

## Проектирование рациональных узловых соединений элементов стальных каркасов с учетом международного опыта

*Чжоу Шэнбо*

*Донской государственный технический университет*

**Аннотация:** В статье рассматриваются вопросы проектирования рациональных узловых соединений элементов стальных каркасов с учетом международного опыта. Выполнен сравнительный анализ расчетных подходов к проектированию узловых соединений по нормативным документам России, Европы и Китая, включая отечественные рекомендации, Eurocode 3 (EN 1993-1-8) и стандарт GB 50017-2017. Особое внимание уделено фланцевым соединениям балок и колонн, широко применяемым в каркасах высотных зданий. Для оценки реальной работы узлов выполнено численное моделирование напряженно-деформированного состояния с использованием программного комплекса SolidWorks. Полученные результаты позволили выявить различия в уровне расчетной жесткости и несущей способности соединений, а также определить степень консервативности рассматриваемых нормативных подходов. На основе сопоставления аналитических и численных данных сформулированы практические рекомендации по рациональному проектированию узловых соединений и совершенствованию отечественной нормативной базы с учетом международного опыта.

**Ключевые слова:** стальные каркасы, узловые соединения, фланцевые соединения, нормативные документы, сравнительный анализ, численное моделирование, SolidWorks, жесткость, несущая способность.

### Введение

В современных условиях развития строительной отрасли стальные каркасные системы широко применяются при возведении промышленных, гражданских и высотных зданий. Высокая несущая способность стали, технологичность изготовления и монтажа, а также возможность реализации сложных пространственных схем делают стальные каркасы эффективным конструктивным решением. Вместе с тем надежность и эксплуатационная пригодность таких систем в значительной степени определяются качеством проектирования узловых соединений, через которые осуществляется передача усилий между элементами каркаса.

Узловые соединения являются наиболее ответственными и напряженными зонами стальных конструкций. Именно в узлах концентрируются изгибающие моменты, продольные и поперечные силы, а также проявляются локальные эффекты, связанные с перераспределением напряжений и развитием пласти-

ческих деформаций. Неправильный выбор расчетной модели или конструктивного решения узла может привести к снижению общей жесткости каркаса, появлению недопустимых деформаций и преждевременному повреждению конструкции.

В мировой практике проектирования стальных конструкций используются различные нормативные подходы к расчету узловых соединений. Европейские нормы Eurocode 3 (EN 1993-1-8) базируются на компонентном методе и допускают учет упруго-пластической работы соединений. Китайский стандарт GB 50017-2017 использует метод предельных состояний с явным учетом пластических деформаций и классификацией узлов по жесткости. В отечественной практике до настоящего времени широко применяются рекомендации [1], основанные на упругих расчетных моделях и допускаемых напряжениях, что обеспечивает высокий уровень надежности, но часто приводит к консервативным и материалоемким решениям.

В условиях реализации международных строительных проектов и активного внедрения зарубежных нормативов возникает необходимость сопоставления различных расчетных подходов и оценки их влияния на работу узловых соединений. Особый интерес в этом контексте представляют фланцевые соединения балок и колонн, которые широко используются в каркасах высотных зданий и оказывают существенное влияние на пространственную жесткость рамных систем.

Целью настоящей работы является проектирование рациональных узловых соединений элементов стальных каркасов с учетом международного опыта на основе сравнительного анализа российских, европейских и китайских нормативных документов. Для достижения поставленной цели в статье выполнены расчет и анализ фланцевых соединений по различным нормативным методикам, а также проведено численное моделирование их напряженно-деформированного состояния с использованием программного комплекса SolidWorks.

---

Полученные результаты позволяют оценить адекватность применяемых расчетных моделей и сформулировать практические рекомендации по рациональному проектированию узловых соединений в современной инженерной практике.

Аналогичные вопросы расчета и конструирования узловых соединений стальных конструкций рассматривались также в ряде публикаций журнала «Инженерный вестник Дона» [2–4].

### **Нормативные подходы к расчету узловых соединений**

Проектирование узловых соединений стальных каркасов в различных странах базируется на отличающихся расчетных философиях, отражающих эволюцию инженерных представлений о работе соединений и требованиях к их надежности. В настоящей работе рассмотрены три нормативные системы, наиболее часто применяемые в международной практике: европейская (EN 1993-1-8), китайская (GB 50017-2017) и отечественная, представленная рекомендациями по расчету стальных соединений.

Европейский стандарт EN 1993-1-8 основан на компонентном методе [5], согласно которому узловое соединение рассматривается как совокупность отдельных компонентов — болтов, фланцев, стенок элементов и сварных швов. Каждый компонент характеризуется собственной жесткостью и предельной несущей способностью, а общая работа узла описывается диаграммой «момент–поворот» [6]. Такой подход позволяет учитывать упруго-пластическое поведение соединений и выполнять их классификацию по жесткости на жесткие, полужесткие и шарнирные [7], что существенно влияет на расчет рамных систем и распределение усилий в элементах каркаса.

Китайский стандарт GB 50017-2017 также использует метод предельных состояний и систему частичных коэффициентов надежности, однако отличается более выраженным учетом пластических деформаций элементов соединений. В нормативе предусмотрена классификация узлов по жесткости, аналог

---

ичная европейской, при этом расчетные формулы адаптированы к механическим свойствам сталей, наиболее распространенных в строительной практике КНР. В ряде случаев допускается более консервативная оценка несущей способности, что обеспечивает повышенный запас прочности при сохранении приемлемой экономичности конструктивных решений.

Отечественные рекомендации по расчету узловых соединений традиционно базируются на упругих расчетных моделях и методе допускаемых напряжений. В рамках данного подхода распределение усилий между элементами соединения определяется исходя из линейно-упругих зависимостей, а пластические перераспределения напряжений явно не учитываются. Такой метод отличается простотой и высокой надежностью, однако при проектировании сложных рамных систем, особенно высотных зданий, может приводить к завышению расчетных усилий и увеличению расхода металла.

Сопоставление рассматриваемых нормативных систем показывает, что ключевые различия между ними заключаются в уровне учета нелинейной работы соединений, методах определения жесткости узлов и подходах к их классификации. В европейских и китайских нормах жесткость узлов рассматривается как важнейший параметр, влияющий на общую работу каркаса, тогда как в отечественной практике соединения, как правило, принимаются полностью жесткими без дополнительной проверки их деформативных характеристик.

Таким образом, анализ нормативных подходов свидетельствует о необходимости комплексной оценки работы узловых соединений с учетом их реальной жесткости и несущей способности [8]. Использование элементов международного опыта при проектировании узловых соединений стальных каркасов позволяет повысить точность расчетов и обосновать более рациональные конструктивные решения, особенно при реализации проектов с повышенными требованиями к экономичности и надежности.

### **Методика расчета и принятые расчетные модели**

---

В качестве объекта исследования в настоящей работе приняты фланцевые соединения балок и колонн, широко применяемые в стальных каркасах высотных зданий. Данный тип узловых соединений обеспечивает передачу значительных изгибающих моментов и продольных усилий, а также оказывает существенное влияние на пространственную жесткость рамной системы. Методика расчета основана на сопоставлении нормативных моделей, принятых в европейских, китайских и отечественных расчетных документах, с последующей верификацией результатов методом численного моделирования.

При расчете узловых соединений рассматривается совместное действие изгибающего момента  $M$ , продольной силы  $N$  и поперечной силы  $V$ . Расчетная схема узла предполагает передачу усилий от балки к колонне через фланцы, болтовые соединения и сварные швы. Основными предельными состояниями, проверяемыми при расчете, являются прочность элементов соединения, местная устойчивость пластин и деформативная жесткость узла в целом.

По европейским нормам EN 1993-1-8 расчет фланцевых соединений выполняется на основе компонентного метода. Узловое соединение представляется в виде совокупности отдельных расчетных компонентов, каждый из которых характеризуется собственной жесткостью и расчетной несущей способностью. К основным компонентам относятся болты на растяжение, фланцы балки и колонны на изгиб, элементы стенки колонны, а также сварные швы. Общая жесткость соединения определяется с учетом совместной работы отдельных компонентов, что позволяет учитывать упруго-пластическое поведение узла и использовать диаграмму «момент–поворот» при расчете рамных систем.

В соответствии с китайским стандартом GB 50017-2017 расчет узловых соединений также базируется на методе предельных состояний и системе частичных коэффициентов надежности. Несущая способность фланцевых соединений определяется путем проверки болтов, фланцев и сварных швов по соо

ответствующим предельным состояниям. При этом расчетные процедуры в ряде случаев упрощены по сравнению с европейским подходом, а учет деформативной жесткости соединений, как правило, осуществляется на уровне их классификации, что ориентировано на практическое проектирование и обеспечивает достаточный уровень надежности конструкций.

В отечественной практике проектирования расчет фланцевых соединений традиционно основан на упругих расчетных моделях и использовании допускаемых напряжений. Распределение усилий между элементами соединения принимается линейным, исходя из условий равновесия и совместности деформаций. Деформативные характеристики узлов в явном виде, как правило, не учитываются, а соединения принимаются полностью жесткими. Такой подход отличается простотой и высокой надежностью, однако может приводить к завышению расчетных усилий и увеличению материалоемкости конструктивных решений.

Для обеспечения сопоставимости результатов расчетов по различным нормативным документам в работе приняты единые геометрические параметры соединений, одинаковые классы сталей и болтов, а также сопоставимые сочетания нагрузок. Принятые допущения позволяют сосредоточить внимание на различиях расчетных моделей и нормативных подходов. Полученные аналитические результаты в дальнейшем сопоставляются с данными численного моделирования, что обеспечивает комплексную оценку работы фланцевых соединений и обоснование рациональных проектных решений.

### **Численное моделирование узловых соединений в SolidWorks**

Для оценки реальной работы фланцевых соединений и проверки адекватности принятых расчетных моделей выполнено численное моделирование напряженно-деформированного состояния узловых соединений с использованием программного комплекса SolidWorks Simulation. Применение метода конечных элементов позволяет учитывать

---

пространственную работу элементов соединения, локальные концентрации напряжений и влияние деформативной жесткости узла на его общее поведение.

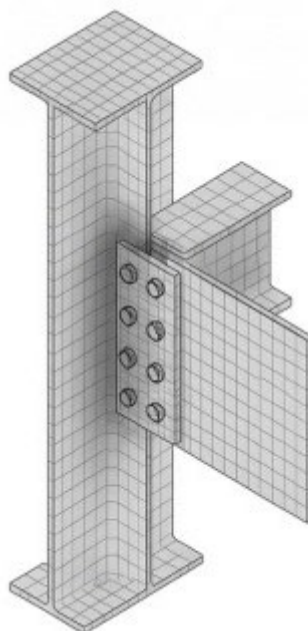


Рис.1. –Расчетная модель фланцевого соединения, принятая для численного анализа

В качестве расчетной модели принят фрагмент рамной системы, включающий участок балки и колонны, соединенных фланцевым узлом. Геометрические параметры соединения, характеристики материалов и классы болтов приняты в соответствии с расчетными предпосылками, использованными при аналитическом расчете по нормативным документам, что обеспечивает сопоставимость аналитических и численных результатов. Расчетная модель фланцевого соединения, принятая для численного анализа, представлена на рис. 1.

Материалы элементов соединения моделировались как изотропные упругие тела с линейной диаграммой деформирования. Болтовые соединения учитывались с использованием контактных условий, обеспечивающих передачу усилий между сопрягаемыми элементами. Контактное взаимодействие между фланцами и примыкающими поверхностями



задавалось с учетом возможных относительных перемещений, что позволило адекватно воспроизвести работу узлового соединения в составе рамной системы.

Граничные условия расчетной модели принимались таким образом, чтобы воспроизвести характер работы узла в реальной рамной конструкции. Закрепление колонны моделировалось как жесткое, а нагрузка прикладывалась к балке в виде эквивалентного изгибающего момента и поперечной силы. Расчет выполнялся в квазистатической постановке.

Конечно-элементная модель формировалась с учетом геометрических особенностей соединения и ожидаемых зон концентрации напряжений. В зонах фланцев и болтов применялось локальное уточнение сетки. Сходимость расчетных результатов по отношению к размеру конечных элементов была проверена на нескольких вариантах сетки, что позволило обеспечить достаточную точность численного анализа.

В результате численного моделирования получены поля напряжений и перемещений элементов фланцевого соединения, а также зависимости между приложенным изгибающим моментом и угловыми поворотами узла. Анализ распределения напряжений показал, что наибольшие значения возникают в зонах контакта фланцев и в болтах, работающих на растяжение, что соответствует физической картине работы соединения, принятой в нормативных расчетных моделях.

Сопоставление численных результатов с аналитическими данными, полученными по различным нормативным документам, позволило оценить степень консервативности расчетных подходов и влияние учета деформативной жесткости узлов на общую работу соединения. Полученные результаты используются в дальнейшем для сравнительного анализа и формулирования рекомендаций по рациональному проектированию узловых соединений элементов стальных каркасов.

---



## Сравнение и обсуждение результатов

Сравнительный анализ результатов расчетов, выполненных по различным нормативным документам, и данных численного моделирования позволяет выявить особенности работы фланцевых узловых соединений и оценить влияние принятых расчетных предпосылок на их несущую способность и жесткость. Основное внимание в настоящем разделе уделено сопоставлению расчетных подходов и интерпретации полученных различий с точки зрения инженерной практики.

Результаты нормативных расчетов показывают, что расчетные модели, принятые в европейском стандарте EN 1993-1-8, как правило, приводят к более гибкой оценке работы узловых соединений за счет учета деформативной жесткости отдельных компонентов. Использование компонентного метода позволяет более точно описывать перераспределение усилий в соединении и учитывать упруго-пластическое поведение элементов, что особенно важно при расчете рамных систем высотных зданий.

Расчеты по стандарту GB 50017-2017 демонстрируют промежуточный характер между европейским и отечественным подходами. С одной стороны, в расчетах применяется метод предельных состояний и система частичных коэффициентов надежности, с другой — учет деформативной жесткости узловых соединений осуществляется в более обобщенной форме. Это приводит к получению расчетных характеристик, которые в ряде случаев оказываются более консервативными по сравнению с результатами по EN 1993-1-8, но менее жесткими, чем при использовании отечественных методик.

Отечественные рекомендации по расчету фланцевых соединений, основанные на упругих моделях и предположении о полной жесткости узлов, как правило, приводят к завышенной оценке жесткости рамной системы. Такой подход обеспечивает высокий запас прочности, однако может приводить к перерасходу материала и не всегда отражает реальную работу узловых соединений,

особенно в конструкциях с большим числом жестких рамных узлов демонстрирующих заметную деформативность.

Результаты численного моделирования подтверждают выявленные при нормативных расчетах различия между рассматриваемыми подходами. Численный анализ показал, что фактическая работа фланцевого соединения носит деформативный характер и не соответствует предположению о его абсолютной жесткости. При этом общие тенденции распределения усилий и характера деформаций узла согласуются с выводами, полученными при расчете по европейским и китайским нормативным документам.

Сопоставление аналитических и численных результатов позволяет сделать вывод о том, что учет деформативной жесткости узловых соединений оказывает существенное влияние на расчет рамных систем и распределение усилий в элементах каркаса. Применение более совершенных расчетных моделей, основанных на международном опыте проектирования, способствует повышению экономичности и рациональности конструктивных решений без снижения уровня надежности.

Таким образом, результаты выполненного анализа подтверждают целесообразность использования нормативных подходов, учитывающих реальную работу узловых соединений, при проектировании стальных каркасов высотных зданий. Полученные выводы могут быть использованы при разработке и оптимизации проектных решений с учетом требований современных международных стандартов. С инженерной точки зрения использование полужестких узловых соединений позволяет обеспечить рациональное соотношение между жесткостью, несущей способностью и материалоемкостью конструктивных решений [9].

### **Заключение**

В настоящей работе выполнено исследование рациональных узловых соединений элементов стальных каркасов с учетом международного опыта проек

---

тирования. На основе сравнительного анализа нормативных документов России, Европы и Китая рассмотрены особенности расчетных подходов к проектированию фланцевых соединений балок и колонн, применяемых в каркасах высотных зданий.

Выполненные расчеты и результаты численного моделирования показали, что учет деформативной жесткости узловых соединений оказывает существенное влияние на оценку напряженно-деформированного состояния и распределение усилий в элементах каркаса. Учет деформативной жесткости узловых соединений оказывает существенное влияние на работу каркасных систем [10]. Подходы, основанные на компонентном методе и методе предельных состояний, позволяют более адекватно описывать реальную работу узловых соединений по сравнению с традиционными упругими расчетными моделями, предполагающими их полную жесткость.

Сопоставление аналитических и численных данных подтверждает, что использование международного опыта проектирования способствует получению более рациональных и экономичных конструктивных решений без снижения уровня надежности. Полученные выводы могут быть использованы при проектировании стальных каркасов высотных зданий и при дальнейшем совершенствовании отечественных методик расчета узловых соединений с учетом современных требований инженерной практики.

### **Литература**

1. Рекомендации по проектированию фланцевых соединений элементов стальных конструкций. М.: ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, 2012. URL: [dwg.ru/dnl/13882](http://dwg.ru/dnl/13882)
2. Скобцов И.Г., Дербин М.О. Оценка надежности сварных соединений стальных магистральных трубопроводов // Инженерный вестник Дона. 2025. № 6. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2025/10121](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2025/10121)

3. Бунов А.А., Зенкин Д.В. Численный анализ соединений элементов стальных конструкций // Инженерный вестник Дона. 2024. № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2024/9153

4. Лапина О.А. Возведение высотных зданий // Инженерный вестник Дона. 2012. № 4 (ч. 2). URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2012/1301

5. Jaspart J.P., Wald F. Design of steel joints by the component method. Journal of Constructional Steel Research. 2001. Vol. 57. No. 6. pp. 723–744.

6. Kishi N., Chen W.F. Moment – rotation relations of semi-rigid connections. Engineering Structures. 1990. Vol. 12. No. 3. pp. 181 – 190.

7. Bjorhovde R., Colson A., Brozzetti J. Classification system for beam-to-column connections. Journal of Structural Engineering. 1990. Vol. 116. No. 11. pp. 3059 – 3076.

8. Nethercot D.A., Gardner L. Design philosophy and behaviour of steel joints. Structural Engineering International. 2008. Vol. 18. No. 1. pp. 28–35.

9. Faella C., Piluso V., Rizzano G. Structural steel semi-rigid connections. Boca Raton: CRC Press, 2000. 384 p.

10. Chen W.F., Lui E.M. Stability design of steel frames. Boca Raton: CRC Press, 1991. 527 p.

### References

1. Rekomendatsii po proektirovaniyu flantsevykh soedineniy elementov stalnykh konstruktsiy [Guidelines for the design of flange connections of steel structures]. Moscow: TSNIISK im. V.A. Kucherenko, 2012. URL: dwg.ru/dnl/13882.

2. Skobtsov I.G., Derbin M.O. Inzhenernyi vestnik Dona, 2025, No. 6. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2025/10121

3. Bunov A.A., Zenkin D.V. Inzhenernyi vestnik Dona, 2024, No. 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2024/9153

4. Lapina O.A. Inzhenernyi vestnik Dona, 2012, No. 4 (Pt. 2). URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2012/1301

---

5. Jaspart J.P., Wald F. Journal of Constructional Steel Research, 2001, Vol. 57, No. 6, pp. 723 – 744.
6. Kishi N., Chen W.F. Engineering Structures, 1990, Vol. 12, No. 3, pp. 181 – 190.
7. Bjorhovde R., Colson A., Brozzetti J. Journal of Structural Engineering, 1990, Vol. 116, No. 11, pp. 3059 – 3076.
8. Nethercot D.A., Gardner L. Structural Engineering International, 2008, Vol. 18, No. 1, pp. 28 – 35.
9. Faella C., Piluso V., Rizzano G. Structural steel semi-rigid connections. Boca Raton: CRC Press, 2000. 384 p.
10. Chen W.F., Lui E.M. Stability design of steel frames. Boca Raton: CRC Press, 1991. 527 p.

**Дата поступления: 19.12.2025**

**Дата публикации: 24.01.2026**