V., Kolchunov V.I., Bushova O.B., Calculation of parameters of deformation of reinforced concrete frames during the destruction of crossbars along an inclined section. *Building and Reconstruction.* –2023. –№2.- pp. 90–100.

15. Vedyakov I.I., Konin D.V., Olurombi A.R., Nahval'nov P.V. Uchet plasticheskih deformacij pri raschete flancevyh soedinenij. *Industrial and Civil Engineering.* 2021. No. 10. Pp. 9-16. (rus)

16. Buzalo N.A., Yevtushenko S.I., Chernyavsky B.A., Nevelsky O.V., Experimental study of flange connections of damaged steel frame elements. *Building materials.* - No. 10. – 2023. – pp. 39-44.

17. Tusnin A.R., Platonova V.D. Influence of gaps in flange joints on the stress-strain state of the unit. Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(11):1763-1779. -0935.2023.11.1763-1779.

18. Vedyakov I.I., Suslov L.S., Marisiuk A.A., Kashin O.V., Novozhilov M.V. Bearing capacity of a steel frame of a multi-storey modular building with consideration of the rigidity of quick-assembled connections. Earthquake engeenering. *Constructions safety.* 2023, no. 6, pp. 8–44

19. Kalenov V. V., Soskin A. G., Evdokimov V. V. Research and calculation of fatigue strength of flange joints of stretched structural elements. *Bolted and special mounting joints in steel building structures. International Colloquium*. – 1989. – Proceedings. vol.2 – pp. 41-17.

20. Serpik I.N., Shkolyarenko R.O. Influence of inclined stiffeners in i-beam connections on bimoment transferring. Building and Reconstruction. 2021;(3):47-58. (In Russ.)

21. Perel'muter A.V., Tur V.V. Gotovy li my perejti k nelinejnomu analizu pri proektirovanii. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2017. Vol. 13. Issue 3. Pp. 86-102. (rus)

Информация об авторах:

Землянухин Александр Дмитриевич
ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь, Россия
аспирант.
E-mail: a_zemlyanukhin@bk.ru

Кашеварова Галина Геннадьевна
ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь, Россия
доктор технических наук, профессор, зав кафедрой строительных конструкций и вычислительной механики.
E-mail: ggkash@mail.ru

Сон Марк Петрович
ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь, Россия
кандидат технических наук, доцент кафедры строительных конструкций и вычислительной механики.
E-mail: mark-son.mail.ru

Information about authors:

Aleksandr Zemlyanukhin D.
Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia,
PHD student.
E-mail: a_zemlyanukhin@bk.ru

Galina Kashevarova G.
Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia,
doctor of Technical Science, Professor, Head of the Department of *Building Structures and Computational Mechanics*
E-mail: ggkash@mail.ru

Mark Son P.
Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia,
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of *Building Structures and Computational Mechanics*
E-mail: mark-son.mail.ru