

DOI 10.15593/2409-5125/2017.01.15

УДК 624.078.4

И.И. Зуева

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СТРУКТУРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С СОЕДИНЕНИЯМИ НА БОЛТАХ НОРМАЛЬНОЙ ТОЧНОСТИ

В практике строительства широкое распространение получили пространственные стержневые металлические конструкции, одним из видов которых являются структурные плиты. При проектировании пространственных конструкций важное значение имеют вопросы учета деформативности, неточности изготовления элементов и сборки сооружения. Поэтому в последнее время для повышения надежности и долговечности таких систем обращается серьезное внимание на исследование напряженно-деформированного состояния на всех стадиях работы конструкции и рекомендуется расчет таких систем выполнять с учетом физической, геометрической и генетической нелинейности. Существенным фактором, влияющим на действительное напряженно-деформированное состояние структурных покрытий, является повышенная деформативность ряда узловых соединений.

В статье рассматривается структурная стержневая плита типа «ЦНИИСК», собираемая из прокатных профилей с соединениями на болтах нормальной точности. Показано, что величина податливости болтового соединения с применением болтов нормальной точности зависит от количества болтов и вида соединения. Исследуется напряженно-деформированное состояние системы с учетом возможной податливости болтовых соединений при разнице между диаметрами отверстий и болтов 3 и 1,5 мм на примере структурного блока размером 24 × 12 м. Проведенное исследование показало, что деформативность болтовых соединений приводит к появлению остаточных прогибов после снятия нагрузки и остаточных напряжений в элементах, повышению деформативности системы, перераспределению внутренних усилий, которое происходит крайне неравномерно, причем в некоторых элементах может измениться знак усилия. Теоретические значения прогибов соответствуют экспериментальным, полученным при испытании натурного структурного блока. Количественная оценка показывает, что при расчете структурных, а также пространственных стержневых систем должна быть учтена возможная податливость узловых соединений с целью приближения расчетной модели к действительной работе системы.

Ключевые слова: структурные конструкции, болты нормальной точности, несущая способность, деформативность соединений, перераспределение усилий, прогибы.

Зуева И.И. Исследование напряженно-деформированного состояния структурных конструкций с соединениями на болтах нормальной точности // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. – 2017. – № 1. – С. 170–183. DOI: 10.15593/2409-5125/2017.01.15

Zueva I.I. Research stress-strain state structural design with the compound bolted normal accuracy. PNRPU. Applied ecology. Urban development. 2017. No. 1. Pp. 170-183. DOI: 10.15593/2409-5125/2017.01.15

В практике строительства широкое распространение получили пространственные металлические конструкции. При проектировании пространственных конструкций важное значение приобретают вопросы учета деформативности, температурных воздействий, неточности изготовления элементов и сборки сооружения. Многие авторы [1–7] рекомендуют расчет таких конструкций выполнять с учетом физической, геометрической и генетической нелинейности, так как точность проектирования, изготовления и возведения пространственных покрытий влияет на их надежность и долговечность.

Одним из видов пространственных конструкций является структурная стержневая плита типа «ЦНИИСК», собираемая из прокатных профилей [8]. Верхние продольные пояса в этой системе выполняются из двутавров, а нижние пояса и раскосы – из одиночных уголков. В отличие от ранее применявшихся довольно сложных узловых сопряжений в структурах типа «ЦНИИСК» раскосы крепятся к поясам непосредственно по одной полке при помощи болтов нормальной точности. Ввиду относительной простоты изготовления, невысокой стоимости и использования недефицитных прокатных элементов эта конструкция получила применение в промышленном строительстве.

Несмотря на определенные недостатки, соединения на болтах нормальной точности обладают рядом существенных преимуществ: малая трудоемкость; не требуется специальное дорогостоящее оборудование; надежность соединения не зависит от качества обработки поверхностей сопрягаемых элементов; соединение может выполняться рабочими невысокой квалификации; контроль качества его выполнения чрезвычайно прост. В соединениях на болтах нормальной точности разница в диаметрах болта и отверстия значительно облегчает постановку болтов и упрощает образование соединений. Это серьезное преимущество таких болтов, однако неплотная посадка болта в отверстие повышает деформативность системы и ухудшает его работу на сдвигающие силы. Усилие натяжения болта в этих соединениях не контролируется, но чрезмерная перетяжка болтов не допускается, так как ведет к развитию пластических деформаций и расстройству соединения.

Одним из вопросов, возникающих при проектировании пространственных конструкций с соединениями на болтах, является определение влияния деформативности болтовых соединений на напряженно-деформированное состояние конструкций, так как эти системы являются многократно статически неопределимыми. Влияние податливости узловых соединений на работу структурных конструкций изучали многие ученые из разных стран [9–13]. В работе [9] приводится краткий обзор существующих методик учета податливости узлов металлических конструк-

ций. Сравнение численных и экспериментальных исследований [13] позволило учесть податливость узловых фасонок при реальном проектировании структурных покрытий «ИНЕКО».

В отделении прочности и новых форм металлических конструкций ЦНИИСК им. Кучеренко В.М. Горпинченко и Е.Р. Мацелинским проведена серия испытаний по выявлению несущей способности и деформативности соединений на болтах нормальной точности [14]. Испытания проведены для одно-, двух-, трех- и пятиболтовых соединений, при этом везде диаметр отверстия превышал диаметр болта на 1,5 мм. Проведенные испытания показали, что вследствие обжатия кромок диаметр отверстия в направлении приложения усилий увеличился в среднем на 0,15–0,25 мм. Таким образом, с учетом отрицательного допуска на величину диаметра тела болта разница между последним и диаметром отверстия составила 1,7–1,9 мм. Болты испытывались на срез, разрыв, а также специально исследовалось влияние «черноты», т.е. несоосности отверстий в соединяемых элементах многоболтового соединения; рассматривался вариант устройства болтовых соединений при недостаточных длинах болтов, резьба которых может зайти в пакет. На основании проведенных экспериментальных исследований была установлена возможная деформативность болтовых соединений в зависимости от действующего усилия в элементах, вида соединения и количества болтов.

Одним из факторов, определяющих величину податливости болтового соединения, является вид соединения и количество болтов. Рассмотрим несколько возможных случаев постановки болтов в отверстия.

1. Болт расположен в центре отверстия, возможный сдвиг болтового соединения $\delta_{\text{л}} = d_{\text{отв}} - d_{\text{б}}$ (рис. 1, а);

2. Несоосность отверстий равна $\delta_{\text{л}} / 2$ (рис. 1, б), возможный сдвиг болтового соединения $\delta_{\text{л}} / 2 = (d_{\text{отв}} - d_{\text{б}}) / 2$;

3. Несоосность отверстий равна $2\delta_{\text{л}}$, возможный сдвиг болтового соединения $2\delta_{\text{л}} = 2(d_{\text{отв}} - d_{\text{б}})$ (рис. 1, в) или $\delta_{\text{л}} = 0$.

Все варианты постановки болтов относятся к односрезному одноболтовому соединению. В двух- и многоболтовом односрезном, а также в двухсрезном соединениях картина расположения болтов более сложная, поэтому в теоретических расчетах учесть действительную проработку люфтов затруднительно. Так, например, после испытания структурного блока в г. Воскресенске [15] несколько болтов были сняты, замерены диаметры отверстий и болтов. На основании осмотра установлено, что в каждом из многоболтовых соединений несоосность различна (рис. 2), что вы-

зывает определенные трудности в установлении величины податливости болтового соединения. Кроме того, силы трения, возникающие между соединяемыми элементами, как уже отмечалось, не могут быть получены расчетом, а часть люфтов прорабатывается еще при монтаже структурного блока от собственного веса конструкции.

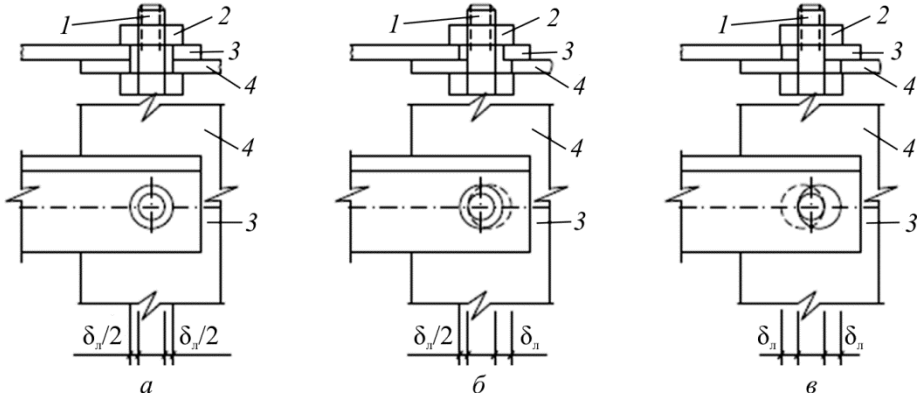


Рис. 1. Возможные случаи постановки болтов в отверстия:
 1 – болт; 2 – гайка; 3 – уголок (раскос или поперечный элемент верхнего или нижнего поясов); 4 – фанонка

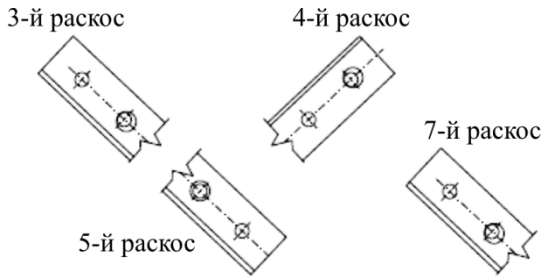


Рис. 2. Результаты обследования соединений после испытания структурного блока

При испытании опытных отсеков опор ЛЭП [16] установлено, что трение в узлах преодолевается при усилии порядка 10 кН ($d = 16$ мм – диаметр болта нормальной точности).

Значение податливости каждого болтового соединения определяется следующими составляющими:

$$\Delta l_{\text{ну}} = \delta_{\text{л}} + \delta_{\text{см.отв}} + \delta_{\text{ср.б}} + \delta_{\text{см.б}}$$

где $\delta_{\text{см.отв}}$, $\delta_{\text{ср.б}}$, $\delta_{\text{см.б}}$ – деформации смятия отверстия, среза болта, смятия болта.

Эти величины являются случайными функциями и зависят от действующего усилия в элементе, количества болтов, вида соединения. Их значения можно установить по данным, полученным на основании статистической обработки материалов экспериментальных исследований, проведенных в ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко [14].

Составляющая $\delta_{\text{п}}$ также является случайной величиной и функцией разности между диаметрами отверстий и болтов, количества болтов, вида соединения, действующего усилия. Случайная величина $\delta_{\text{п}}$ является непрерывной и определяется заданием интервала (a, \bar{b}) , содержащего возможное значение этой величины. Плотность вероятности $P_{(x)}$ случайной величины $\delta_{\text{п}}$ должна удовлетворять двум условиям:

$$P_{(x)} > 0 \quad \text{и} \quad \int_a^{\bar{b}} P_{(x)} \cdot d_x = 1,$$

а ее математическим ожиданием будет число

$$M_{\delta} = \int_a^{\bar{b}} P_{(x)} \cdot x \cdot d_x,$$

M_{δ} – это среднее значение величины $\delta_{\text{п}}$.

Для определения плотности вероятности $P_{(x)}$ случайной величины $\delta_{\text{п}}$ разных видов соединений (одно-, двух-, трехболтовых односрезных и двухсрезных) были рассмотрены случаи различной постановки болтов в отверстия. На основании проведенных исследований различных видов соединений получены возможные сдвиговые деформации [17].

Исследование влияния податливости соединений с применением болтов нормальной точности на напряженно-деформированное состояние рассмотрено на примере структурного блока типа «ЦНИИСК» размером 24×12 м. Были получены значения податливости для каждого раскоса и проведен расчет, в котором они являлись исходными данными.

Поскольку каждый раскос крепится к верхнему и нижнему поясам болтами (рис. 3), то общая податливость элемента определялась двумя соединениями, а величина $\Delta l_{\text{ну}}$ находилась для случая люфтов, равных 3 мм.

Усилия в структурном блоке от равномерно распределенной нагрузки по всей плоскости блока интенсивностью 2,2 кН/м² (для 1/4 блока) представлены на рис. 4, а без учета податливости болтового соединения; на рис. 4, б с учетом разницы между диаметрами отверстий и болтов в раскосах $\delta_{\text{п}} = 3$ мм.

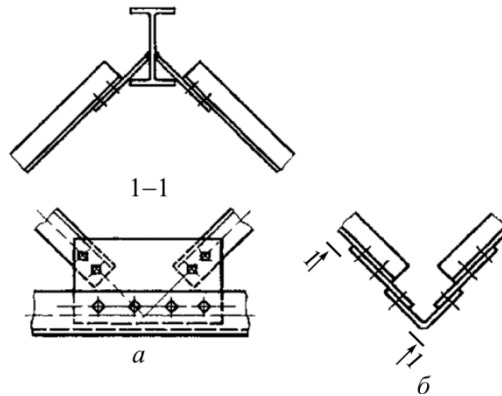


Рис. 3. Узлы структурной конструкции типа «ЦНИИСК»,
крепление раскосов: *а* – к верхнему поясу; *б* – к нижнему поясу

Сопоставляя значения усилий (см. рис. 4, *а*, *б*), можно проследить, что податливость болтовых соединений раскосов приводит к перераспределению усилий следующим образом. Верхний пояс: незначительное от 0,4 до 3,8 % увеличение или уменьшение усилий, в поперечном элементе верхнего пояса 12–22 усилие уменьшилось на 13,1 %. Более существенное изменение усилий происходит в раскосах: увеличение усилий от 2,1 до 18,3 %; уменьшение усилий от 2,4 до 16,7 %.

После снятия нагрузки в конструкции появляются остаточные усилия. При последующих загрузках структурного блока суммарные усилия в элементах достигают значений, предшествующих снятию нагрузки (см. рис. 4, *б*).

Поперечные элементы верхнего и нижнего поясов, за исключением торцевых, крепятся к продольным поясам одним болтом. В связи с этим был рассмотрен случай влияния податливости болтовых соединений этих элементов на напряженно-деформированное состояние структурной конструкции. Усилия в данном структурном блоке с учетом возможной податливости раскосов и поперечных элементов верхнего и нижнего поясов приведены на рис. 4, *в*.

Для оценки влияния податливости болтовых соединений в элементах верхнего пояса было проведено сопоставление трех вариантов податливости:

- 1) нулевая податливость болтовых соединений (см. рис. 4, *а*);
- 2) возможная податливость раскосов (см. рис. 4, *б*);
- 3) возможная податливость раскосов и поперечных элементов верхних и нижних поясов (см. рис. 4, *в*).

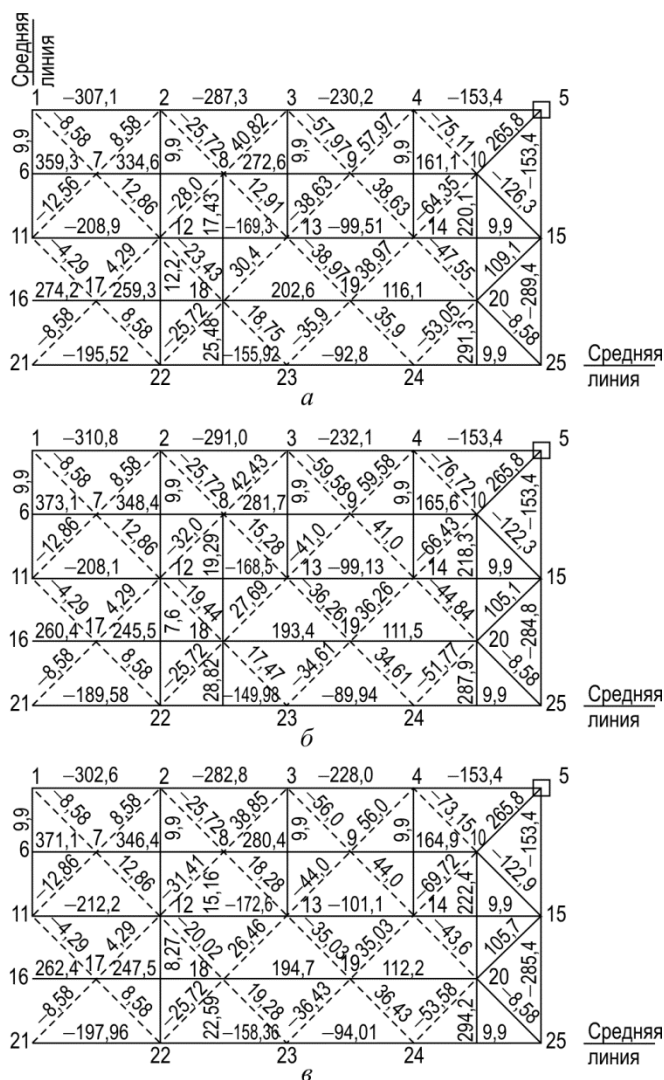


Рис. 4. Усилия (кН) в структурном блоке размером 24×12:
 а – без учета податливости соединений; б – с учетом податливости соединений раскосов (люфты 3 мм); в – с учетом податливости соединений в раскосах и поперечных элементах поясов; 1, 2, ..., 25 – номера узлов

На рис. 5 показаны пунктирной линией прогибы узлов верхнего пояса структурного блока с люфтами, равными 3 мм. Для сравнения сплошной линией нанесены прогибы без учета податливости раскосов. Как видно из сопоставления значений прогибов, заданная деформативность болтовых соединений раскосов приводит к увеличению прогибов по верхнему поясу на 26–39 %. По нижнему поясу прогибы увеличились на 23–35 %. Подоб-

ные деформации могут развиваться в конструкции не сразу, однако после многократных нагружений, что соответствует эксплуатации конструкций, прогиб в системе будет приближаться к расчетным значениям.



Рис. 5. Эпюры прогибов узлов нижнего пояса структурного блока размерами 24×12 м

После снятия нагрузки в конструкции появляются остаточные прогибы, вызванные податливостью болтовых соединений, и при последующих нагружениях блока в элементах развиваются только упругие деформации. Суммарный прогиб системы будет складываться из остаточного и упругого, найденного после проработки податливости болтовых соединений. Полученные значения деформативности конструкции дают возможность правильно назначить величину строительного подъема, позволяющего компенсировать повышенную деформативность соединений.

Прогибы узлов верхнего и нижнего поясов структурного блока, полученные при расчете по третьему варианту, практически не отличаются от второго варианта податливости. Таким образом, податливость верхних и нижних поперечных поясов не приводит к повышению вертикальных перемещений системы, однако вызывает перераспределение усилий в элементах структуры вследствие горизонтальных перемещений.

При сравнении усилий по третьему и второму вариантам получены следующие результаты:

- верхний пояс*: усилия увеличиваются (уменьшаются) на 1,7–5,6 %;
- нижний пояс*: усилия практически не изменяются;

раскосы оказались чувственными к деформативности узловых соединений поперечных элементов верхнего и нижнего поясов. Так, например, в элементе 3–8 усилие уменьшилось на 8,4 %, в то время как при учете податливости только раскосов усилие в раскосе изменилось на 4 %; в элементе 3–9 усилие уменьшилось на 6,1 %, а при втором варианте податливости – на 2,8 %; в элементе 8–13 усилие увеличилось на 19,8 %.

При сравнении первого и третьего вариантов установлено, что в элементах верхнего и нижнего поясов происходит незначительное изменение усилий. Сопоставление усилий первого и второго вариантов показывает, что в элементах 3–8, 3–9, 4–9, 4–10 усилия увеличиваются, в этих же стержнях податливость распорок приводит к уменьшению усилий соответственно стержням следующим образом: на 4,8; 3,4; 3,4; 2,6 %. В элементах 18–23, 19–23, 19–24, 20–24 усилия, наоборот, увеличились на 2,7; 1,5; 1,5; 1 %. Во всех остальных раскосах при сравнении первого и третьего, первого и второго вариантов изменение усилий произошло в одну сторону (или уменьшились от 2,7 до 14,6 % или увеличились от 1,7 до 13,9 %).

Поскольку сдвиги болтовых соединений в элементах структурного блока проходят крайне неравномерно, проведены исследования влияния податливости каждого из раскосов в отдельности на напряженно-деформированное состояние структуры. В результате установлено, что в отдельных элементах конструкции знаки усилий могут измениться, а в тех элементах, в которых происходит сдвиг, в момент сдвига усилия резко падают.

Таким образом, проведенный с использованием программного комплекса [18] анализ напряженно-деформированного состояния на примере структурного блока с соединениями на болтах (люфты 3 мм) при различных вариантах податливости показал, что деформативность болтовых соединений приводит к появлению остаточных прогибов после снятия нагрузки и остаточных напряжений в элементах, повышению деформативности системы, перераспределению внутренних усилий. Исследованием установлено, что перераспределение усилий происходит в конструкции крайне неравномерно: в одних элементах податливость болтовых соединений не вызывает изменения усилий, в других – незначительное, а в третьих изменение усилий может достигать 20–60 %, причем в некоторых из элементов может измениться знак усилия. Следовательно, при расчете конструкции с соединениями на болтах должна быть учтена возможная их податливость с целью приближения расчетной схемы к действительной работе системы.

В экспериментальном структурном блоке, испытанном на территории ЦНИИСК им. Кучеренко [15], разница между диаметрами отверстий и болтов составила 3 мм, и в приведенных выше расчетах учтена эта особенность. Указанная податливость способствовала значительным сдвиговым деформациям, нарушению стабильности в развитии внутренних усилий в отдельных элементах, а также значительному увеличению прогибов. Как уже отмечалось, податливость болтовых соединений при люфтах 3 мм приводит к увеличению прогибов системы на 25–39 %. Теоретические прогибы соответствуют экспериментальным.

В связи с этим рекомендовано разницу между диаметром отверстия и болта снизить до 1,5 мм, как это принято в опорах ЛЭП [16], т.е. отверстие под болт диаметром 20 мм делать не более 21,5 мм.

Полученные для такого варианта податливости усилия представлены на рис. 6. На рис. 5 штрихпунктирной линией показана эпюра прогибов узлов верхнего пояса для случая люфтов, равных 1,5 мм. При сопоставлении прогибов данного варианта податливости и полученных без податливости наблюдается увеличение значений прогибов на 14–25 % по верхнему поясу. Как видно на рис. 4, а и рис. 6, изменение усилий в поясах оказалось весьма незначительным от 1 до 4 %, в наиболее нагруженных раскосах от 2 до 5 %, в менее нагруженных – от 11 до 16 %.

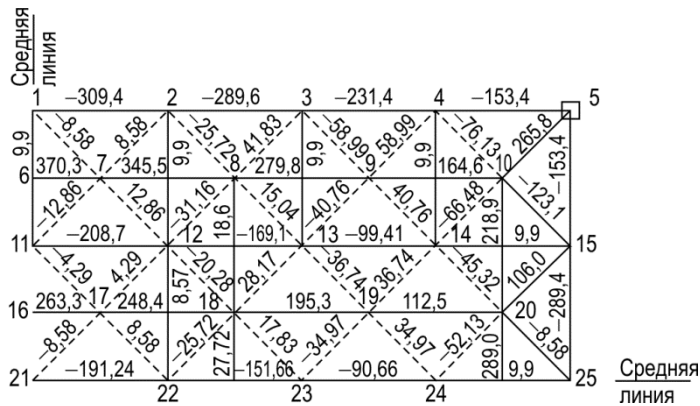


Рис. 6. Усилия (кН) в структурном блоке размерами 24×12: с учетом податливости соединений (люфты 1,5 мм); 1, 2, ..., 25 – номера узлов

Возможные отклонения в большую сторону в отдельных элементах структурного блока при различных зазорах (разницы между диаметрами отверстий и болтов) показаны в таблице.

Изменение усилий в элементах структурного блока

Номера стержней	Возможные изменение усилий, %, при люфтах, равных 3 мм	Возможное изменение усилий, %, при люфтах, равных 1,5 мм
8–13	Изменение знака	1,69
8–18	Изменение знака	1,56
12–22	Изменение знака	Изменение знака
3–8	1,13	1,06
3–9	1,09	1,04
8–12	1,25	1,19
18–27	1,46	1,26
9–13	1,23	1,09
9–14	1,23	1,09
10–14	1,14	1,05
6–7	1,07	1,05
18–23	1,17	–

Таким образом, проведенный анализ сопоставимо подтвердил необходимость изменения диаметра отверстия до 1,5 мм. Однако следует добавить, что хотя податливость болтовых соединений приводит к повышению деформативности системы, структурная конструкция обладает достаточной жесткостью и полученный прогиб с учетом заданной деформативности болтовых соединений меньше нормативной величины даже для случая люфтов, равных 3 мм.

Библиографический список

1. Югов А.М. Напряженно-деформированное состояние однопоясной стержневой металлической оболочки покрытия цилиндрической формы при наличии погрешностей изготовления и монтажа // Металлические конструкции. – 2013. – Т. 19, № 1. – С. 27–36.
2. Югов А.М., Бондарев А.Б. Численное статическое исследование возможных погрешностей возведения однопоясной металлической оболочки покрытия цилиндрической формы // Расчет и проектирование металлических конструкций: сб. докл. науч.-практ. конф. / под ред. А.Р. Туснина. – М.: Изд-во МГСУ, 2013. – С. 247–251.
3. Конин Д.В. Напряженно-деформированное состояние колонн высотных зданий с металлическим каркасом с учетом неточностей монтажа: автореф. дис. ... канд. техн. наук / ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. – М., 2011. – 24 с.
4. Методология экспериментально-теоретического исследования сборочных усилий в шарнирно-стержневой системе с использованием системы управления / В.Н. Васылев, А.Н. Миронов, А.М. Югов, А.Б. Бондарев // Металлические конструкции. – 2013. – Т. 19, № 4. – С. 215–223.
5. Лебедь Е.В., Григорян А.А. Начальные усилия в двухпоясных металлических куполах из-за погрешностей изготовления и монтажа их конструкций // Вестник МГСУ. – 2015. – № 4. – С. 69–79.
6. Дроган В.И., Шурин А.Б. Действительная работа металлической комбинированной структурной оболочки покрытия ледового катка по ул. Головацкого в г. Гомеле // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2012. – № 1. – С. 118–126.
7. Шурин А.Б. Напряженно-деформированное состояние большепролетного комбинированного покрытия из металлических арок и структурной плиты: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Брест. гос. техн. ун-т. – Брест, 2011. – 23 с.

8. Зуева И.И. Структурные конструкции из прокатных профилей на болтах нормальной точности // Теоретические и экспериментальные исследования по строительным конструкциям: тр. ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. – М., 1976. – С. 104–111.
9. Ананьин М.Ю., Фомин Н.И. Метод учета податливости в узлах металлических конструкций зданий // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. – 2010. – № 2. – С. 69–71.
10. Должников В.Н. Влияние податливости болтовых соединений на работу вспомогательных опор для строительства мостов. Обзор // Международный журнал экспериментального образования. – 2016. – № 11-2. – С. 243–248.
11. Статические испытания узлового соединения структурного покрытия “ИНЕКО” / В.Н. Васильев, В.Ф. Мушанов, А.М. Алехин, А.Н. Миронов, А.В. Безушко // Металлические конструкции. – 2016. – Т. 22, № 3. – С. 157–170.
12. Анализ существующих узлов сопряжения пространственных конструкций и разработка сборно-разборного узлового элемента / И.С. Инжутов, П.А. Дмитриев, С.В. Деордиев, В.В. Захарюта // Вестник МГСУ. – 2013. – № 3. – С. 61–71.
13. Дроган В.И., Шурин А.Б. Податливость стержневых систем с узловыми соединениями на пространственных листовых фасонках // Промышленное и гражданское строительство. – 2015. – № 7. – С. 37–43.
14. Мацелинский Е.Р. О возможности применения в несущих строительных металлоконструкциях болтов нормальной точности, изготовленных методом холодной высадки // Теоретические и экспериментальные исследования по строительным конструкциям: тр. ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. – М., 1976. – С. 148–152.
15. Структурные конструкции из прокатных профилей / В.И. Трофимов, Ю.С. Мкрчанц, Э.В. Третьякова [и др.] // Промышленное строительство. – 1974. – № 8. – С. 6–12.
16. Трофимов В.И. Исследование и расчет новых типов металлических опор линий электропередачи. – М.: Энергия, 1968. – 423 с.
17. Снигирева В.Н., Лебедева И.А., Зуева И.И. Возможные сдвиговые деформации в соединениях на болтах нормальной точности // Строительство и архитектура. Опыт и современные технологии: электронный интернет-журнал. – 2015. – Вып. 5. – URL: <http://sbomikstf.pstu.ru/council/?n=5&S=281>
18. Зуева И.И., Зуев В.В. Влияние податливости болтового соединения на напряженно-деформированное состояние структурных конструкций // Вестник Пермского государственного технического университета. Строительство и архитектура. – 2010. – № 1. – С. 40–46.

References

1. Yugov A.M. Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie odnopoyasnoy sterzhnevoy metallicheskoj obolochki pokrytiya cilindricheskoy formy pri nalichii pogreshnostey izgotovleniya i montazha [Stress-strain state odnopoyasnoy core metal shell covering the cylindrical form in the presence of errors in manufacture and installation]. *Metal constructions*, 2013, vol. 19, no. 1, pp. 27-36.
2. Yugov A.M., Bondarev A.B. Chislennoe staticheskoe issledovanie vozmozhnykh pogreshnostey vozvedeniya odnopoyasnoy metallicheskoj obolochki pokrytiya cilindricheskoy formy [Numerical investigation of possible errors static construction odnopoyasnoy metal shell covering the cylindrical shape]. *Nauchno-prakticheskoy konferencii, posvyashchennoy 100-letiyu so dnya rozhdeniya professor E.I. Belenya "Raschet i projektirovanie metallicheskih konstrukcij", 25 marta 2013 goda, g. Moskva*. Ed. A.R. Tushnina. Moscow, 2013, pp. 247-251.
3. Konin D.V. Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie kolonn vysotnykh zdaniy s metallicheskim karkasom s uchetom netochnostey montazha [The stress-strain state of the columns of high-rise buildings with metal frames, taking into account the inaccuracies of installation]. Abstract of Ph. D. thesis. Moscow, 2011, 24 p.
4. Vasylev V.N., Mironov A.N., Yugov A.M., Bondarev A.B. Metodologiya eksperimentalno-teoreticheskogo issledovaniya sborochnykh usilij v sharnirno-sterzhnevoy sisteme s ispolzovaniem sistemy upravleniya [The methodology of experimental and theoretical research efforts in the assembly hinge-core system with use a control system]. *Metal constructions*, 2013, vol. 19, no. 4, pp. 215-223.

5. Lebed E.V., Grigoryan A.A. Nachalnye usiliya v dvukhpoyasnykh metallicheskiykh kupolakh iz-za pogreshnostey izgotovleniya i montazha ikh konstrukciy [Initial efforts in dvuhpolnyh metal domes due to the errors of manufacturing and assembling their designs]. *Bulletin MGSU*, 2015, no. 4, pp. 69-79.

6. Droган V.I., Shurin A.B. Deystvitelnaya rabota metallicheskoj kombinirovannoy strukturnoy obolochki pokrytiya ledovogo katka po ul. Golovaczskogo v g. Gomele [The actual metal work combined structural shell covering the ice rink at golovatskogo street in Gomel]. *BRU Bulletin*, 2012, no. 1, pp. 118-126.

7. Shurin A.B. Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie bolsheproletnogo kombinirovannogo pokrytiya iz metallicheskiykh arok i strukturnoy plity [The stress-strain state of long-span combined coating of metal arches and structural plate]. Abstract of Ph. D. thesis. Brest, 2011, 23 p.

8. Zueva I.I. Strukturnye konstrukcii iz prokatnykh profiley na boltakh normalnoy tochnosti [Structural design of rolled sections for bolts of normal accuracy]. *Teoreticheskie i eksperimentalnye issledovaniya po stroitelnykh konstrukciyam. Materialy koyferentsii*, Moscow, Central research Institute of building constructions, 1976, pp. 104-111.

9. Ananin M.Yu., Fomin N.I. Metod ucheta podatlivosti v uzлах metallicheskiykh konstrukciy zdaniy [Method of analysis of yield in units of metal structures of buildings]. *Akademicheskij vestnik UralNIiproekt RAASN*, 2010, no. 2, pp. 69-71.

10. Dolzhnikov V.N. Vliyanie podatlivosti boltovykh soedineniy na rabotu vspomogatelnykh opor dlya stroitelstva mostov. Obzor [Effect give bolted connections to the work of the subsidiarysupport for the construction of bridges. Overview]. *International journal of experimental education*, 2016, no. 11-2, pp. 243-248.

11. Vasylev V.N., Mushchanov V.F., Alekhin A.M., Mironov A.N., Bezushko A.V. Statische ispytaniya uzlovogo soedineniya strukturnogo pokrytiya "INEKO" [Static testing of the joints of the structural coating at "INEKO"]. *Metal constructions*, 2016, vol. 22, no. 3, pp. 157-170.

12. Inzhutov I.S., Dmitriev P.A., Deordiev S.V., Zakharyuta V.V. Analiz sushchestvuyushchikh uzlov sopryazheniya prostranstvennykh konstrukciy i razrabotka sborno-razbornogo uzlovogo elementa [Analysis of available space structure joints and the design of demountable modular joints]. *Bulletin MGSU*, 2013, no. 3, pp. 61-71.

13. Droган V.I., Shurin A.B. Podatlivost stержnevnykh sistem s uzlovymi soedineniyami na prostranstvennykh listovykh fasonkakh [Ductility of rod systems with nodal connections on dimensional leaf corner plates sheet luminaire]. *Industrial and civil construction*, 2015, no. 7, pp. 37-43.

14. Macelinskiy E.R. O vozmozhnosti primeneniya v nesushchikh stroitelnykh metallokonstrukciyakh boltov normalnoy tochnosti, izgotovlennykh metodom kholodnoy vysadki [On the possibility of applying to bearing structural steel bolts of normal accuracy, made by cold heading]. *Teoreticheskie i eksperimentalnye issledovaniya po stroitelnykh konstrukciyam. Materialy koyferentsii*, Moscow, Central research Institute of building constructions, 1976, pp. 148-152.

15. Trofimov V.I., Mkrchancz Yu.S., Tretyakova E.V. et al. Strukturnye konstrukcii iz prokatnykh profiley [Structural design of rolled sections]. *Industrial and civil construction*, 1974, no. 8, pp. 6-12.

16. Trofimov V.I. Issledovanie i raschet novykh tipov metallicheskiykh opor liniy elektropere-dachi. [The study and calculation of new types of metal lines of the electro transmission.]. Moscow, Energy, 1968, 423 p.

17. Snigireva V.N., Lebedeva I.A., Zueva I.I. Vozmozhnye sdvigovye deformacii v soedineniyakh na boltakh normalnoy tochnosti [Possible shear deformation in the joints on the bolts of normal accuracy]. *Sbornik no. 5, 2015. Po materialam VII Vserossiyskoy molodezhnoy konferencii aspirantov, molodykh uchenykh i studentov «Sovremennye tekhnologii v stroitelstve». Teoriya i praktika, (Chast II, 2015)*. URL: <http://sbornikstf.pstu.ru/council/?n=5&S=281>.

18. Zueva I.I., Zuev V.V. Vliyanie podatlivosti boltovogo soedineniya na napryazhenodeformirovannoe sostoyanie strukturnykh konstrukciy [The influence of flexibility of bolting on the stress-strain state of structural designs]. *PGTU Construction and architecture Bulletin*, 2010, no. 1, pp. 40-46.

Получено 31.01.2017

I. Zueva

RESEARCH STRESS-STRAIN STATE STRUCTURAL DESIGN WITH THE COMPOUND BOLTED NORMAL ACCURACY

The practice of building widespread spatial rod metal structures, one of which is structural plate. When designing spatial structures increased the importance of the mainstreaming of deformation, inaccuracies of the manufacturing and Assembly facilities. Therefore, in recent years to improve the reliability and durability that such systems drawn serious attention to the study of stress-strain state at all stages of construction and it is recommended that the calculation of such systems to meet the physical, genetic and geometric nonlinearity. A significant factor influencing actual stress-strain state of structural coatings is increased deformability of a number of joints.

The article discusses the structural core plate of type "CNIISK", assembled from rolled sections with connections at the bolts of normal accuracy. It is shown that the compliance value of bolted connections using bolts of normal accuracy depends on the number of bolts and the link. Investigated the stress-strain state of the system, taking into account possible flexibility of bolted connections when the difference between the diameters of the holes and bolts 3 and 1.5 mm in the example of a block with dimensions of 24×12 m.

The study showed that the deformability of bolted connections leads to the appearance of residual deflections after removal of the load and the residual stresses in the elements, increase the deformability of the system, redistribution of internal stresses that occurs unequally, and some elements may change the sign of the stress. The theoretical values agree with the experimental deflections obtained by testing full-scale structural unit. Thus, the quantitative assessment shows that in the calculation of the structural and spatial rod systems should be considered a possible ductility of joints with the purpose of approximation of the estimated model to the actual system operation.

Keywords: structural design, bolts, normal accuracy, load carrying capacity, deformability compounds redistribution efforts deflections.

Зуева Ирина Ивановна (Пермь, Россия) – канд. техн. наук, доцент кафедры «Строительные конструкции и вычислительная механика», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: skstf@pstu.ru).

Zueva Irina (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Building construction and computational mechanics, Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolsky av., 29, e-mail: skstf@pstu.ru).