

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Строительные конструкции, здания и сооружения

УДК 69.07



И.С. Казакова

Вологодский государственный университет

ВЫБОР ЭФФЕКТИВНОГО КОНСТРУКТИВНОГО РЕШЕНИЯ ЖЕСТКИХ УЗЛОВ СТАЛЬНЫХ КАРКАСОВ ЗДАНИЙ

В статье представлены исследования конструктивного решения жестких узлов стальных рам каркасов зданий. Рассмотрено напряженно-деформируемое состояние двух типов узлов. Исследованы жесткие узлы на болтах с контролируемым натяжением и соединения на сварке. Выполнены сметные расчеты. Установлена стоимость каждого из типов узлов и сделан выбор наиболее экономичного конструктивного решения узла.

Рамные каркасы зданий, жесткие узлы, болтовые соединения, болты с контролируемым натяжением, сварные соединения, сметные расчеты, минимальная стоимость.

На сегодняшний день наблюдается рост строительства зданий и сооружений с использованием металлических конструкций, в основе которых лежит рамная конструктивная схема. Она применяется при строительстве многих гражданских зданий (административных зданий, торгово-развлекательных центров, спортивных сооружений и т.д.).

Стальная рама каркаса состоит из горизонтальных и вертикальных конструктивных элементов, где в большинстве случаев горизонтальными являются стальные балки, а вертикальными – колонны. Узлы, в которых происходит соединение основных конструктивных элементов, а также нескольких конструкций в единую систему, являются крайне важной составляющей любых зданий или сооружений. Выбор и исполнение способов соединения конструктивных элементов в узлах существенно влияют не только на качество конструкции, но и на общую экономическую эффективность и строительную пригодность проекта.

Жесткие соединения в таких конструктивных схемах надежно показали себя на практике. Использование жестких узлов позволяет создать прочное соединение, способное выдерживать значительные нагрузки и обеспечивать безопасность и надежность сооружения.

Соединение элементов в жестком узле может выполняться на болтах с контролируемым натяжением или на сварке.

В различные периоды строительства зданий активно использовали как сварные, так и болтовые соединения. Сварные соединения имеют ряд преимуществ перед болтовыми: они исключают ослабления поперечного сечения, не требуют сверления отверстий, что сохраняет структурную целостность элементов и приводит к снижению трудоемкости и эко-

номии материалов. Для болтовых соединений характерна повышенная сложность устройства, что требует точного сверления отверстий в элементах. Это увеличивает время изготовления, стоимость и вероятность ошибок. Однако болтовые соединения отличаются эффективностью при монтаже, что особенно удобно при сборке конструкций на строительной площадке. Предварительно изготовленные болты и гайки обеспечивают постоянную прочность и надежность, что упрощает контроль качества по сравнению со сварными соединениями.

В 60–80-х годах прошлого века были проведены экспериментальные исследования и разработаны методики расчета сварных узловых соединений. В работе Н.И. Троицкого и И.В. Левитанского [1] рассматриваются методы расчета сварных жестких узлов. В работе используется статический метод теории предельного равновесия в соответствии с материалами экспериментальных исследований в ЦНИИПроектстальконструкция в 1969–1971 гг. Предложенная методика расчета рамного узла, разработанная на основе статического метода теории предельного равновесия, основана на предположении, что в предельном состоянии все элементы узла способны работать за пределами упругости. Авторами делается вывод, что сварной рамный узел на накладках весьма надежен в эксплуатации.

После разработки ЦНИИПроектстальконструкцией и введением в действие в 1982 году типовой серии 2.440-1 [2] стали активно использоваться болтовые соединения, поскольку они имели больше преимуществ по сравнению с существующими сварными. Назначение работы – унификация узлов и максимальное уменьшение трудозатрат при изготовлении, монтаже конструкций и разработке проектов стальных

конструкций многоэтажных производственных зданий на стадиях КМ и КМД. В типовой серии представлены рамные узлы соединений ригелей с колоннами: фланцевые узлы с предварительным натяжением высокопрочных болтов и узлы с накладками и высокопрочными болтами, работающими на обеспечение трения между соединяемыми элементами. Методика расчета в типовой серии [2] основывалась на отечественных и зарубежных экспериментально-теоретических исследованиях работы соединений элементов стальных конструкций того времени. Типовая серия в настоящее время не потеряла своей актуальности.

В работе В.М. Добрачева и Д.С. Вершинина [3] приводятся результаты исследования четырех вариантов стыка на болтах с помощью нового программного обеспечения ANSYS. Дается оценка расхода стали и приведенных затрат. Новое программное обеспечение позволяет оценить напряженно-деформируемое состояние узла стыка ригеля и колонны, что ранее не представлялось возможным. Для определения наиболее экономичного варианта узла сопряжения балок перекрытия и колонн был выполнен статический расчет методом конечных элементов поперечной рамы 5-этажного двухпролетного здания, подбор сечений балок перекрытия и конструирование узлов сопряжения балок с колоннами. Сравнение было выполнено по четырем вариантам узлов сопряжения балок с колоннами – балки с жестким узлом сопряжения с колоннами (классический узел на накладках и фланцевый узел); балки с полужестким узлом сопряжения с колоннами и новое конструктивное решение – балки с предварительно напряженными затяжками. На основании проведенных исследований эффективности рамных узлов был сделан вывод, что наиболее экономичным вариантом по критерию расхода металла и приведенных затрат является новое конструктивное решение балки с предварительно напряженными затяжками.

В работе [4] рассматриваются четыре вида конструктивных решений фланцевого соединения на болтах с использованием нового программного обеспечения ANSYS, но все они выполнены для узловых соединений, работающих только на растягивающие усилия.

После разработки конструктивного решения каркаса здания с неразрезными ригелями и колоннами высотой на этаж, стали активно использоваться сварные соединения ригеля и колонны. Такие соединения отличает простота устройства. Они использованы в каркасах зданий торгово-развлекательных центров в Вологде (ОАЗИС, ФОРУМ, КИТ и другие). Исследования напряженно-деформируемого состояния таких узловых соединений в литературе не представлено.

Анализ технической литературы по жестким узлам стальных рам каркасов зданий показал, что исследования проводились отдельно для болтовых или отдельно для сварных соединений, напряженно-деформируемое состояние жестких узлов изучено недостаточно. Исследований напряженно-деформиру-

ванного состояния жестких сварных и болтовых узлов, рассчитанных на одни и те же усилия, и их технико-экономической оценки в технической литературе не представлено.

Актуальной задачей является поиск наиболее экономичного конструктивного решения жесткого узла стальных рам каркасов зданий. Предметом исследования является выбор эффективного конструктивного решения жесткого узла на болтах с контролируемым натяжением или на сварке.

Научная новизна исследования состоит в разработке научно-практических рекомендаций, обеспечивающих экономическую эффективность как на этапе проектирования, строительства, так и на этапе эксплуатации объекта. Используя результаты работы, проектные и строительные организации смогут применить наиболее эффективный и надежный вариант конструктивного решения жесткого узла.

В ходе сравнения двух видов жестких узлов оценивается их напряженно-деформируемое состояние, сопоставляется расход стали и стоимость выполнения. В статье используются результаты экспериментально-теоретических исследований, выполненных магистрантом К.Е. Никуличевым.

Исследования узлов проводятся на стальном каркасе здания, в основе которого двухэтажная трехпролетная рама пролетом 6 м, с шагом колонн 6 м. Каркас выполнен по рамно-связевой схеме. Каркас моделировался в программе Autodesk Advance Steel. Разработанная пространственная модель каркаса представлена на рисунке 1.

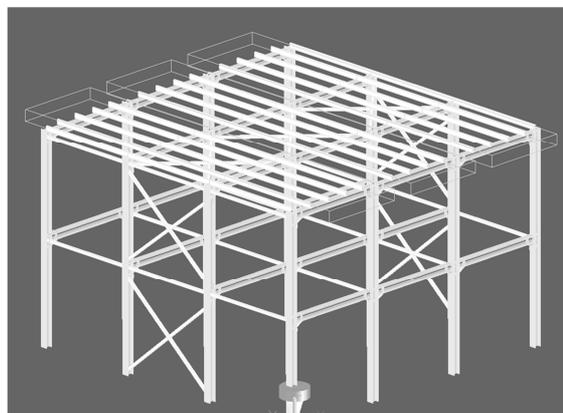


Рис. 1. Стальной каркас здания – трехмерный вид

Расчет стального каркаса выполнен в программе SCAD Office. Нормативные значения нагрузок принимались по СП20.13330.2016 Нагрузки и воздействия [5]. В расчете учитывались: постоянная нагрузка от веса металлоконструкций (рассчитывалась программой SCAD Office); временная нормативная нагрузка (4 кН/м^2); нормативная ветровая нагрузка (для I снегового района – $0,23 \text{ кН/м}^2$); нормативная снеговая нагрузка (для IV снегового района – $2,0 \text{ кН/м}^2$).

Для расчета приняты три варианта нагружения ригелей. Первый вариант с нагрузкой всех трех пролетов, второй вариант – с нагружением на крайние

пролеты, третий вариант – с нагружением первого и второго пролета.

Подобраны сечения основных конструктивных элементов рамного каркаса по ГОСТ 57847-2017: для балки – двутавр 40Ш1, для колонны – двутавр 40К1.

В настоящем исследовании использовался программный комплекс ANSYS Workbench. Среди достоинств этого программного комплекса можно выделить большое количество встроенных пре- и постпроцессоров, продвинутый интерфейс, инновационные методы выполнения задач, а также огромное собрание материалов и строительных конструкций. С помощью препроцессоров в программном комплексе ANSYS можно выполнить модель конструкции, в модуле Workbench назначить необходимые материалы конструктивным элементам, в Mechanical можно указать состояние контакта поверхностей, разделить модель сетками, выполнить приложение нагрузок и выбрать защемление объекта, выполнить расчет, получить различные виды результатов.

Для моделирования фланцевого узла в месте примыкания балки к колонне использован препроцессор, встроенный в ПО ANSYS, под названием Design Modeler. Модель состоит из полнотелых отдельных тел. Все элементы узла подобраны в соответствии с серией 2.440-1 Выпуск 1 [2]. Болты с контролируе-

мым натяжением М24 смоделированы в соответствии с нормативными требованиями, в процессе моделирования болты и гайки приняты одним сплошным телом, что ускорило расчет узла. В узле в колонне запроектированы горизонтальные ребра жесткости, прикрепляемые к стенке и полкам колонны. Смоделированы сварные швы с поперечным сечением в виде равнобедренного прямоугольного треугольника. Катет поперечного сечения принимался равным катету сварного шва. На рисунке 2 приведен чертеж фланцевого узла, на рисунке 3 показана его модель.

Данное исследование предполагает использование нелинейного поведения свойств применяемых сталей. Диаграммы упругопластической работы материала для элементов фланцевого узла приняты из стали С255Б для колонн, балок, ребер жесткости; из стали С345 – для фланца, из стали 40Х – для гаек и болтов. Прочностные характеристики сталей задаются в свойствах материала в ПО ANSYS с учетом нелинейной работы материала.

Моделирование жесткого узла включает в себя процесс установки различных типов соединения между элементами конструкции. Программный комплекс ANSYS предусматривает возможность устанавливать для любого вида соединения различные модели, основанные на различии физических условий, при которых контактируют реальные объекты.

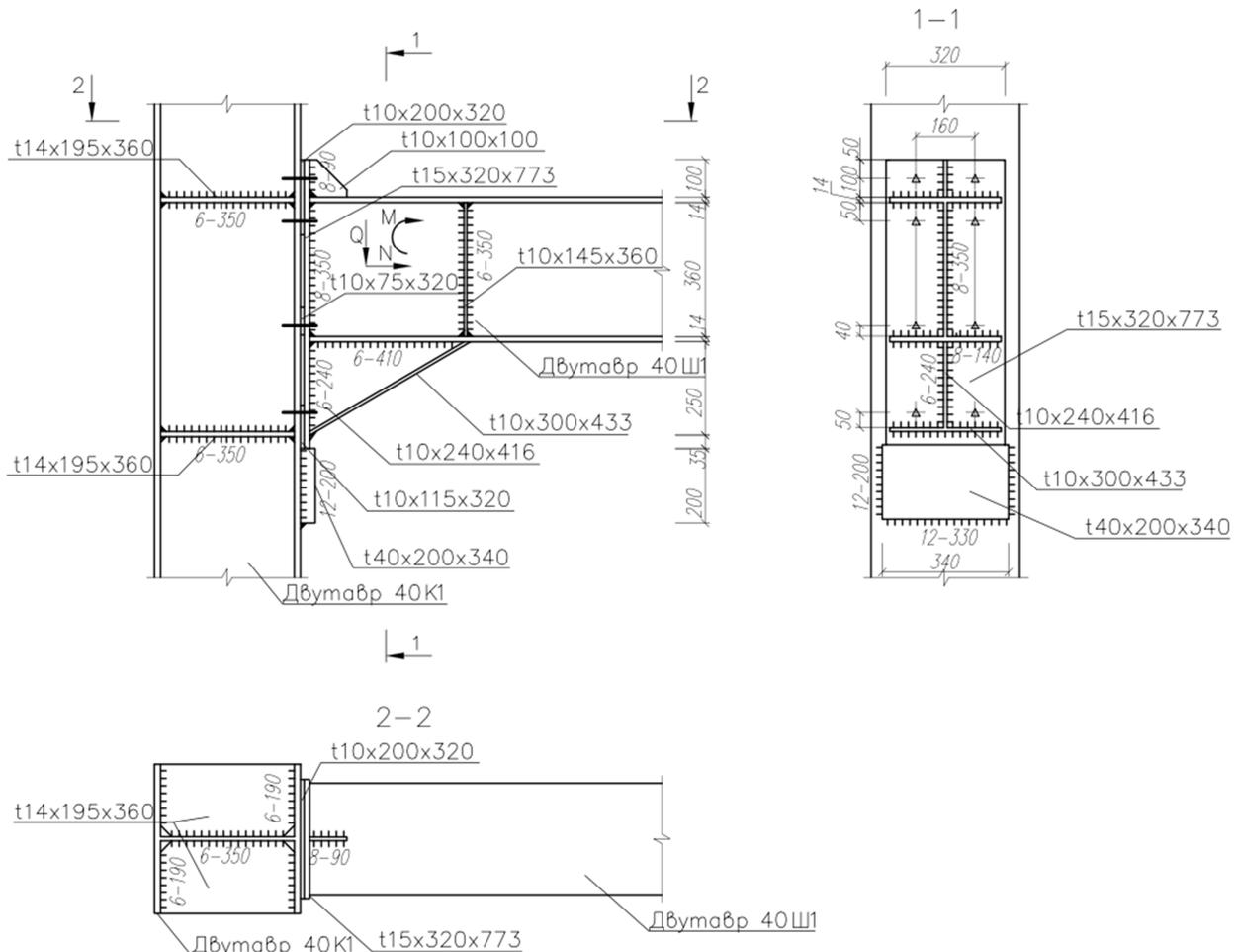


Рис. 2. Чертеж исследуемого фланцевого узла

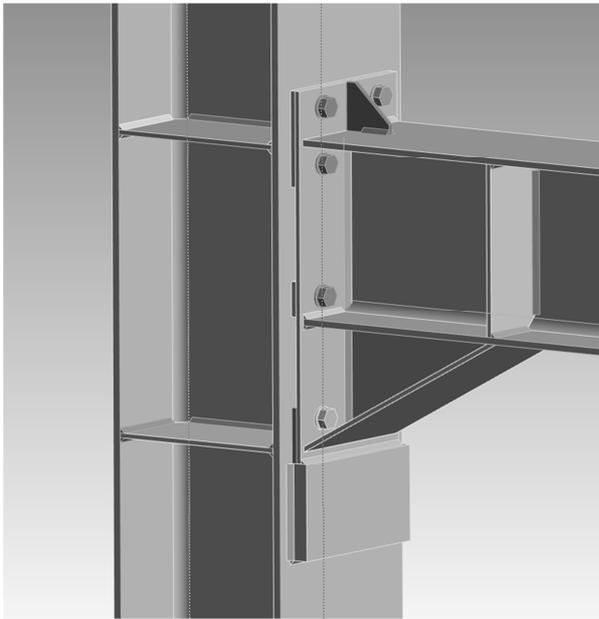


Рис. 3. Модель фланцевого узла

Для моделирования фланцевого соединения используются два вида контактных площадок. В случае соединения тела болта с другим элементом, а также фланца и гайки, используется тип контакта Frictional. Такая модель контакта учитывает влияние сил трения скольжения, пропорциональных нормальной силе реакции. Площадь контакта может варьироваться и обычно включает в себя зоны прилипания и скольжения, которые возникают, когда тангенциальная сила (статическое трение) достигает критического значения. В настоящем исследовании коэффициент трения установлен на уровне 0,35.

При соединении элементов модели со сварным швом используется контакт типа Bonded. Для имитации жесткой заделки используется функция Fixed Support, которая применяется к нижнему и верхнему торцу колонны, она запрещает любое перемещение модели.

Нагрузка прикладывается к модели в две ступени. На первой стадии задается контролируемое натяжение болтов при помощи функции Boltpretention до усилия в 271 кН согласно серии [2]. На втором этапе прикладываются нагрузки. Приложение нагрузок в программе соответствует работе узла в реальных условиях: сначала затягиваются болты, затем прикладывается нагрузка.

При исследовании напряженно-деформируемого состояния узла контролируются следующие параметры: вертикальные и горизонтальные перемещения, напряжения в исследуемых элементах узла, усилия в болтах.

Генерация сетки конечных элементов выполняется программой в автоматическом режиме. Для единичного конечного элемента вручную установлен размер 10×10 мм. Общее число полученных в результате генерации конечных элементов составило 121 542, количество узлов – 244 741. Сетка конечных элементов в узле и распределение напряжений пред-

ставлены на рисунке 4. Максимальное напряжение в балке 218,2 МПа < 245 МПа (таблица В.3 СП16.13330.2017 [6]).

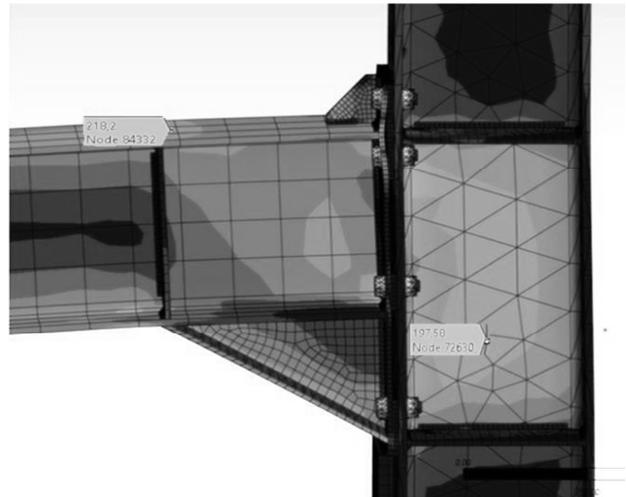


Рис. 4. Распределение нормальных напряжений в узле

Напряжения во фланце представлены на рисунке 5. Максимальное растягивающее напряжение в болтах 728 МПа < 755 МПа (таблица Г.8 [6]), напряжение смятия во фланце – 349,5 МПа < 620 МПа (таблица Г.6 [6]).

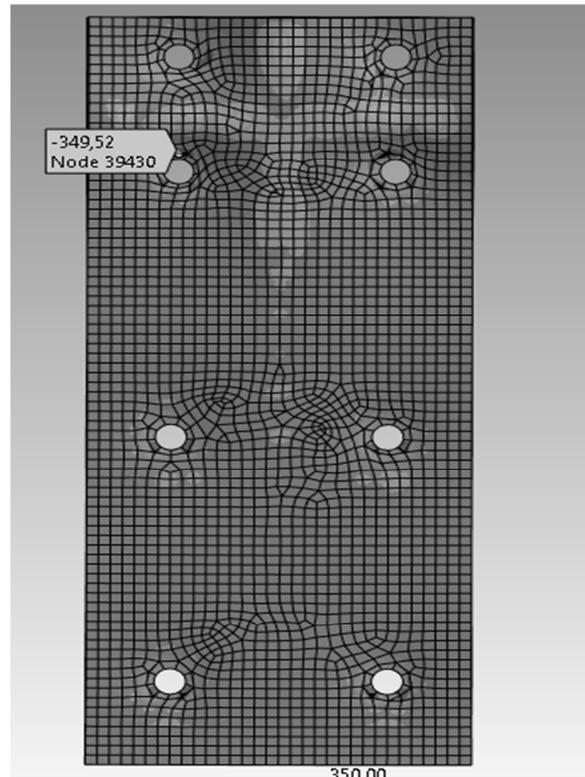


Рис. 5. Напряжения смятия во фланце

При максимальной нагрузке на узел наблюдаются: изгиб фланца по сложной форме (рис. 6), небольшое удлинение болтов. В конструкции узла нет ярко выраженных слабых мест. Разрушение возможно по различному сценарию, что говорит о рациональности

узла. Все действующие на узел напряжения не превышают своих нормативных требований, деформации во всех конструктивных элементах происходят упруго. Прочность обеспечивается.

Контролируемые параметры не выходят за пределы максимальных значений. Болты подобраны с минимальным недонапряжением – 6,5 %. Минимальное недонапряжение в элементах фланцевого узла – 11,0 %.

Аналогичные исследования напряженно-деформируемого состояния для тех же усилий, что и фланцевый узел, проводились для сварного жесткого узла. Чертеж и модель сварного узла представлены на рисунках 7 и 8 соответственно. На рисунках 9 и 10 приведены напряжения в горизонтальном сварном шве между накладкой и верхней и нижней полками балки.

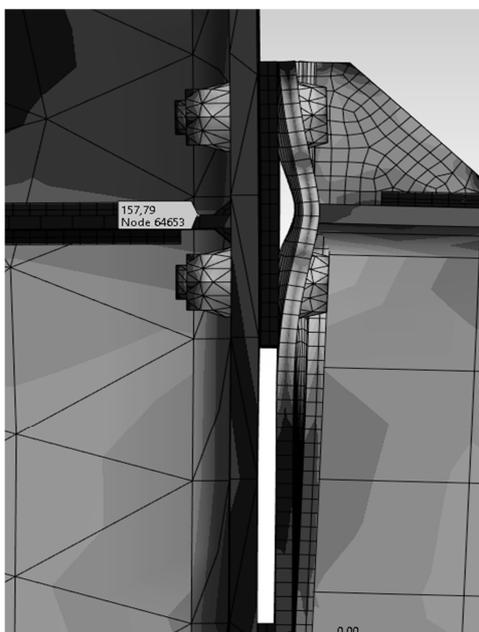


Рис. 6. Изгиб фланца

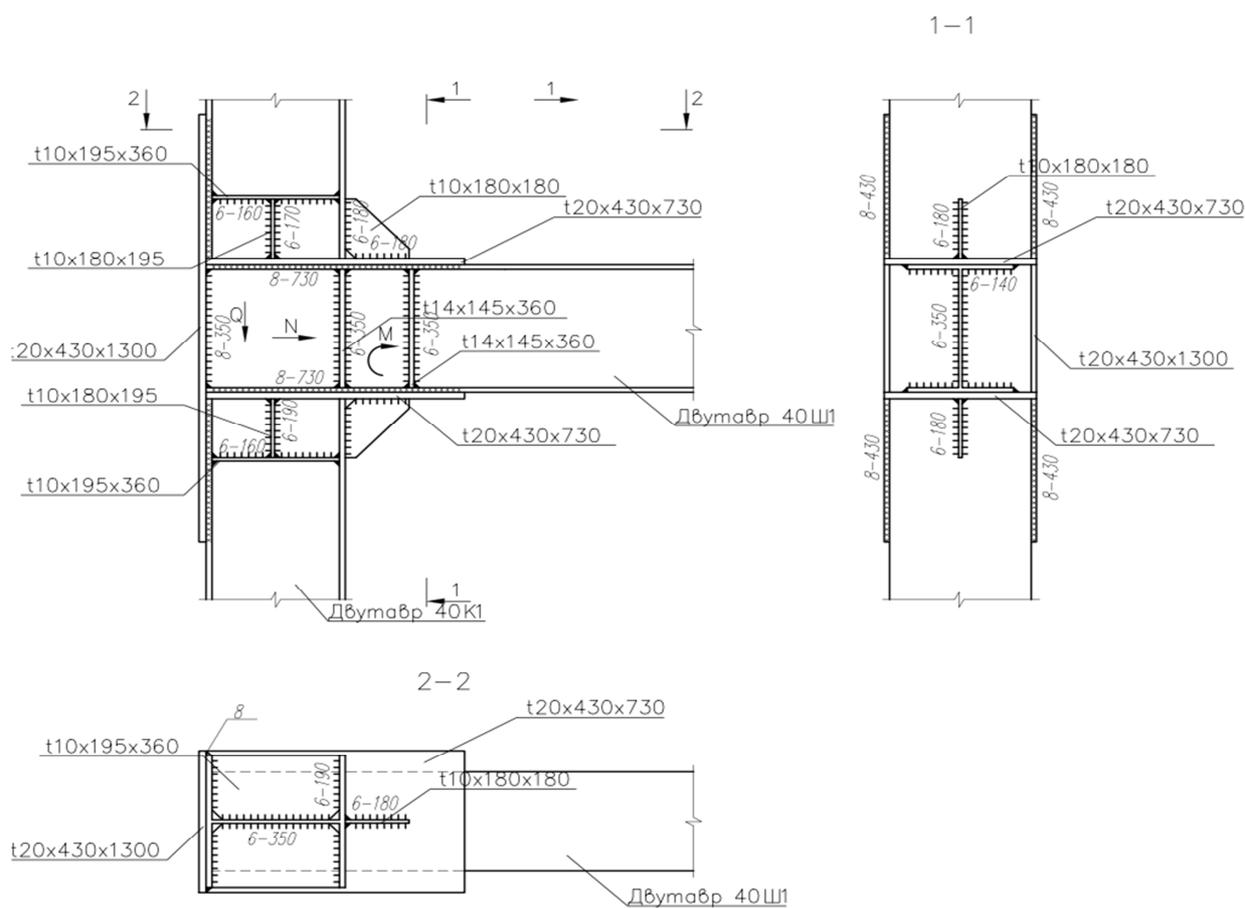


Рис. 7. Чертеж сварного узла

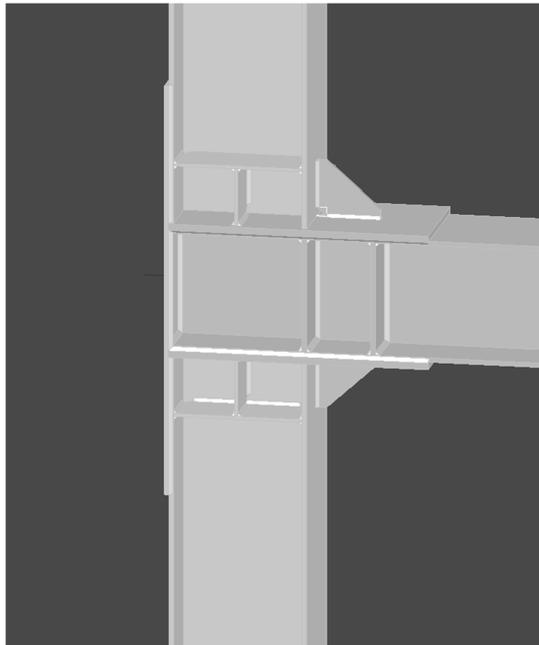


Рис. 8. Модель сварного узла



Рис. 9. Напряжения в горизонтальном сварном шве между накладкой и верхней полкой балки

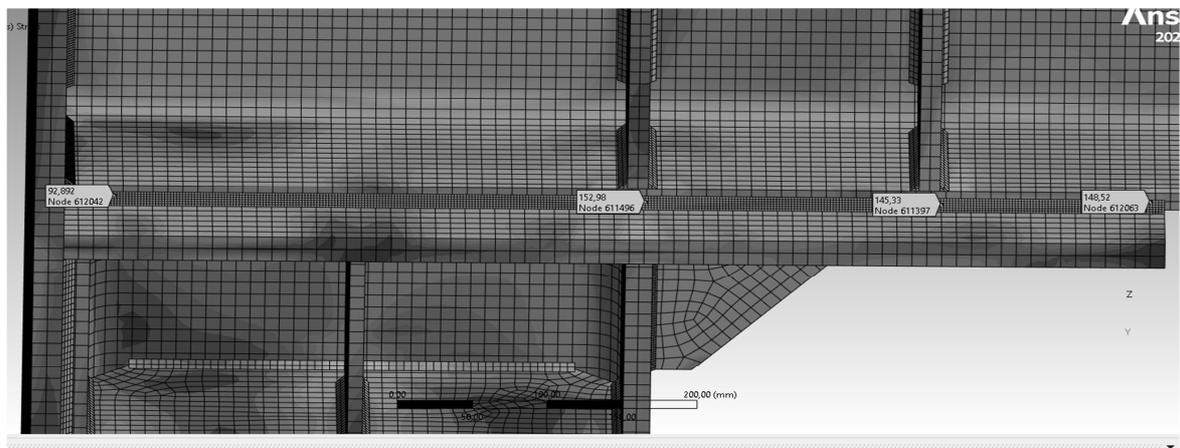


Рис. 10. Напряжения в горизонтальном сварном шве между накладкой и нижней полкой балки

В использованном способе при моделировании сварных соединений принимается несколько условий:

- материал сварного шва принимается одинаковым по всей толщине;
- металл сварного шва принимается с такими же характеристиками, как и другие элементы модели, это делается для того, чтобы можно было обеспечить одинаковую прочность сварного шва и металла привариваемого элемента конструкции;
- при оценке сварочного процесса не учитываются сварочные деформации во время и после сварки;
- температура сварных швов и околошовной зоны принята равной 21 °С, что соответствует нормальным условиям эксплуатации каркаса.

Диаграммы упругопластической работы материала для элементов сварного узла приняты для стали С245.

В результате проведенных исследований установлено:

- напряжения, возникающие в сварных швах, не превышают нормативных значений;
- напряжения в сварных швах распределяются равномерно, без резких изменений;
- наибольшие напряжения в швах узла возникают в нижнем горизонтальном шве между накладкой и нижней полкой балки и составляет 152,98 МПа < 166,5 МПа (таблица Г.2 [6]).

Результаты исследования напряженно-деформированного состояния жестких узлов рамного каркаса на болтах с контролируемым натяжением и на сварке представлены в таблице 1.

Исходя из анализа напряженно-деформированного состояния узлов, можно сделать вывод о том, что сварной узел менее деформативен по сравнению с болтовым соединением.

Для выбора наиболее эффективного конструктивного решения узла были составлены сметные расчеты.

Сметная стоимость изготовления стального каркаса в г. Вологде определена в нормах и ценах 2000 года. Стоимость изготовления технологических металлических конструкций принята по сборнику ФЕРм 81-03-38-2001 «Сборник 38. Изготовление технологических металлических конструкций в условиях производственных баз» [7]. Стоимость монтажных работ технологических металлических конструкций принята по сборнику ФЕРм 81-02-09-2001 «Сборник 9. Строительные металлические конструкции» [8]. Сметная стоимость контроля за сварными швами принята в соответствии со сборником «Сборник 39. Контроль монтажных сварных соединений» [9]. Расчеты выполнены на основании базы «Федеральные единичные расценки на строительные работы 2020». Стоимость рассчитана в ценах 4 квартала 2023 года по Вологодской области без учета НДС (20 %) и лимитированных затрат (временных зданий и сооружений, зимнего удорожания, снегоборьбы и прочих затрат). Была составлена сметная документация: локальный сметный расчет № 1 «На изготовление и монтаж металлических конструкций на болтовых соединениях» и локальный сметный расчет № 2 «На изготовление и монтаж металлических конструкций на сварных соединениях». Результаты сметного расчета представлены в таблице 2.

Сметная стоимость изготовления и монтажа на 1 тонну металлического каркаса здания с использованием жестких узлов составила:

- на болтах с контролируемым натяжением – 116 981,49 рублей;
- на сварке – 98 687,02 рублей.

Стоимость металлического каркаса с использованием жестких узлов между колонной и балкой на сварке выгоднее на 18,54 % по сравнению с жестким узлом на болтах с контролируемым натяжением.

Таблица 1

Сравнение результатов расчета жестких узлов

Параметр	Нормативные требования	Болтовое соединение	Сварное соединение	Разница, %
Вертикальные перемещения в узле	24 мм	7,76 мм	7,15 мм	8,53
Горизонтальные перемещения в узле	23,3 мм	1,98 мм	1,47 мм	34,69
Максимальные напряжения в болтах	775 МПа	728 МПа	-	-
Максимальные напряжения в сварных швах по границе сплавления	166,5 МПа	-	152,98 МПа	-

Результаты сметных расчетов жестких узлов

Виды и наименование работ	Стоимость конструкций за 1 тонну в рублях		чел/ч на 1 тонну	Примечание	Нормативный документ
	болтовые соединения	сварные соединения			
Изготовление конструкции	84 363,04	61 867,27	115,1	Изготовление на болтовых соединениях посчитано как разница между стоимостью готовой конструкции стоимостью монтажных работ на сварных соединениях. В стоимость изготовления на оба вида соединения входит стоимость металлопроката	ФЕРм 81-03-38-01-001 ФЕРм 81-03-38-01-002 [7]
Монтаж конструкций	32 618,42	28 612,42	22,4		ФЕР 81-02-09-01-001[9]
Контроль качества сварных стыков (прямые зазоры, без учета накладных и сметной прибыли), в том числе:		8 207,22	8,49		
Визуальный и измерительный контроль		104,10		Контроль качества принят из расчета 1 метр погонный шва на 1 тонну изделия	ФЕРм 81-03-39-02-022[8]
Контроль плотности способом керосиновой пробы		37,80			ФЕРм 81-03-39-02-020 [8]
Испытание вакуум-камерой		3 401,99			ФЕРм 81-03-39-02-021 [8]
Ультразвуковая дефектоскопия		612,92			

Выводы

1. Проведен анализ напряженно-деформированного состояния жестких узлов примыкания колонны и балки с использованием болтов с контролируемым натяжением и на сварке. Сварной узел получился менее деформативен по сравнению с болтовым соединением.

2. Стоимость металлического каркаса с использованием жестких узлов на сварке между колонной и балкой выгоднее на 18,54 % по сравнению с жестким узлом на болтах с контролируемым натяжением, трудоемкость выполнения сварного узла ниже на 29 %.

3. Исследование позволяет заказчику самостоятельно принять решение о выборе конструктивного решения жесткого узла на болтах с контролируемым натяжением или на сварке исходя из заявляемых требований (стоимость, трудоемкость, возможность контроля качества соединений, профессиональный состав рабочих).

Литература

1. Троицкий, П. Н. Исследование действительной работы сварного рамного узла крепления и рекомендации по его расчету / Н. И. Троицкий, И. В. Левитанский // Материалы по металлическим конструкциям. – 1977. – № 19.

2. Серия 2.440-1. Узлы стальных конструкций производственных зданий. Выпуск 1. Рамные и шарнирные узлы балочных клеток и примыкания ригелей к колоннам. ЦИТП Госстроя СССР, 1982. – 82 с. Дата актуализации: 01.01.2021.

3. Добрачев, В. М. Использование предварительного напряжения в конструкциях рамных узлов каркасов зданий / Добрачев, В. М., Вершинин, Д. С. // Сборник материалов III Международной научно-практической конференции «Проблемы строительного производства и управления недвижимостью», 26–27 ноября 2014 года, к 65-летию Кузбасского государственного технического университета имени Т. Ф. Горбачева посвящается / редколлегия: Угляница А. В. [и др.]. – Кемерово : КузГТУ, 2014. – 1 электрон. опт. диск (DVD-ROM); 12.

4. Макарова, Е. С. Анализ конструкции фланцевого соединения с применением ПК «ANSYS» / Е. С. Макарова // Вопросы науки и образования. – 2018. – № 24 (36). – С. 28–38.

5. СП 20.13330.2016. Свод правил. Нагрузки и воздействия: актуализированная ред. СНиП 2.01.07-85*: утв. Минстроем России 03.12.2016 №891/пр. (редакция от 30.12.2020) : введен 04.06.2017. – Москва : Минстрой России. – Дата сохранения 24.02.2022. – 128 с.

6. СП 16.13330.2017 Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81* – Москва : Стандартиформ, 2018. – 140 с.

7. ФЕРм 81-03-38-2001. Государственные сметные нормативы. Федеральные единичные расценки на монтаж оборудования. Часть 38. Изготовление технологических металлических конструкций в условиях производственных баз (в редакции приказов Минстроя России от 30 января 2014 г. № 31/пр., от 17 октября 2014 г. № 634/пр., от 12 ноября 2014 г. № 703/пр.).

8. ФЕРм 81-03-ОП-2001 Государственные сметные нормативы. Федеральные единичные расценки на монтаж оборудования. Общие положения (в редакции приказов Минстроя России от 30 января 2014 г. № 31/пр, от 17 октября 2014 г. № 634/пр, от 12 ноября 2014 г. № 703/пр.).

9. ФЕР 81-02-09-2001 Государственные сметные нормативы. Федеральные единичные расценки на строительные и специальные строительные работы. Часть 9. Строительные металлические конструкции (с Изменениями от 27.02.2010, от 13.07.2011, от 08.11.2011)

I.S. Kazakova
Vologda State University

CHOICE OF EFFECTIVE CONSTRUCTIVE SOLUTION FOR RIGID JOINTS OF BUILDINGS STEEL FRAMES

The article presents studies of the constructive solution for rigid assemblies of steel frames of building frames. The stress-strain state of two types of joints is considered. Rigid joints on bolts with controlled tension and joints on welding are investigated. Cost estimates have been made. The cost of each type of joints has been determined and the most economical design solution of the joint has been selected.

Rigid frames of buildings, rigid joints, bolted joints, bolts with controlled tension, welded joints, estimated calculations, minimum cost.