



И.С. Казакова

Вологодский государственный университет

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРУЕМОГО СОСТОЯНИЯ СТАЛЬНЫХ РАМ С УЧЕТОМ ОШИБОК ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ И МОНТАЖЕ

В статье представлены результаты исследования напряженно-деформируемого состояния жестких узлов стальных рам на болтах с контролируемым натяжением с учетом ошибок при изготовлении и монтаже конструкций. Рассмотрены контролируемые параметры при работе фланцевого узла с ошибками его изготовления и монтажа. Установлено количество болтов без контролируемого натяжения, при котором конструкция не будет соответствовать нормативным требованиям.

Стальные рамы, фланцевый узел, ошибки изготовления и монтажа, болты с контролируемым натяжением.

Возведение каркасных зданий из металлических конструкций – сложный процесс, требующий профессионализма от его участников. На любом этапе создания объекта строительства могут возникать ошибки, которые приводят к снижению прочности и устойчивости стальных рам каркасов, а также к возможным повреждениям в процессе эксплуатации.

Большинство ошибок наблюдается при монтаже конструкций. Исследования таких ошибок проводятся в разных организациях и их результаты редко систематизированы и доступны для общего использования. Это затрудняет общее понимание и анализ ошибок, а также препятствует разработке эффективных методов предотвращения и исправления их.

Необходимо отметить, что в металлических каркасах перераспределение внутренних усилий в результате неточностей изготовления, сборки или монтажа может в значительной степени повлиять на несущую способность элементов рамы. Если при изготовлении строительных конструкций с необходимым контролем качества завод-изготовитель гарантирует соответствие отправочных марок проектным размерам, то на строительной площадке в ходе укрупнительной сборки и при выполнении монтажных работ возможны отклонения геометрических параметров конструкций от проектных значений, нередко превышающие предельно допустимые по нормам.

Каркас, смонтированный даже из идеально изготовленных конструкций, часто имеет отклонения колонн от вертикального положения, что ведет к снижению несущей способности конструкций [1]. Проведенные исследования показывают, что расчет идеализированной многоэтажной стальной каркасной кон-

струкции без учета несовершенств часто не обеспечивает несущую способность здания и не отвечает эксплуатационным требованиям по допустимым перемещениям каркасов [2].

Наблюдаются и противоположные ситуации, когда утверждение о невозможности эксплуатировать металлокаркас сооружения по назначению при наличии недостатков в выполненных строительно-монтажных работах бывает преждевременным без проведения расчета.

В работе [3] отмечается, что при приемке смонтированных конструкций здания производственно-складского корпуса со значительными отклонениями осей элементов каркаса здания от проектного положения как в плоскости, так и из плоскости рам расчетом была установлена возможность ввода в эксплуатацию производственно-складского корпуса без ограничений. Расчет позволил исключить возникновение аварийного состояния здания и доказал, что состояние конструкций работоспособное.

На основании анализа научных работ установлено, что исследований напряженно-деформированного состояния стальных рам каркасов с ошибками при монтаже недостаточно, а работ с анализом ошибок при выполнении узловых соединений и влиянием последних на напряженно-деформированное состояние элементов каркаса здания вообще нет.

Цель исследования состоит в оценке напряженно-деформированного состояния жестких узлов рам стальных каркасов с ошибками изготовления и монтажа и выводах о возможности таких ошибок или их недопустимости в связи с несоответствием контролируемых параметров нормативным требованиям.

Поскольку количество исследований о влиянии ошибок при монтаже на несущую способность и жесткость рам стальных каркасов ограничено, возникает необходимость изучения этого вопроса с использованием специального программного обеспечения для оценки напряженно-деформируемого состояния стальных каркасов. В качестве такого программного обеспечения идеально подходит программный комплекс ANSYS.

ANSYS – это программное обеспечение, предназначенное для проведения инженерных расчетов и моделирования различных физических процессов во многих областях, в том числе и в строительстве. Оно предоставляет инженерам инструменты для анализа и моделирования различных физических явлений. Использование современной вычислительной техники и программного обеспечения ANSYS позволяют вести поверочные расчеты промышленных и гражданских объектов с учетом дополнительных уточняющих факторов.

В работе представлены экспериментальные исследования стального каркаса с учетом ошибок при изготовлении и монтаже стыка ригеля и колонны.

В ходе исследования сравнивались жесткие узлы без ошибок изготовления и монтажа и с последними, сравнивалось их напряженно-деформированное состояние и делались соответствующие выводы о возможности таких ошибок или их неприемлемости в связи с несоответствием напряженно-деформируемого состояния нормативным требованиям.

Для исследования принят стальной каркас, основными элементами которого являются поперечные рамы, соединенные между собой распорками, вертикальными связями по колоннам и элементам покрытия. Рама каркаса здания выполнена по рамно-связевой конструктивной схеме. Пролет рамы – 12 м. Шаг рам – 4,5 м. Колонны в плоскости и из плоскости рам имеют шарнирное соединение с фундаментом; ригель с колоннами сопрягается жестко. Из плоскости рам устойчивость и геометрическая неизменяемость обеспечивается за счет системы вертикальных связей по колоннам, распорок, и горизонтальных связей покрытия.

Рассмотрен фрагмент здания в осях 27-35/А-Б. Схема расположения колонн и разрезы каркаса представлены на рисунках 1–4.

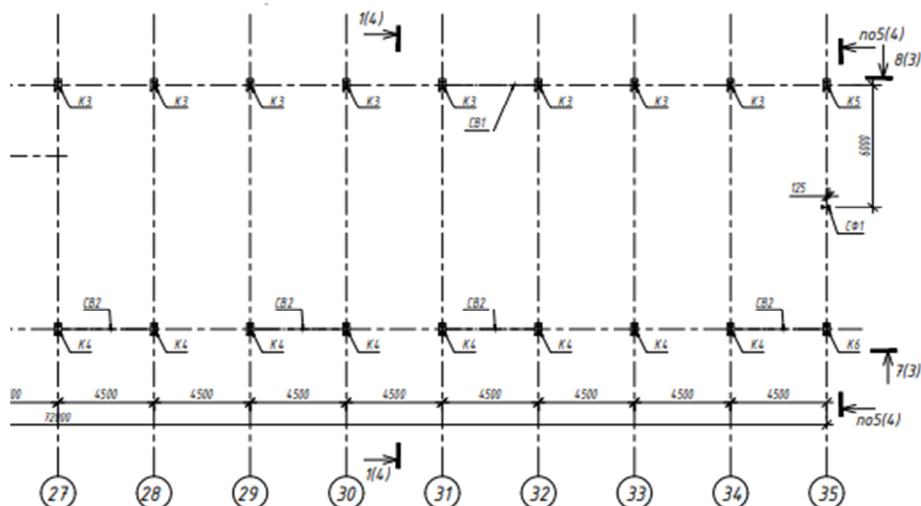


Рис. 1. Схема расположения колонн в осях 27-35/А-Б

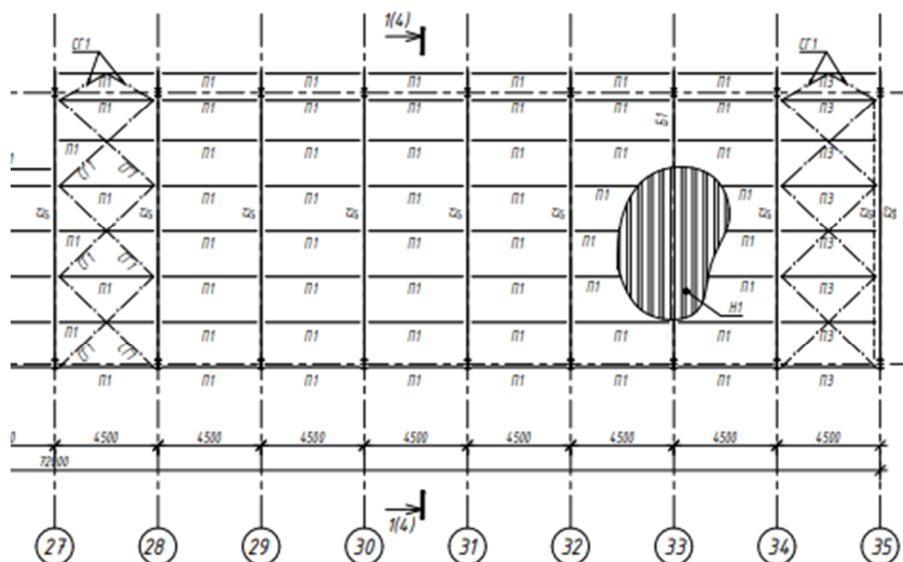


Рис. 2. Схема расположения элементов покрытия в осях 27-35/А-Б

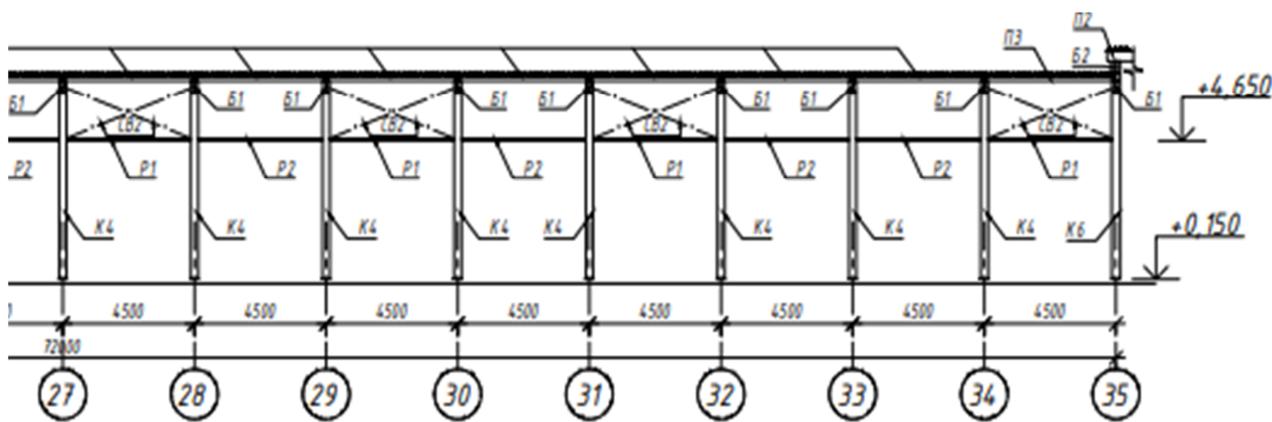


Рис. 3. Разрез 1-1

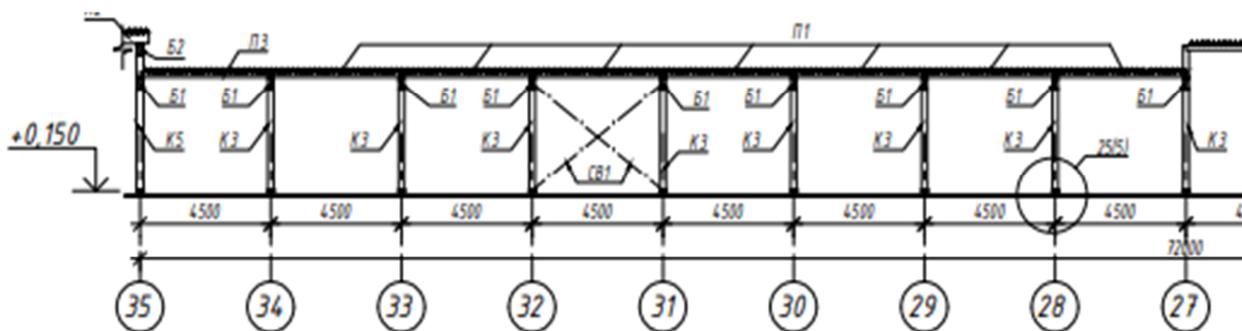


Рис. 4. Разрез 2-2

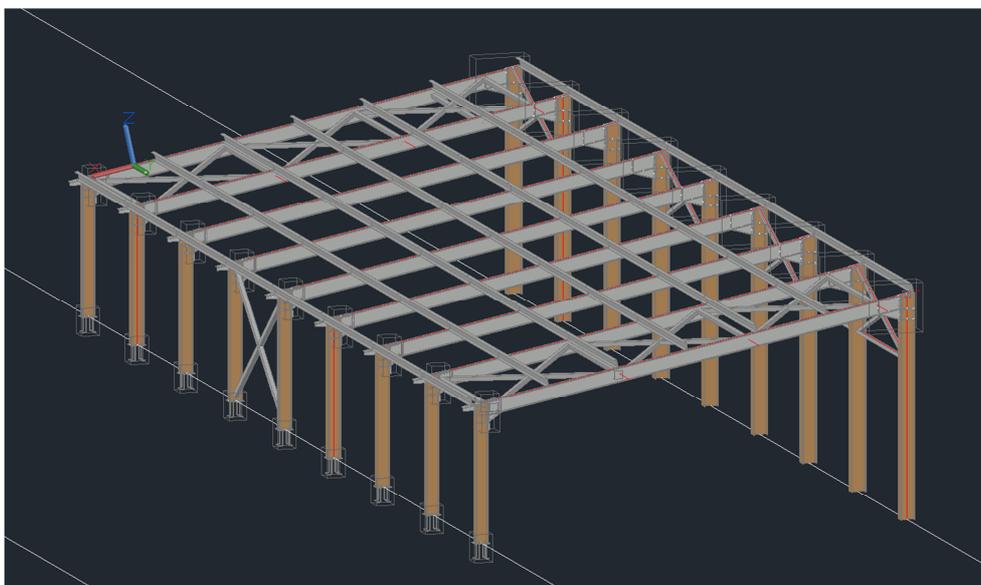


Рис. 5. Трехмерный вид металлокаркаса здания

Выполнено моделирование всего каркаса и моделирование стыка ригеля и колонны в программе AutoCAD при помощи модуля 3D. Трехмерная модель каркаса представлена на рисунке 5. Расчет сделан с использованием ПО ANSYS.

Все составные элементы каркаса были приняты согласно документации, представленной в проекте: колонны из двутавров 30Ш1 и 35Ш1, ригель из двутавра 40Б2 по ГОСТ 57837-2017, связи и раскосы из трубы квадратного сечения 120×5 мм по ГОСТ 30245-2003.

Для соединений на болтах с предварительным натяжением применяются болты класса прочности 10.9 из стали 40Х «Селект» по ГОСТ Р 52643-2006. Осевое усилие предварительного натяжения болтов – 27,1 тс. Натяжение болтов обеспечивается затяжкой гаек или вращением головок болтов до расчетного момента закручивания либо поворотом гаек на определенный угол. Соединяемые поверхности фланцев обработаны стальными щетками без консервации. Сборка фланцевых соединений производится в соответствии с п.4.6.17 СП 70.13330.2012 [4], «Рекомен-

дациями по сборке фланцевых монтажных соединений стальных строительных конструкций» [5] и ОСТ 36-72-82 [6]. Элементы фланцевых соединений на монтажной площадке проверяются на отсутствие погнутостей, надрывов сварных швов и т.п. Заусеницы вокруг отверстий и по краям фланцев, оставшиеся после изготовления, удаляются.

Предметом исследований является фланцевый узел стального каркаса. Установлено, что балки покрытия Б1.1, Б1.2, Б1.3, Б1.4, Б1.5, Б1.6 в осях 12-18, 19-21, 23-25, 27-35/А-Б изготовлены и выполнены с углами наклона фланцев, которые не обеспечивают при монтаже плотного присоединения к колоннам, в результате чего образовывается зазор. После выявления зазора между соединяемыми поверхностями деталей проектом предусматривалось крепление балок с монтажными прокладками и отсутствием зазора. Предполагалось, что прокладки будут

установлены на ширину и высоту опорного ребра балки и вута (косынки), однако установлено наличие зазоров высотой 55 мм, шириной 16 мм, монтажные прокладки не доходят до опорного столика, торцы пластин не фрезерованы. Второй ошибкой явилось непроjektное натяжение болтов в некоторых стыках. Для соединения балки с колонной используются предварительно-напряженные болты. Если они не затянуты до необходимого уровня, указанного в проекте, то это может привести к невозможности воспринимать действующие на каркас здания нагрузки и воздействия. В некоторых узлах не было обеспечено контролируемое натяжение в 1–2 болтах.

Поэтому необходимо рассчитать, как будет вести себя конструкция с учетом указанных выше ошибок. Фланцевый узел по проекту представлен на рисунке 6, с ошибками изготовления и монтажа – на рисунке 7.

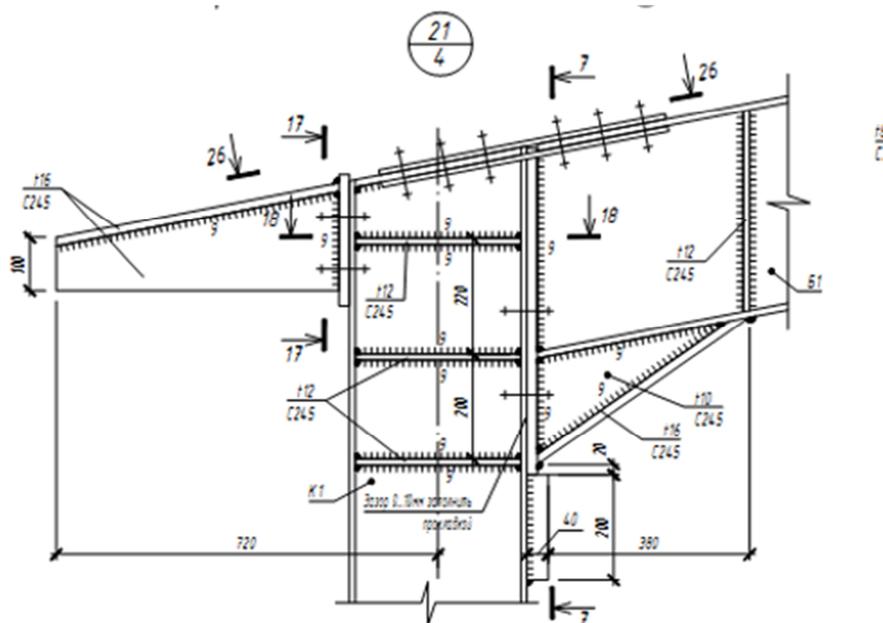


Рис. 6. Фланцевый узел каркаса по проекту

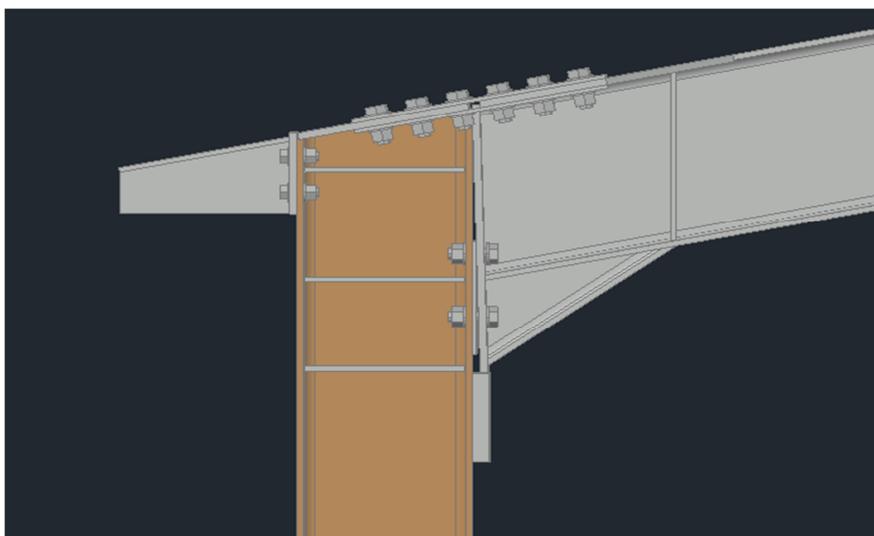


Рис. 7. Фланцевый узел с ошибками изготовления и монтажа

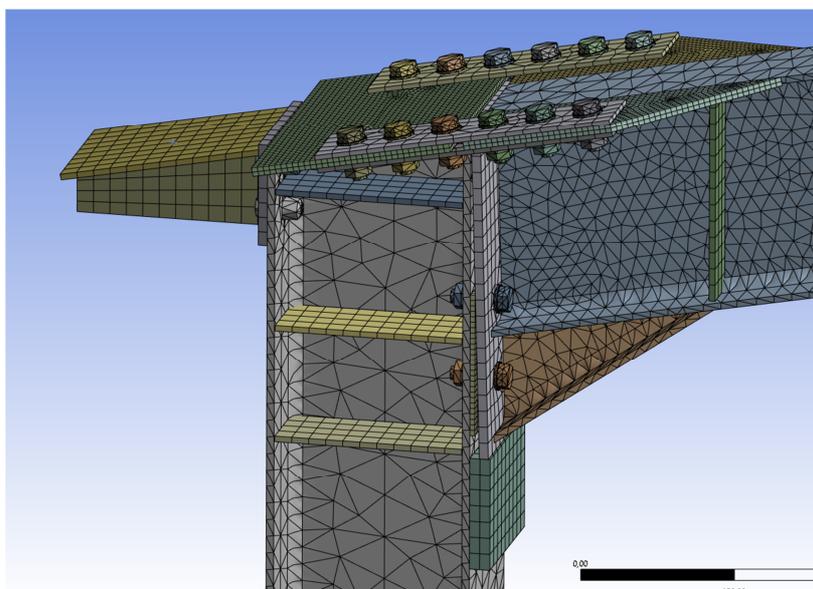


Рис. 8. К расчету фланцевого узла с ошибками изготовления и монтажа

Рассматривались рамы с дефектами изготовления фланцевого узла и с отсутствием контролируемого натяжения болтов.

Расчет фланцевого узла производится в программном обеспечении ANSYS Workbench. Вычислительный комплекс ANSYS Workbench относится к лидерам программных комплексов конечно-элементного анализа. Данная программа для математического моделирования различных физических процессов использует метод конечных элементов. 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 124 237. Сетка конечных элементов в узле представлена на рисунке 8.

Данное исследование выполнено с учетом нелинейного поведения свойств применяемых сталей. Диаграммы упругопластической работы материала для элементов фланцевого узла приняты для колонн, балок, ребер жесткости из стали С255; для фланца – из стали С345, для высокопрочных болтов – для стали 40Х «Селект». Прочностные характеристики сталей задаются в свойствах материала в ПО ANSYS с учетом нелинейной работы материала.

Расчет стального каркаса выполнен в программе SCAD Office. Нормативные значения нагрузок принимались по СП20.13330.2016 Нагрузки и воздействия [7]. В расчете учитывались: постоянная нагрузка от веса металлоконструкций (рассчитывалась программой SCAD Office); нагрузка от покрытия – 0,4 кН/м² (рассчитана в программе ВЕСТ), нормативная ветровая нагрузка (для II ветрового района – 0,3 кН/м²); нормативная снеговая нагрузка (для III снегового района – 1,5 кН/м²).

Усилия в узле для балок Б1: изгибающий момент $M=20,5$ тм; продольное усилие $N= -5,5$ тс; поперечная сила $G=8,5$ тс.

В ходе экспериментальных исследований в узле контролировались вертикальные и горизонтальные перемещения; напряжения смятия в опорном фланце;

напряжения смятия в элементах, соединяемых болтами; максимальные усилия в болтах.

При расчете автоматически проводилась генерация вариантов узлов с отсутствием контролируемого натяжения в болтах стенки (от 1 до 4) и полки (от 1 до 12). Результаты исследования сравнивались с эталонным узлом. Установлено, что конструкция узла перестает быть надежна при общем количестве всех незатянутых болтов в полке более 4. При количестве болтов без контролируемого натяжения от 1 до 4, узел воспринимает усилия и контролируемые параметры соответствуют нормативным требованиям СП20.13330.2016 [7] и СП 16.13330.2017 [8]. Выборка с результатами расчета некоторых вариантов конструкции узла с неточностями изготовления фланца и недонатяжением части высокопрочных болтов во фланцевом узле приведены в таблице.

Из результатов работы следует, что нельзя утверждать о невозможности эксплуатации здания с ошибками изготовления и монтажа. Оценка напряженно-деформируемого состояния исследуемого здания показала, что ошибки изготовления прокладок в узле и незатянутые болты во фланцевом соединении в количестве 1–2 не приводят к ограниченно-работоспособному или аварийному состоянию стального каркаса и доказывают безаварийность его работы даже в случае ошибок. Причинами этого являются перераспределение усилий в элементах каркаса.

Анализ напряженно-деформированного состояния узла показал, что указанные выше ошибки изготовления прокладки в узле и увеличение во фланцевом соединении количества незатянутых болтов до 4 не приводят к ограниченно-работоспособному состоянию каркаса. Увеличение количества незатянутых болтов свыше 4 приводит к аварийному состоянию исследуемого каркаса. Полученные результаты не могут быть распространены на все стальные каркасы зданий. Оценка напряженно-деформируемого состояния индивидуальна для каждого здания. Но вывод о возможности эксплуатации здания с ошибками изготовления и монтажа может иметь место.

Выборка из результатов расчета фланцевого узла с помощью программного обеспечения ANSYS

| № п/п | Количество незатянутых болтов в одной раме (стенка/полка) | Контролируемые параметры | Результаты расчета | Нормативное значение | Выводы (соответствует или нет СП20.13330.2016 [7] или СП16.13330.2017 [8]) |
|-------|---|---|--------------------|----------------------|--|
| 1 | -/4 | Перемещения горизонтальные, мм/вертикальные, мм | 16,3/34,2 | 23,3/48 | да, [7] |
| | | Напряжения смятия в полке балки, МПа | 311,7 | 475 | да, [8] |
| | | Напряжения смятия в накладке полки балки в месте соединения болтом, МПа | 344,3 | 475 | да, [8] |
| | | Напряжения смятия в опорном фланце балки, МПа | 345,7 | 449 | да, [8] |
| | | Напряжения смятия в полке колонны в месте соединения болтом, МПа | 353,6 | 475 | да, [8] |
| | | Максимальные напряжения в болтах, МПа | 735,3 | 775 | да, [8] |
| 2 | -/6 | Перемещения горизонтальные, мм/вертикальные, мм | 23,1/41,8 | 23,3/48 | да, [7] |
| | | Напряжения смятия в полке балки, МПа | 467,4 | 475 | да, [8] |
| | | Напряжения смятия в накладке полки балки в месте соединения болтом, МПа | 491,7 | 475 | нет, [8] |
| | | Напряжения смятия в опорном фланце балки, МПа | 474,5 | 449 | нет, [8] |
| | | Напряжения смятия в полке колонны в месте соединения болтом, МПа | 471,4 | 475 | да, [8] |
| | | Максимальные напряжения в болтах, МПа | 911,3 | 775 | нет, [8] |

Выводы:

1. Анализ напряженно-деформируемого состояния исследуемого здания показал, что ошибки изготовления прокладок и незатянутые болты во фланцевом соединении в количестве 1–2 не привели к ограниченно-работоспособному или аварийному состоянию стального каркаса. Все контролируемые параметры соответствуют нормативным требованиям.

2. Напряженно-деформируемое состояние узла, где прокладки не доведены до опорных столиков и 4 или менее болтов в полке не имеют контролируемого натяжения, отвечает требованиям работоспособности.

3. Напряженно-деформируемое состояние узла, где прокладки не доведены до опорных столиков и более 4 болтов в полке не имеют контролируемого натяжения, не отвечает требованиям работоспособности.

4. Приведенные выше выводы соответствуют исследуемому зданию. Для других зданий эти выводы могут быть несправедливы. Оценка работоспособности оценивается для каждого конкретного здания и будет индивидуальной.

Литература

1. Конин, Д. В. Статистическая оценка неточностей монтажа колонн металлических каркасов высотных зданий / Д. В. Конин // Строительная механика и расчет сооружений. – 2010. – № 6 (233). – С. 12–19.

2. Хамати, Ю. Учет влияния случайного распределения начальных несовершенств на расчетную схему многоэтажного здания со стальным каркасом / Ю. Хамати // Дни студенческой науки : сборник докладов научно-технической конференции по итогам научно-исследовательских работ студентов Института строи-

тельства и архитектуры (ИСА) НИУ МГСУ. – 2022. – С. 620–622.

3. Беляева, С. Ю. Исследование несущей способности элементов стальной рамы переменного сечения при ошибках сборки и монтажа / Беляева С. Ю., Кузнецов Д. Н., Ковылина И. А. // Воронежский государственный архитектурно-строительный университет: Современное строительство и архитектура. – 2016. – № 1 (01). – С. 22–27.

4. СП 70.13330.2012. Свод правил. Несущие и ограждающие конструкции: актуализированная редакция СНиП 3.03.01-87 : утвержден Приказом Госстроя от 25 декабря 2012 г. № 109/ГС (редакция от 30.12.2020) : введен 01.07.2013. – Москва : Минстрой России. – Дата сохранения: 24.02.2022. – 230 с.

5. Рекомендации по сборке фланцевых монтажных соединений стальных строительных конструкций / ВНИПИ «Промстальконструкция», ЦНИИпроект-стальконструкция имени Н. П. Мельникова. – Москва : ЦБНТИ Минмонтажспецстроя СССР, 1986. – 12 с.

6. ОСТ 36-72-82. Отраслевой стандарт. Конструкции строительные стальные. Монтажные соединения на высокопрочных болтах. Типовой технологический процесс. – Москва : Информационное научно-производственное агентство, 2003. – 27 с.

7. СП 20.13330.2016. Свод правил. Нагрузки и воздействия: актуализированная ред. СНиП 2.01.07-85* : утвержден 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.

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

I.S. Kazakova
Vologda State University

**STUDY OF STRESS-STRAIN STATE OF STEEL FRAMES
TAKING INTO ACCOUNT MANUFACTURING AND INSTALLATION ERRORS**

The article presents the results of a study of the stress-strain state of rigid assemblies of steel frames on bolts with controlled tension, taking into account errors during manufacture and installation. The controlled parameters during the operation of a flange assembly with errors in its manufacture and installation are considered. The number of bolts without controlled tension, at which the structure will not meet regulatory requirements, has been set.

Steel frames, flange assembly, manufacturing and installation errors, bolts with controlled tension.