

doi: 10.5862/MCE.49.6

Напряженно-деформированное состояние высокопрочных болтов фланцевых соединений в укрупнительных стыках стропильных ферм

*К.т.н., профессор А. А. Семенов,
Уфимский государственный нефтяной технический университет
генеральный директор А. А. Маляренко,
ООО НПФ «СКАД Софт»
ассистент И. А. Порываев,
ассистент М. Н. Сафиуллин,
Уфимский государственный нефтяной технический университет*

Аннотация. В статье рассмотрены результаты численных исследований болтов фланцевого монтажного стыка фермы из гнутых сварных замкнутых профилей. Обоснован выбор расчетной модели соединения в среде ПК SCAD. Выполнен расчет в геометрически нелинейной постановке. Получен характер изменения напряженно-деформированного состояния болтов на различных этапах нагружения.

Проведено сравнение результатов численных исследований моделей в ПК SCAD с результатами, полученными классическими методами в программе ANSYS. Показан пространственный характер работы соединения. Выполнена оценка влияния изгибающих моментов на напряженно-деформированное состояние болтов. Обоснована необходимость учета изгибающих моментов, а также соотношения жесткостей отдельных элементов монтажного стыка (соединяемые профили, подкрепляющие ребра, фланцы) при определении несущей способности высокопрочных болтов.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и обследовании монтажных фланцевых стыков, работающих на растяжение.

Ключевые слова: болтовое фланцевое соединение; метод конечных элементов; аналитическое исследование; анализ напряжений

Высокопрочные болты являются одним из наиболее ответственных узлов фланцевых соединений и во многом отвечают за их надежность и несущую способность.

Работе болтов во фланцевых соединениях посвящены многие фундаментальные работы [1–4]. В этих трудах обоснованы расчетные положения по определению напряженно-деформированного состояния (НДС) болтов в составе фланцевых соединений.

Основные правила расчета, проектирования, изготовления и эксплуатации фланцевых соединений регламентированы действующими нормативными документами [5–9].

Аналізу работы фланцевых соединений посвящены труды многих исследователей. В работе [10] приведена подробная классификация существующих методик расчета фланцевых соединений, проведен сравнительный их анализ на конкретном численном примере. Обосновывается необходимость применения для практических расчетов методики расчета в упругой стадии работы материалов. Отмечена целесообразность использования различных программных комплексов для снижения трудоемкости расчетов. В работе [11] рассмотрен широкий спектр узловых фланцевых соединений, применяемый при сопряжении элементов каркасов зданий из металлических конструкций, описаны возможные схемы работы фланцев в соответствии с действующими нормами (в том числе с Еврокодом-3). Авторы демонстрируют возможности вычислительного комплекса SCAD Office (сателлита КОМЕТА) при реализации задач расчета и проектирования фланцевых соединений по различным нормам. В работах [12–18] приводятся результаты экспериментальных исследований болтовых фланцевых соединений труб. В работах [19–22] приводится анализ работы многоболтовых соединений. В работе [23] автор приводит примеры конечноэлементных моделей фрагмента фланцевого соединения с гладким и грибовидным фланцем. Задача реализована в нелинейной постановке, произведено сравнение полученных результатов с традиционными инженерными методами. Это далеко не полный список исследований по рассматриваемой проблеме.

Следует отметить, что в указанных выше трудах, нормативных документах и публикациях рассматривается класс задач, характерных для очень широкого круга практических проектных решений сопряжения открытых профилей (двутавров, уголков, листовых элементов и т. п.) между собой посредством фланцев в местах действия изгибающих моментов, продольных и поперечных сил. При этом расчетные предпосылки формируются на плоской балочной модели (рис. 1). Такой подход оправдан в случаях, когда конструкция узла имеет регулярную структуру, симметричную относительно плоскости действия основных силовых факторов.

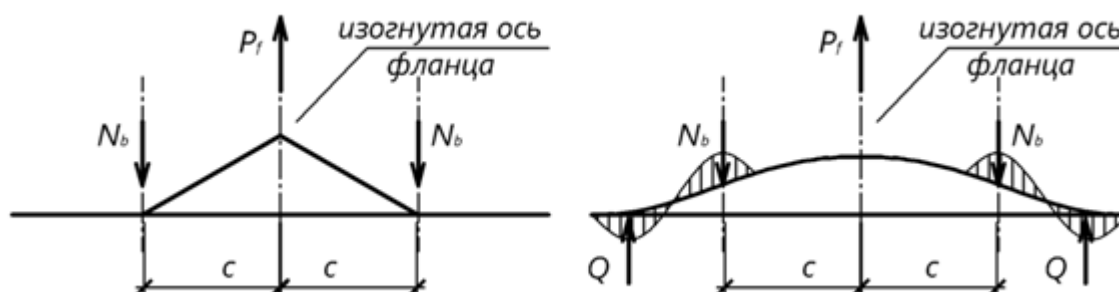


Рисунок 1. Различные расчетные модели фланцевого соединения

Особое место занимают узлы укрупнительной сборки нижних поясов стропильных ферм покрытий производственных зданий, изготовленных из замкнутых гнуто-сварных профилей. Основная номенклатура этих конструкций представлена сериями 1.460.3-23.98 «Стальные конструкции покрытий производственных зданий из замкнутых гнуто-сварных профилей прямоугольного сечения пролетом 18, 24 и 30 м с уклоном кровли 10 %» и 1.460.3-14 «Стальные конструкции покрытий производственных зданий пролетом 18, 24 и 30 м с применением замкнутых гнуто-сварных профилей прямоугольного сечения типа «Молодечно»». Независимо от пролета и класса фермы по допускаемой расчетной нагрузке стык нижнего пояса решается в виде фланцевого соединения на высокопрочных болтах (рис. 2) и является универсальным.

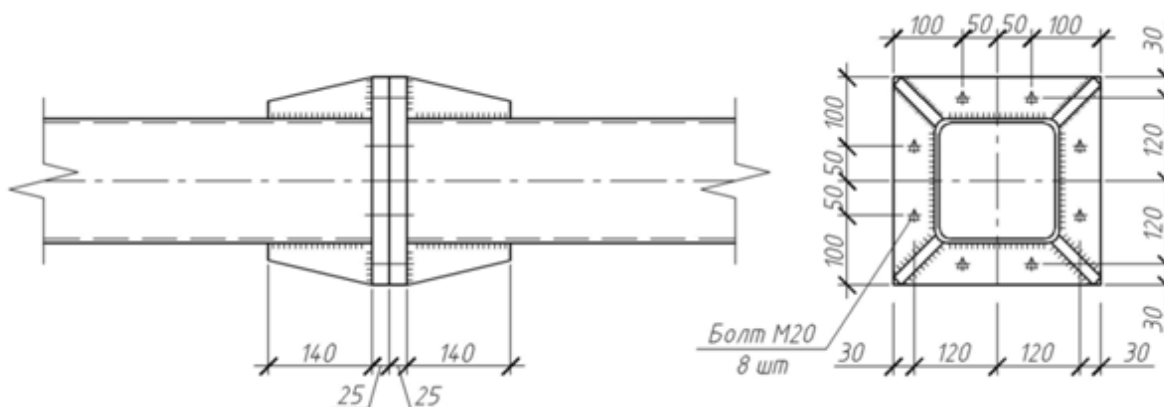


Рисунок 2. Решение типового узла фланцевого соединения нижнего пояса фермы

Данные фланцевые соединения имеют качественные отличия:

- 1) отсутствие изгибающего момента и поперечной силы в соединении;
- 2) равномерное распределение внешней нагрузки между болтами;
- 3) невозможность представления расчетной схемы соединения в виде балочной плоской конструкции и, как следствие, необходимость учета пространственной работы соединения в двух ортогональных плоскостях;
- 4) зависимость НДС фланца и болтов от соотношения жесткостных характеристик соединяемых элементов (сечений пояса и подкрепляющих ребер).

Для анализа НДС болтов в подобных соединениях создана расчетная модель фланцевого соединения в среде ПК SCAD, состоящая из оболочечных элементов, позволяющих реализовывать нелинейные расчеты.

Основные гипотезы, принятые при формировании расчетной схемы фланцевого соединения, работающего по пространственной схеме, следующие.

1. Плоскость контакта фланцев считается недеформируемой плоскостью симметрии и абсолютно жестким основанием, что позволяет рассматривать лишь половину узла.
2. Фланец рассматривается как пластина, расположенная в срединной плоскости, с жесткостью, равной жесткости фланца.
3. Пластина фланца взаимодействует с абсолютно жестким основанием посредством односторонних двухузловых связей, имеющих жесткость, равную жесткости нижней половины толщины фланца. Связи включаются в работу при сжатии и отключаются при растяжении.
4. Болт представляет собой стержневой элемент с жесткостью, равной жесткости болта нетто в зоне расположения резьбы и брутто в остальной зоне. Головка болта с шайбой заменены твердым телом с соответствующими габаритами. Узлы твердого тела головки взаимодействуют с пластиной фланцев через упругие связи, имитирующие верхнюю половину толщины фланца.
5. Предварительное натяжение болта осуществляется либо смещением опорного узла половины болта, либо температурным воздействием на тело стержня болта (численные исследования показали, что разница между способами составляет сотые доли процента).
6. Расчет выполняется в геометрически нелинейной постановке.

Для проверки корректности созданной модели использованы тестовые примеры на тривиальных расчетных схемах, положенных в основу инженерных методик расчета. Один из примеров представляет двухболтовое тавровое соединение, показанное на рисунке 3.

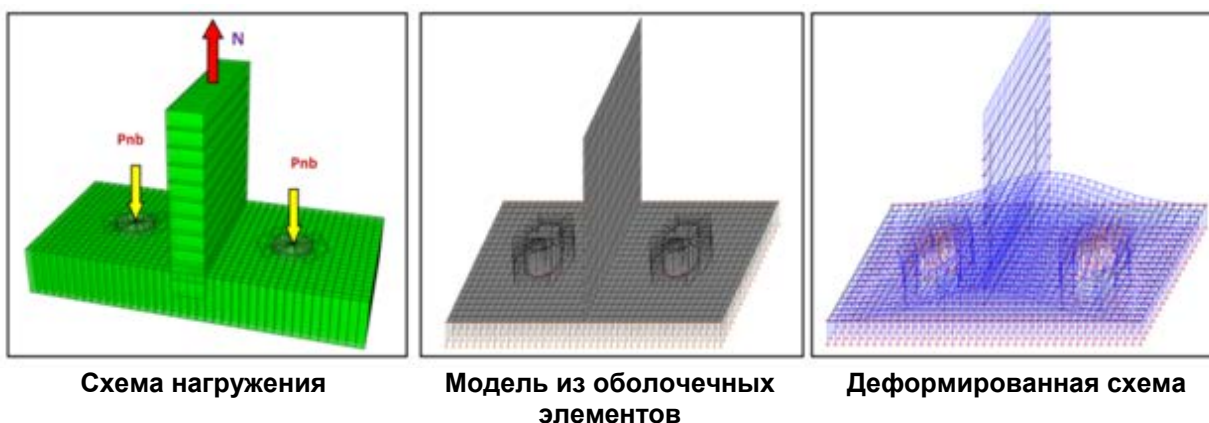


Рисунок 3. Тестовый пример фланцевого соединения

Инженерный расчет. Требуется проверить прочность высокопрочных болтов М24 от действия растягивающего усилия в тавровом соединении $N = 294,3 \text{ кН}$. Толщина фланца $t = 30 \text{ мм}$. Определяем $t/d = 30/24 = 1,25$; по таблице 80 [5] определяем коэффициенты $\alpha = 0,425$, $\beta = 0,278$. Для болтов М24 усилие предварительного натяжения $P_{nb} = 250 \text{ кН}$, что соответствует величине $P_{nb} = 0,94 \cdot 0,7 R_{бур} A_{бн}$. Параметр жесткости фланца определяется по формуле:

$$\chi = \frac{24^2}{100 \left(30 + \frac{24}{2} \right)} \cdot \left(\frac{40}{30} \right)^3 = 0,325$$

$$P_b = (0,425 - 0,278 \cdot \log 0,325) \cdot 250 = 140,18 \text{ кН}.$$

В стыке расположено 2 болта, и условие прочности имеет вид:

$$N_u = n \cdot P_b = 2 \cdot 140,18 = 280,36 \text{ кН} < 294,3 \text{ кН},$$

таким образом, прочность стыка обеспечена.

Расчет модели в среде SCAD. При тех же исходных данных проведен нелинейный расчет модели (рис. 3), результаты которого приведены на рисунках 4 и 5. По результатам получена допустимая внешняя нагрузка на болт, которая оказалась равной $139,8 \text{ кН}$.

Семенов А.А., Маляренко А.А., Порываев И.А., Сафиуллин М.Н. Напряженно-деформированное состояние высокопрочных болтов фланцевых соединений в укрупнительных стыках стропильных ферм

Разница между инженерным расчетом и расчетом в SCAD составляет

$$(140,18 - 139,8) / 140,18 \cdot 100 = 0,3\% .$$

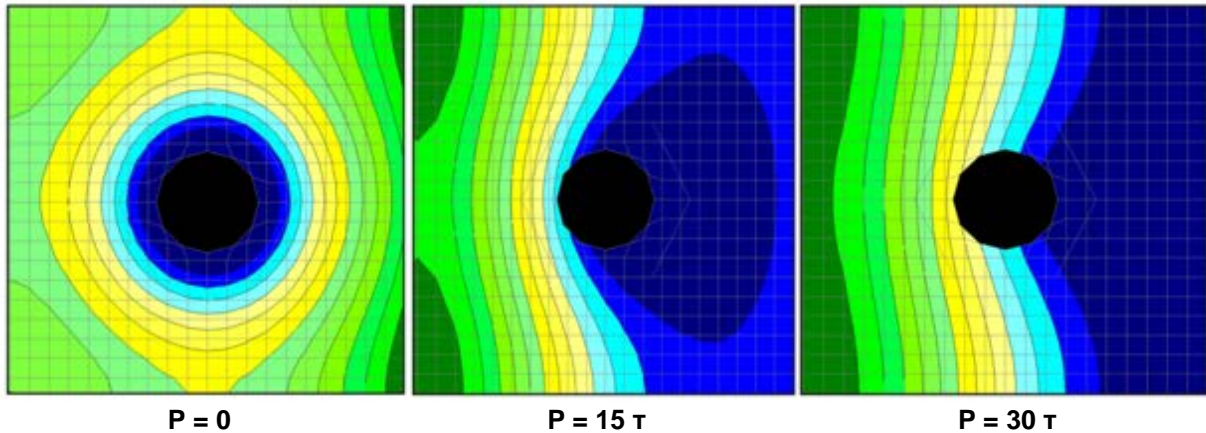


Рисунок 4. Деформации фланца по оси Z на разных шагах нелинейного расчета

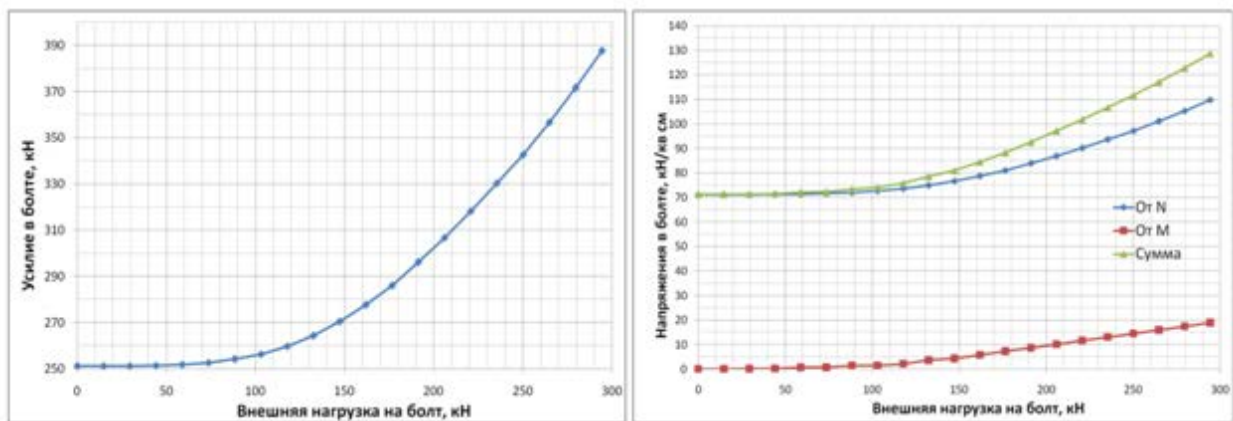


Рисунок 5. Зависимости усилий и напряжений в болте от внешней нагрузки

Следует отметить следующее обстоятельство. В рассматриваемом примере на участке расчетных усилий происходит частичное раскрытие фланцев (рис. 4). При этом в стержне болта возникают, кроме усилий растяжения, изгибные усилия (рис. 6). В работе [1] этот вопрос рассматривается с некоторыми упрощениями, определен уровень напряжений от изгиба болта (в диапазоне 8–17 % от расчетного сопротивления стали болта). На рисунке 5 приведены зависимости напряжений в болте от внешней нагрузки с учетом изгибающих моментов, полученные при расчете модели в SCAD. Полученные результаты показывают, что уровень напряжений от изгиба составляет 7 %, что хорошо согласуется с теоретическими данными. Несмотря на высказывания автора работы [1], что усилия от изгиба в болтах незначительны и ими можно пренебречь, нам кажется, что не учитывать этот фактор нельзя. Если определить предельную нагрузку на один болт, исходя из графиков рисунка 5, то с учетом изгибных напряжений она снизится с 14,25 тс до 12,0 тс, т. е. почти на 19 %.

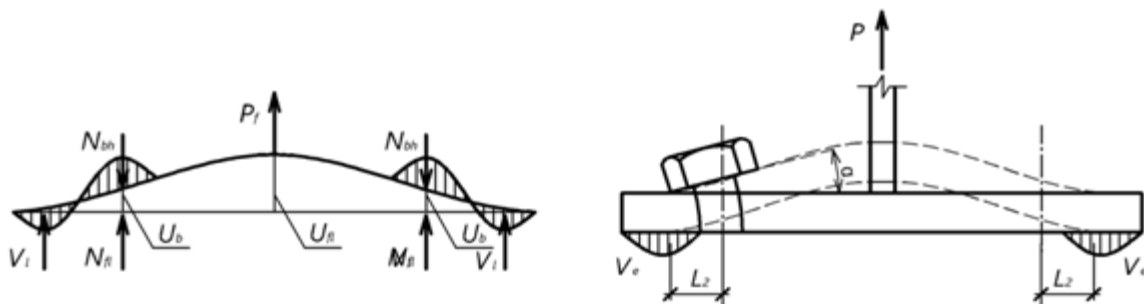


Рисунок 6. Принципиальная схема изгиба болта

Семенов А.А., Маляренко А.А., Порываев И.А., Сафиуллин М.Н. Напряженно-деформированное состояние высокопрочных болтов фланцевых соединений в укрупнительных стыках стропильных ферм

Получив достаточную сходимость тестовых примеров с теоретическими положениями расчета фланцевых соединений, рассмотрим модель узла сопряжения элементов нижнего пояса ферм типа «Молодечно», показанную на рисунке 7.

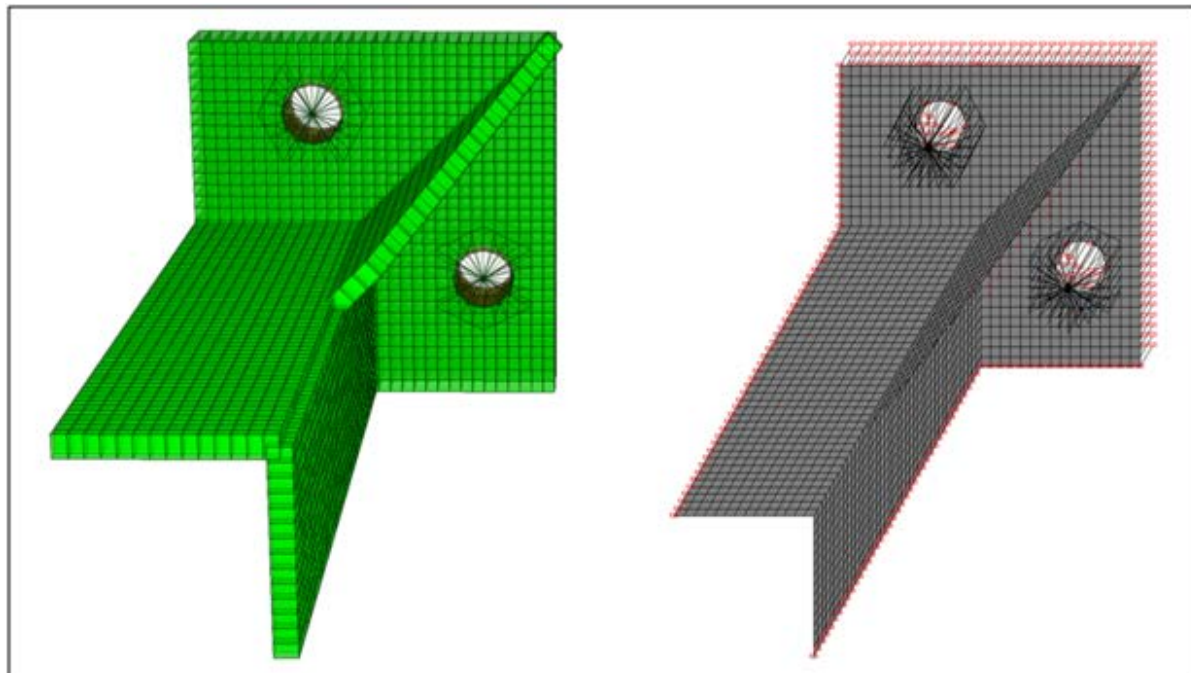


Рисунок 7. КЭ модель фланцевого соединения фермы «Молодечно»

Симметрия узла в двух взаимно перпендикулярных плоскостях позволяет рассматривать лишь четверть соединения при условии правильного оформления граничных условий путем постановки соответствующих связей в узлах модели. Основные гипотезы, принятые при создании расчетной модели, описаны выше. Пояс фермы, распределительные ребра и фланец моделировались оболочечными конечными элементами (44 тип), стержень болта моделировался стержневым конечным элементом (5 тип). Для моделирования граничных условий и условий сопряжения элементов между собой использованы абсолютно жесткие тела, односторонние связи, а также прием «объединение перемещений», реализованный в ПК SCAD. Задача решалась в геометрически нелинейной постановке.

Предварительно произведен расчет узла по традиционной методике.

Инженерный расчет. Требуется проверить прочность высокопрочных болтов М24 от действия растягивающего усилия в нижнем поясе $N = 824 \text{ кН}$. Толщина фланца $t = 30 \text{ мм}$. Для болтов М24 усилие предварительного натяжения $P_{nb} = 250 \text{ кН}$, что соответствует величине $P_{nb} = 0,94 \cdot 0,7 R_{bun} A_{bn}$. Определяем $t/d = 30/24 = 1,25$, по таблице 80 [5] $\alpha = 0,425$, $\beta = 0,278$. Параметр жесткости фланца определен по формуле:

$$\chi = \frac{24^2}{105 \left(30 + \frac{24}{2} \right)} \cdot \left(\frac{40}{30} \right)^3 = 0,310$$

$$P_b = (0,425 - 0,278 \cdot \log 0,310) \cdot 250 = 141,7 \text{ кН} .$$

В стыке расположено 8 болтов, и условие прочности имеет вид:

$$N_u = n \cdot P_b = 8 \cdot 141,7 = 1133,6 \text{ кН} > 824 \text{ кН} .$$

Прочность стыка обеспечена. Коэффициент использования по критерию прочности болтов $K_{исп} = 0,727$.

Расчет модели в среде SCAD. При тех же исходных данных проведен нелинейный расчет модели (рис. 7), результаты которого приведены на рисунке 8. По результатам получена допустимая внешняя нагрузка на болт, которая оказалась равной $134,9 \text{ кН}$.

Семенов А.А., Маляренко А.А., Порываев И.А., Сафиуллин М.Н. Напряженно-деформированное состояние высокопрочных болтов фланцевых соединений в укрупнительных стыках стропильных ферм

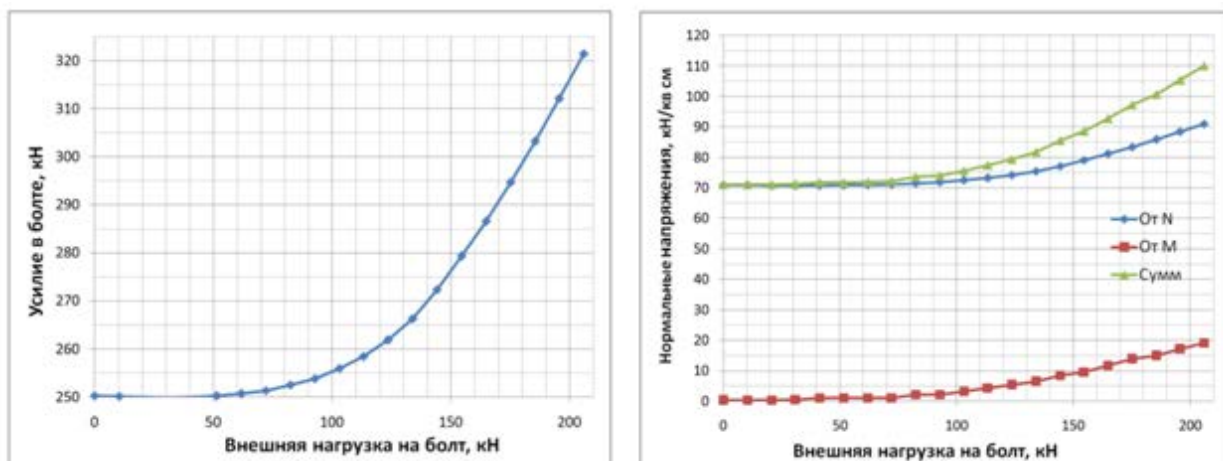


Рисунок 8. Зависимости усилий и напряжений в болте от внешней нагрузки

Разница между инженерным расчетом и расчетом в SCAD равна

$$(141,7 - 134,9) / 141,7 \cdot 100 = 4,8\% .$$

Коэффициент использования соединения по критерию прочности болтов $K_{исп.} = 103 \text{ кН} / 134,9 \text{ кН} = 0,76$.

Деформированные схемы соединения (рис. 9) наглядно демонстрируют пространственный характер работы элементов соединения.

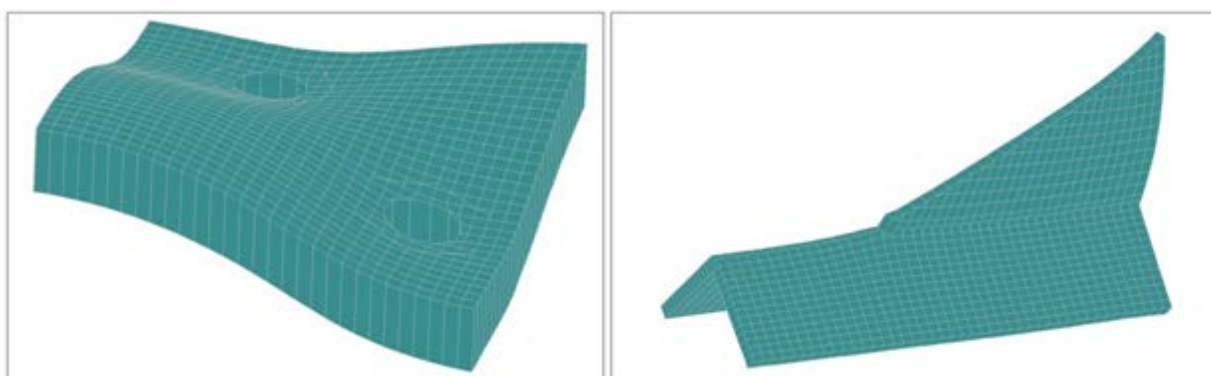


Рисунок 9. Деформированные схемы фланца и пояса фермы

Анализ НДС стержня болта показал, что изгиб происходит в двух плоскостях, и итоговые изгибные напряжения определялись от приведенного значения момента $M_{np} = \sqrt{M_x^2 + M_z^2}$ (рис. 8). По полученным зависимостям определена допустимая внешняя нагрузка на болт, которая оказалась равной 100 кН. Коэффициент использования соединения по критерию прочности болтов $K_{исп} = 103 \text{ кН} / 100 \text{ кН} = 1,03$.

Как показывают расчеты, учет пространственной работы фланца и дополнительных нормальных напряжений в болте от изгиба существенно влияет на величины допускаемых внешних нагрузок на болт.

Кроме этого, влияние на усилия в болтах оказывают и параметры присоединяемых к фланцу элементов пояса. На рисунке 10 показаны графики результатов нелинейного расчета узлов ферм типа «Молодечно» с ребрами толщиной 8 и 16 мм. При прочих равных условиях очевидна разница в распределении усилий в элементах соединения: $K_{исп8} = 0,76$, $K_{исп16} = 0,72$.

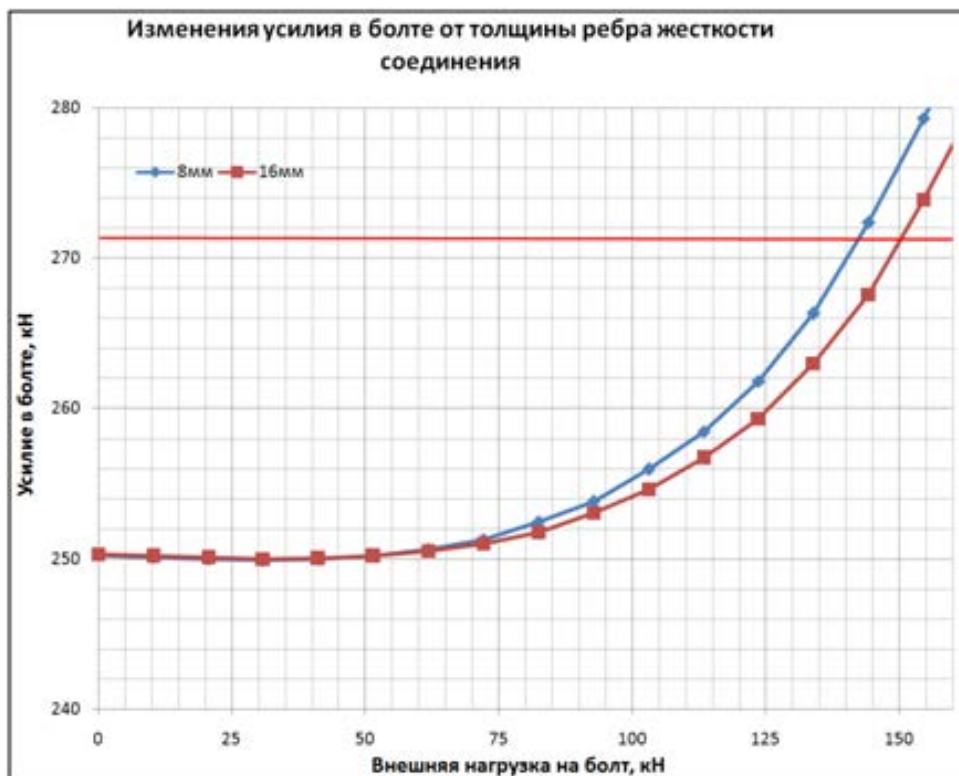


Рисунок 10. Зависимости усилий в болтах от внешней нагрузки и толщины ребра

В заключение приведем некоторые результаты расчетов узла в программе ANSYS (рис. 11), которые показали хорошую сходимость для рассматриваемых соединений с результатами расчета моделей в среде SCAD.

а

б

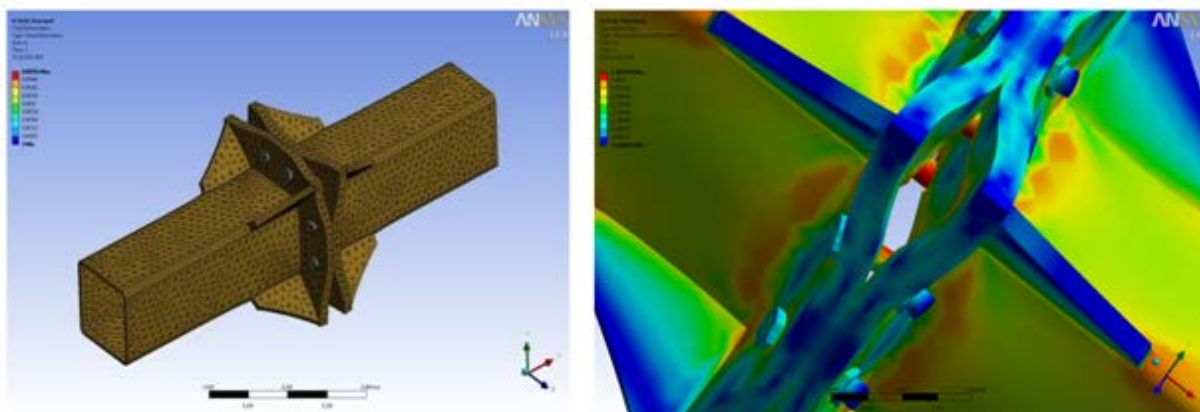


Рисунок 11. Результаты расчета фланцевого узла в программе ANSYS: а) деформированная схема; б) распределение напряжений (изгиб болтов)

Основные выводы

1. Результаты расчета предлагаемой расчетной модели фланцевого соединения имеют достаточную сходимость с инженерными методами расчета и результатами, полученными в других программных комплексах (в частности, ANSYS).

2. При геометрически нелинейном расчете предложенных моделей фланцевых соединений предоставляется возможность отслеживания пошагового изменения НДС болтов, характеризующегося нелинейными зависимостями, где термин «стадия отрыва фланцев» носит условный смысл.

3. При определении несущей способности соединения по критерию прочности болтов следует учитывать дополнительные напряжения, возникающие от изгиба при частичном раскрытии фланцев.

4. Использование приемов работы с расчетными схемами в среде SCAD (создание подсхем, режим сборки, масштабирование схем и подсхем, автоматическая замена жесткостей элементов и упругих связей, корректировка нагрузжений и т. п.) позволяет с минимальными затратами формировать расчетные модели фланцевых соединений практически любой конфигурации с различными нагрузками.

5. Предоставляется возможность анализировать работу высокопрочных болтов в зависимости от их диаметра, толщины фланца, параметров соединяемых элементов, величины усилий предварительного натяжения и внешних нагрузок.

6. Небезынтересным является проведение комплекса мероприятий по изменению существующих конструктивных решений с целью усиления узлов или управления НДС соединения в целом.

Литература

1. Катюшин В.В. Здания с каркасами из стальных рам переменного сечения. М.: Стройиздат, 2005. 450 с.
2. Корнеев М.А. Стальные мосты. Теоретическое и практическое пособие по проектированию. Киев, 2003. 547 с.
3. Биргер И.А., Иоселевич Г.Б. Резьбовые и фланцевые соединения. М.: Машиностроение, 1990. 366 с.
4. Проектирование металлических конструкций. Специальный курс / Учебное пособие для вузов / Бирюлев В. В. [и др.]. Л.: Стройиздат, 1990. 432 с.
5. Пособие по проектированию стальных конструкций (к СНиП 2-23-81*) / ЦНИИСК им. Кучеренко Госстроя СССР. М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989. 148 с.
6. Рекомендации по расчету, проектированию, изготовлению и монтажу фланцевых соединений стальных строительных конструкций / ВНИПИ Промстальконструкция, ЦНИИПСК им. Мельникова. М.: 1988. 83 с.
7. Рекомендации по проектированию работающих на сдвиг болтовых соединений стальных строительных конструкций. М.: ЦНИИПСК им. Мельникова, 1990. 18 с.
8. Рекомендации по надзору и технической эксплуатации монтажных соединений на высокопрочных болтах стальных строительных конструкций зданий и сооружений Министерства металлургии СССР. М.: ЦНИИПСК им. Мельникова, 1989. 34 с.
9. Руководство по проектированию, изготовлению и сборке монтажных фланцевых соединений стропильных ферм с поясами из широкополочных двутавров. М.: ЦНИИПСК им. Мельникова, 1981. 62 с.
10. Алпатов В.Ю., Соловьев А.В., Холопов И.С. К вопросу расчета фланцевых соединений на прочность при знакопеременной эпюре напряжений // Промышленное и гражданское строительство. 2009. №2. С. 26–30.
11. Перельмутер А.В., Криксунов Э.З., Юрченко В.В. Расчетные модели фланцевых соединений рамных узлов металлических конструкций и их программная реализация в "SCAD Office" // CADMaster. 2010. №3. С. 110–115.
12. Abid M., Nash D. Comparative study of the behaviour of conventional gasketed and compact non-gasketed flanged pipe joints under bolt up and operating conditions // International Journal of Pressure Vessels and Piping. 2003. Vol. 80. Issue 12. Pp. 831–841.
13. Joshi D., Mahadevan P., Marathe A., Chatterjee A. Unimportance of geometric nonlinearity in analysis of flanged joints with metal-to-metal contact // International Journal of Pressure Vessels and Piping. 2007. Vol. 84. Issue 7. Pp. 405–411.
14. Krishna M.M., Shunmugam M.S., Prasad N.S. A study on the sealing performance of bolted flange joints with gaskets using finite element analysis // International Journal of Pressure Vessels and Piping. 2007. Vol. 84. Issue 6. Pp. 349–357.

15. Nechache A., Bouzid A.-H. On the use of plate theory to evaluate the load relaxation in bolted flanged joints subjected to creep // International Journal of Pressure Vessels and Piping. 2008. Vol. 85. Issue 7. Pp. 486–497.
16. Zerres H., Guerout Y., Present calculation methods dedicated to bolted flanged connections // International Journal of Pressure Vessels and Piping. 2004. Vol. 81. Issue 2. Pp. 211–216.
17. Bouzid A.-H., Nechache A. The modelling of bolted flange joints used with disc springs and tube spacers to reduce relaxation // International Journal of Pressure Vessels and Piping. 2010. Vol. 87. Issue 12. Pp. 730–736.
18. Nash D.H., Abid M. Combined external load tests for standard and compact flanges, International Journal of Pressure Vessels and Piping. 2000. Vol. 77. Issue 13. Pp. 799–806.
19. Nasrabadi M.M., Torabian S., Mirghaderi S.R. Panel zone modelling of Flanged Cruciform Columns: An analytical and numerical approach // Engineering Structures. 2013. Vol. 49. Pp. 491–507.
20. Salih E. L., Gardner L., Nethercot D.A. Numerical investigation of net section failure in stainless steel bolted connections // Journal of Constructional Steel Research. 2010. Vol. 66. Issue 12. Pp. 1455–1466.
21. Kim J., Yoon J.-C., Kang B.-S. Finite element analysis and modeling of structure with bolted joints // Applied Mathematical Modelling. 2007. Vol. 31. Issue 5. Pp. 895–911.
22. Kato B., Hirose R. Bolted tension flanges joining circular hollow section members // Journal of Constructional Steel Research. 1985. Vol. 5. Issue 2. Pp. 79–101.
23. Теплых А.В. Оценка предельной несущей способности фланцевого соединения на высокопрочных болтах // Строительная механика и расчет сооружений. 2011. №2. С. 37–41.

*Александр Александрович Семенов, г. Уфа, Россия
Тел. моб.: +7(917)3434337; эл. почта: asfugntu@yandex.ru*

*Анатолий Александрович Маляренко, Москва, Россия
Тел. раб.: +7(499)9408829; эл. почта: maa@scadsoft.ru*

*Илья Аркадьевич Порываев, г. Уфа, Россия
Тел. моб.: +7(917)4011118; эл. почта: iporivaev@gmail.com*

*Марат Нуритдинович Сафиуллин, г. Уфа, Россия
Тел. моб.: +7(917)4406683; эл. почта: safiullinmarat@list.ru*

© Семенов А.А., Маляренко А.А., Порываев И.А., Сафиуллин М.Н., 2014

doi: 10.5862/MCE.49.6

Stress-strain behavior investigation of friction grip bolts in flange joints of trusses

A.A. Semenov

*Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia
+79173434337; e-mail: asfugntu@yandex.ru*

A.A. Malyarenko

*LLC, Scientific and Production Company "SCAD Soft", Moscow, Russia
+74999408829; e-mail: maa@scadsoft.ru*

I.A. Porivaev

*Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia
+79174011118; e-mail: iporivaev@gmail.com*

M.N. Safiullin

*Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia
+79174406683; e-mail: safiullinmarat@list.ru*

Key words

bolted flange joints; finite element analysis; analytical approach; stress analysis

Abstract

This article presents the results of the numerical research on bolted flange joints in the field joint of trusses. A computational model was chosen for SCAD. The geometrically nonlinear calculation was made.

The paper shows the correlation between stress and strain behavior of bolts and load intensity. Numerical results of the SCAD model calculation are compared with the results of the classical methods and ANSYS model calculation. The spatial stress-strain state of the connection is shown. The results of the study estimate the influence of bending moments on the stress-strain state of the bolts. The bending moments and rigidity ratio between different elements of the joints affect the load-carrying capacity of the bolts.

The article is useful for engineers who are making calculations of tension flange joints.

References

1. Katyushin V. V. *Zdaniya s karkasami iz stalnykh ram peremennogo secheniya* [Buildings with steel frames, of variable section]. Moscow: Stroyizdat, 2005. 450 p. (rus)
2. Korneyev M. A. *Stalnyye mosty. Teoreticheskoye i prakticheskoye posobiye po proyektirovaniyu* [Steel bridges. Theoretical and practical guide for designing]. Kiyev: 2003. 547 p. (rus)
3. Birger I. A., Ioselevich G.B. *Rezbovyye i flantsevyye soyedineniya* [Threaded and flanged connections]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1990. 366 p. (rus)
4. *Proyektirovaniye metallicheskih konstruksiy. Spetsialnyy kurs* [Design of steel structures. Special Course]. Tutorial for High school, V. V. Biryulev [et al]. Leningrad: Stroyizdat, 1990. 432 p. (rus)
5. *Posobiye po proyektirovaniyu stalnykh konstruksiy (k SNiP 2-23-81*)* [Guide to design of steel structures (for building code 2-23-81*)]. TsNIISK im. Kucherenko Gosstroya SSSR. Moscow: TsITP Gosstroya SSSR, 1989. 148 p. (rus)
6. *Rekomendatsii po raschetu, proyektirovaniyu, izgotovleniyu i montazhu flantsevykh soyedineniy stalnykh stroitelnykh konstruksiy* [Manual for the design of steel structures (to SNIP * 2-23-81)]. VNIPI Promstalkonstruksiya, TsNIIPSK im. Melnikova. Moscow, 1988. 83 p. (rus)
7. *Rekomendatsii po proyektirovaniyu rabotayushchikh na sdvig boltovykh soyedineniy stalnykh stroitelnykh konstruksiy* [Recommendations for the analysis, design, fabrication and installation of the flange connections of structural steel]. Moscow: TsNIIPSK im. Melnikova, 1990. 18 p. (rus)
8. *Rekomendatsii po nadzoru i tekhnicheskoy ekspluatatsii montazhnykh soyedineniy na vysokoprochnykh boltakh stalnykh stroitelnykh konstruksiy zdaniy i sooruzheniy Ministerstva metallurgii SSSR* [Recommendations for surveillance and technical operation of wiring high-strength bolts of steel constructions of buildings and structures of the Ministry of Metallurgy of the USSR]. Moscow: TsNIIPSK im. Melnikova, 1989. 34 p. (rus)

Semenov A.A., Malyarenko A.A., Porivaev I.A., Safiullin M.N. Stress-strain behavior investigation of friction grip bolts in flange joints of trusses

9. *Rukovodstvo po proyektirovaniyu, izgotovleniyu i sborke montazhnykh flantsevykh soyedineniy stropilnykh ferm s poiyasami iz shirokopolochnykh dvutavrov* [Guidelines for the design, construction and assembly of the mounting flanges trusses with belts of H sections]. Moscow: TsNIIPSK im. Melnikova, 1981. 62 p. (rus)
10. Alpatov V. Yu., Solovyev A. V., Kholopov I. S. K voprosu rascheta flantsevykh soyedineniy na prochnost pri znakovremennoy epюре napryazheniy [The issue of calculating flange connections for strength with alternating stress diagram]. *Industrial and civil engineering*. 2009. No. 2. Pp. 26–30. (rus)
11. Perelmuter A. V., Kriksunov E. Z., Yurchenko V. V. Raschetnyye modeli flantsevykh soyedineniy ramnykh uzlov metallicheskikh konstruksiy i ikh programmnyaya realizatsiya v "SCAD Office" [Computational models of flanges frame assemblies of metal structures and program implementation in the "SCAD Office"]. *CADMaster*. 2010. No.3. Pp. 110–115. (rus)
12. Abid M., Nash D.H. Comparative study of the behaviour of conventional gasketed and compact non-gasketed flanged pipe joints under bolt up and operating conditions. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2003. Vol. 80. Issue 12. Pp. 831–841.
13. Joshi D., Mahadevan P., Marathe A., Chatterjee A. Unimportance of geometric nonlinearity in analysis of flanged joints with metal-to-metal contact. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2007. Vol. 84. Issue 7. Pp. 405–411.
14. Krishna M. M., Shunmugam M. S., Prasad N. S. A study on the sealing performance of bolted flange joints with gaskets using finite element analysis. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2007. Vol. 84. Issue 6. Pp. 349–357.
15. Nechache A., Bouzid A.-H. On the use of plate theory to evaluate the load relaxation in bolted flanged joints subjected to creep. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2008. Vol. 85. Issue 7. Pp. 486–497.
16. Zerres H., Guerout Y. Present calculation methods dedicated to bolted flanged connections. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2004. Vol. 81. Issue 2. Pp. 211–216.
17. Bouzid A.-H., Nechache A. The modelling of bolted flange joints used with disc springs and tube spacers to reduce relaxation. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2010. Vol. 87. Issue 12. Pp. 730–736.
18. Nash D.H., Abid M. Combined external load tests for standard and compact flanges. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2000. Vol. 77. Issue 13. Pp. 799–806.
19. Nasrabadi M. M., Torabian S., Mirghaderi S. R. Panel zone modelling of Flanged Cruciform Columns: An analytical and numerical approach. *Engineering Structures*. 2013. Vol. 49. Pp. 491–507.
20. Salih E.L., Gardner L., Nethercot D.A. Numerical investigation of net section failure in stainless steel bolted connections. *Journal of Constructional Steel Research*. 2010. Vol. 66. Issue 12. Pp. 1455–1466.
21. Kim J., Yoon J.-C., Kang B.-S. Finite element analysis and modeling of structure with bolted joints. *Applied Mathematical Modelling*. 2007. Vol. 31. Issue 5. Pp. 895–911.
22. Kato B., Hirose R. Bolted tension flanges joining circular hollow section members. *Journal of Constructional Steel Research*. 1985. Vol. 5. Issue 2. Pp. 79–101.
23. Teplykh A.V. Otsenka predelnoy nesushchey sposobnosti flantsevogo soyedineniya na vysokoprochnykh boltakh [Evaluation of ultimate load capacity of the flange connection to the high-strength bolts]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy*. 2011. No. 2. Pp. 37–41.

Full text of this article in Russian: pp. 54–62