

НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ФРИКЦИОННОГО СТЫКА ПОЯСА СТРОПИЛЬНОЙ ФЕРМЫ С ДЕФЕКТАМИ МОНТАЖА

В.Ф. Сабуров¹, Н.Б. Козьмин¹, Д.А. Коржук^{1,2}

¹ Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

² ООО «ПроектСервис», г. Челябинск, Россия

Монтажные стыки конструкций с использованием высокопрочных болтов широко используются в практике строительства. В статье на примере реального строительного объекта анализируется несущая способность фрикционного монтажного соединения при разных толщинах соединяемых элементов. Приводятся результаты математического моделирования изгиба соединительных накладок, экспериментальные исследования образцов фрикционных соединений и испытания на ударную вязкость накладок, имеющих различную величину остаточной пластической деформации. Показано, что при закрытии зазора в 1,0 мм в зоне перегиба накладок напряжения в накладке превышают предел текучести стали. При закрытии допускового нормами зазора в 3,0 мм в зоне перегиба накладки возникает условный шарнир пластичности.

Ключевые слова: монтажный стык, несущая способность, высокопрочные болты, фрикционное соединение, дефект стыка, математическое моделирование, ударная вязкость.

В современной практике строительства монтажные стыки поясов стропильных ферм выполняются, как правило, на высокопрочных болтах. Нормативные документы [1] предъявляют особые требования к таким стыкам, а именно, разность толщин соединяемых элементов не должна превышать 3 мм, зазоры более 3 мм должны быть устранены дополнительными прокладками (п. 4.6.3 СП [1]), щуп толщиной 0,3 мм не должен проникать в зазоры между деталями соединения (п. 4.33 СП [1]).

Обследованные стропильные фермы однопролетного производственного здания пролетом 36 м поставляются на монтаж тремя опорными

марками – две опорные и одна средняя. Сечение стержней фермы – тавр из 2 уголков, толщина фасонки – 20 мм. Пояса выполнены из стали 09Г2-6 по ГОСТ 19281-89, решетка – из стали Ст. 3пс по ГОСТ 380-94.

Нижний пояс фермы опорной отправочной марки состоит из уголков сечением 200×12 мм, а средний – из уголков 200×16 мм. Монтажный стык пояса выполнен на листовых накладках из стали 09Г2С-12: вертикальных полок толщиной 10 мм, а горизонтальных – 14 мм с использованием высокопрочных болтов диаметром 24 мм из стали 40Х, обработка поверхностей контакта – металлическими щетками без консервации (рис. 1). Из рис. 1

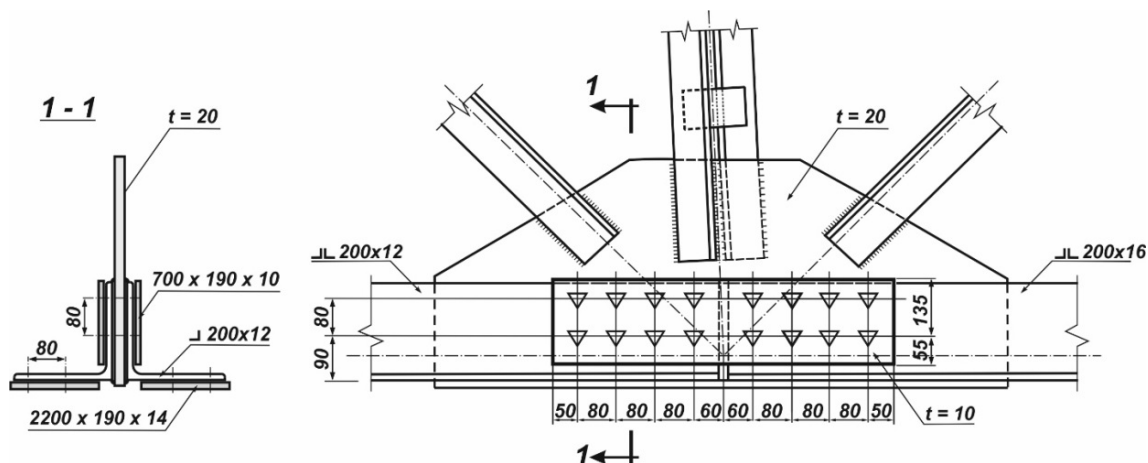


Рис. 1. Конструктивное решение монтажного узла

Строительные конструкции, здания и сооружения

видно, что в стыке вертикальных полок образуется зазор 4 мм с каждой стороны между фасонкой и накладками. При укрупнительной сборке ферм в монтажных стыках нижнего пояса дополнительные (выравнивающие) прокладки на вертикальную полку уголка поставлены не были, как того требуют нормы [1], и в таком виде фермы установлены в проектное положение.

Затяжка болтов контролируемым усилием в 270 кН приводит к деформации накладок (рис. 2, а), и при этом в зоне первого болта не достигается плотное касание соприкасающихся поверхностей накладки и уголка – шуп толщиной 0,3 мм входит на глубину 60–80 мм (рис. 2, б).

Для оценки напряженно-деформированного состояния накладки в зоне перегиба выполнено математическое моделирование с использованием программного комплекса Liga 9.4 [2, 3]. Моделирование выполнялось объемным конечным элементом размером 2,0×2,0 мм при толщине соединительной накладки 10 мм.

При закрытии зазора в 4 мм накладка шириной 190 мм изгибается на длине $l_n = 80$ мм, т. е. при монтаже имеет место деформационное нагружение пластины. При этом пластина опирается на угол выступающей части поясного уголка. При нагружении свободного края пластины перемещением в зоне перегиба возникает сложное напряженное состояние, которое характеризуется

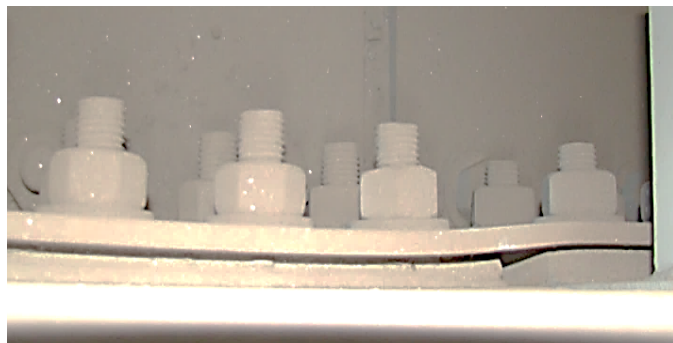
напряжениями σ_x , σ_y и σ_z (см. таблицу). В таблице напряжения в числителе соответствуют растянутой зоне, в знаменателе – сжатой зоне.

Напряжение σ_z изменяется от максимума на нижней грани пластины практически до нуля на верхней, т. е. в растянутой зоне накладки возникает плоское напряженное состояние. На рис. 3 приведены изополюсы главных напряжений в зоне перегиба накладки.

Моделирование показало, что напряжения в зоне перегиба при закрытии зазора в 4 мм изменяются в диапазоне 180–200 кН/см² (см. таблицу), что более чем в 4 раза превышает предел текучести материала накладки ($\sigma_T = 39$ кН/см² по данным сертификата). Следовательно, сталь накладок получает при сборке стыка значительный наклеп.

Моделирование позволило рассмотреть не только конкретный случай, но и исследовать влияние несовершенства стыка при других значениях толщин накладок (рис. 4) и длины перегиба l_n (рис. 5).

На рис. 4 приведена динамика увеличения осевых растягивающих напряжений в зоне перегиба в накладках разной толщины при длине перегиба $l_n = 80$ мм в зависимости от величины закрытия зазора от 0,5 до 4,0 мм. Из рис. 4 следует, что уже при компенсации разницы толщин в 1 мм напряжения в зоне перегиба достигают предела текучести стали 09Г2С.



а)



б)

Рис. 2. Дефект монтажного стыка пояса стропильной фермы:
а – искривление накладки; б – негерметичность стыка

Напряжения в накладке шириной 190 мм и толщиной 10 мм от перемещения свободного края при длине перегиба 80 мм

Таблица

Δt , мм	σ_x , кН/см ²	σ_y , кН/см ²	σ_z , кН/см ²	τ_{zx} , кН/см ²	σ_1 , кН/см ²	σ_2 , кН/см ²	σ_3 , кН/см ²	$\sigma_{эKB}$, кН/см ²
1	45,2	13,2	-1,1	-0,85	45,2	13,2	-1,1	45,2
	-49,6	-21,9	-23,3	10,9	-19,4	-21,9	-53,6	-19,4
2	90,4	26,4	-2,2	-1,7	90,4	26,4	-2,3	90,4
	-99,3	-43,9	-46,7	21,7	-38,8	-43,9	-107,1	-107,1
3	135,6	39,6	-3,4	-2,6	135,6	39,6	-3,4	135,6
	-149,0	-65,8	-70,0	32,6	-58,3	-65,8	-160,7	-3,4
4	181,0	52,8	-4,5	-3,4	180,9	52,8	-4,5	180,9
	-198,6	-87,7	-93,3	43,5	-77,7	-87,7	-214,2	-214,2

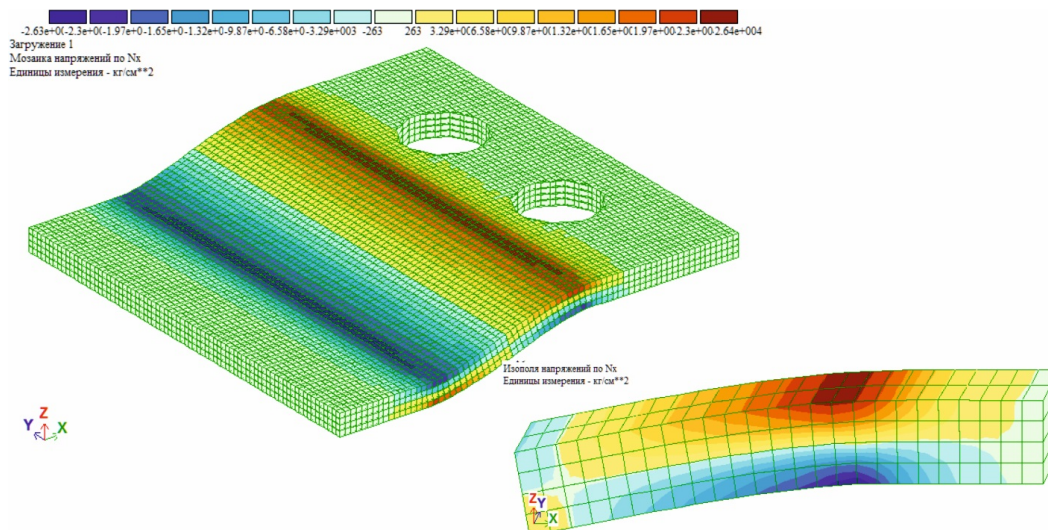


Рис. 3. Изополя главных напряжений σ_1 в соединительной накладке пояса фермы при вертикальном смещении 4 мм

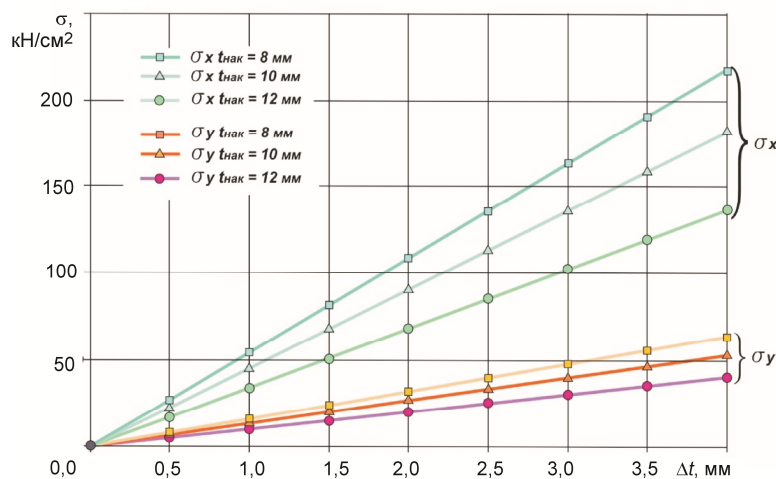


Рис. 4. Зависимость напряжений σ_x и σ_y в накладках от величины «ступеньки» Δt

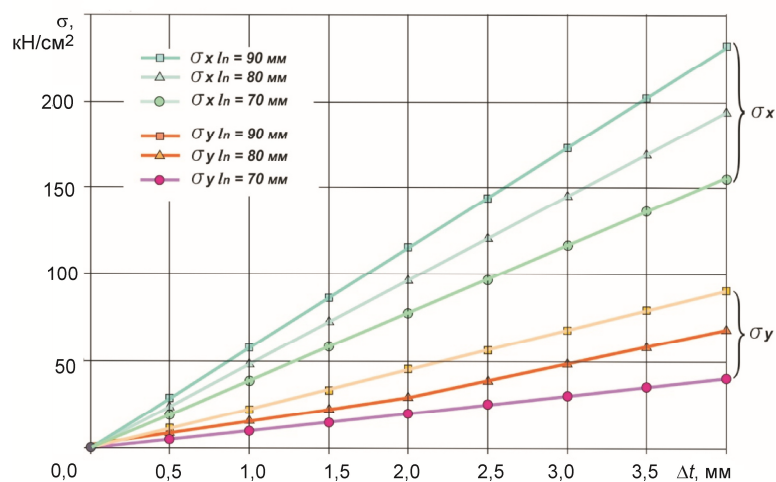


Рис. 5. Зависимость напряжений σ_x и σ_y в накладке $t = 10$ мм от величины «ступеньки» Δt и длины перегиба накладки l_n

Строительные конструкции, здания и сооружения

Изменение напряжений в накладке толщиной 10 мм в зависимости от длины перегиба показывают графики на рис. 5.

Перегиб накладки приводит к наклепу стали, что снижает пластические свойства металла и повышает потенциальную опасность хрупкого разрушения деформированной накладки в процессе эксплуатации ферм при отрицательных температурах. Для оценки температуры хрупко-вязкого перехода стали, подвергнутой пластической деформации, проведены испытания на ударную вязкость.

Ударная вязкость определялась на образцах типа 1 по ГОСТ 9454 при температурах +20 °С; 0 °С; -20 °С; -40 °С, так как эксплуатация стропильных ферм осуществляется в климатическом районе П₄, с температурным диапазоном отрицательных температур $-30 > t \geq -40$ [4].

Образцы изготовлены из заготовок стали 09Г2С-12 [5] толщиной 10 мм и имеющих различную степень наклепа: 1 – заготовки в состоянии поставки; 2 – заготовки с остаточной пластической деформацией $\epsilon_{ост} \approx 2\%$; 3 – $\epsilon_{ост} \approx 4\%$. При вытяжке заготовок фактически получены следующие значения остаточной пластической деформации: $\epsilon_{ост} = 1,74\%$ и $\epsilon_{ост} = 3,34\%$.

Испытания проводились на маятниковом копре ИТ542М (фирма Tinius Olsen) с максимальной энергией удара 542 Дж. По результатам испытания получены зависимости ударной вязкости K_{SU} от температуры испытания при различной величине наклепа (рис. 6).

Графики на рис. 6 показывают, что наклеп по-разному влияет на ударную вязкость стали 09Г2С. При $\epsilon_{ост} = 1,74\%$ значение ударной вязкости K_{SU+20} увеличилось почти на 30 % по сравнению с состоянием поставки, а при температурах -20 °С снизилось на 40 % и практически постоянна до -40 °С. Следовательно, значение температуры

вязко-хрупкого перехода при наклепе до 2,0 % сдвигается до -20 °С.

Остаточная пластическая деформация $\epsilon_{ост} = 3,3\%$ снижает ударную вязкость стали 09Г2С в диапазоне температур 0–20 °С на 11 % по сравнению с состоянием поставки, а при отрицательных температурах происходит снижение ударной вязкости на 14 %.

Используя результаты испытаний на ударную вязкость и рекомендации [6], вычислим критическую температуру хрупкости T_k для стали 09Г2С, подвергнутой пластическому деформированию. Испытания при положительных температурах показали, что 100 % образцов не разрушились, что свидетельствует о высоких пластических свойствах стали. При отрицательных температурах не разрушилось 50–60 % образцов. Используя контрольную диаграмму степени кристалличности излома [6], визуально определили степень волокнистости излома, которая $>50\%$. Поэтому принимаем критическую температуру хрупкости $T_k = T_{50}$, где T_{50} определяем по формуле

$$T_{50} = -41 + 0,63 HV - 65,8/d_{\text{ф}}^{0,5},$$

где HV=230 – твердость стали по Виккерсу при остаточной пластической деформации 3,3%; $d_{\text{ф}}$ – размер зерна феррита для ферритно-перлитных сталей. По данным [7, с. 17], для ферритно-перлитных сталей величина зерна перлита находится в пределах 0,5...0,005 мм. Принимая $d_{\text{ф}} = 0,05$ мм получим при данных параметрах $T_{50} = -84$ °С. Следовательно, при температуре эксплуатации $T_3 = -40$ °С хрупкого разрушения накладки, имеющей остаточную деформацию, не произойдет.

Образцы для испытания монтажного стыка выполнены с однорядным расположением болтов 2 типов (рис. 7): 1 тип – $\Delta t = 0$ и перегиб накладки отсутствует; 2 тип – в образцах имеется ступенька $\Delta t = 4$ мм.

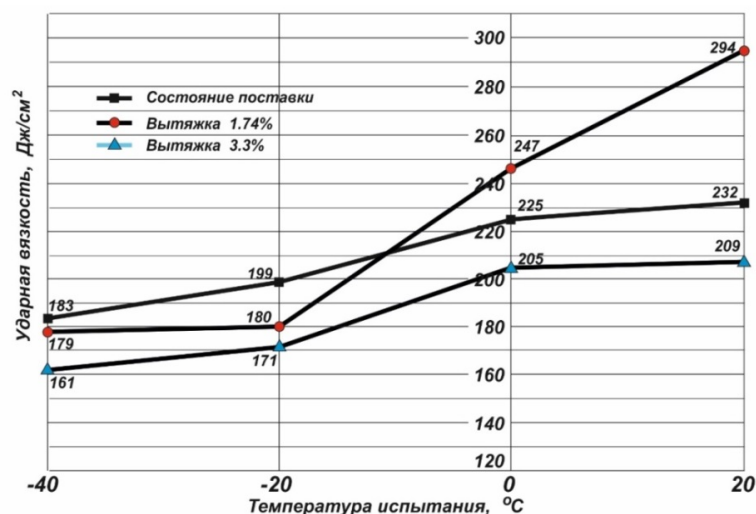


Рис. 6. Ударная вязкость стали 09Г2С-12 в зависимости от величины наклепа и температуры испытания

Расчетная несущая способность соединения, стянутого одним высокопрочным болтом М 24 при 2 поверхностях трения, обработанных металлическими щетками, равна 146,0 кН [8, 9].

Расчетная несущая способность образцов типа 1 составляет:

$$146 \times 4 = 584 \text{ кН} = 58,0 \text{ тс.}$$

Расчетное усилие натяжения высокопрочного болта $P = 271 \text{ кН}$ контролировалось динамометрическим ключом КМТ-120, протарированным на крутящий момент, равный: $M_{кр} = P \cdot k \cdot d = 271 \cdot 0,16 \cdot 0,024 = 1,04 \text{ кНм} = 104 \text{ кгс м}$, где $k = 0,16$ – коэффициент закручивания при удовлетворительном состоянии торцевой поверхности гаек (по данным сертификата качества болтов).

Контроль за взаимным перемещением пластин осуществляли двумя индикаторами часового типа с ценой деления 0,01 мм. Нагрузка прикладывалась ступенями по 5 тонн. Всего было испытано образцов типа 1 – 3 шт., типа 2 – 5 шт.

Результаты испытаний образцов типов 1 и 2 представлены на рис. 8, из которого следует, что фактическая средняя несущая способность образцов типа 1 равна 30,0 т, а образцов типа 2 – 20,0 т.

Теоретическая несущая способность фрикционного соединения образцов типа 2 на 4 болтах равна 584 кН, а при исключении из рассмотрения крайнего от оси стыка болта из-за неплотности контакта, т. е. при трех болтах, будет равна 438 кН. Разница составляет 146 кН (14,6 т). Это не соответствует экспериментальным данным несущей способности соединения, для которого $\Delta F = 30,0 - 20,0 = 10,0 \text{ т}$, что косвенно свидетельствует о том, что первый болт полностью не выключается из работы.

Разрушение образцов обоих типов произошло по отверстию первого от оси стыка болта практически при одинаковой нагрузке: тип 1 – 56–58 т; тип 2 – 55–58 т (рис. 9). Теоретическая несущая способность ослабленного сечения накладок по оси крайнего болта равна [8]:

$$N = A_c \cdot \sigma_{02},$$

где $A_c = 1,18 \text{ A}_n = 1,18 \cdot 10,6 = 12,5 \text{ см}^2$; $\sigma_{02} = 42,5 \text{ кН/см}^2$ – предел текучести стали по сертификату качества.

$$N = 12,5 \cdot 42,5 = 531 \text{ кН} = 53,0 \text{ тс.}$$

Таким образом, фактическая несущая способность соединения превышает теоретическую на 4,0–9,0 %.

Фактическая несущая способность фрикционных соединений образцов оказалась значительно

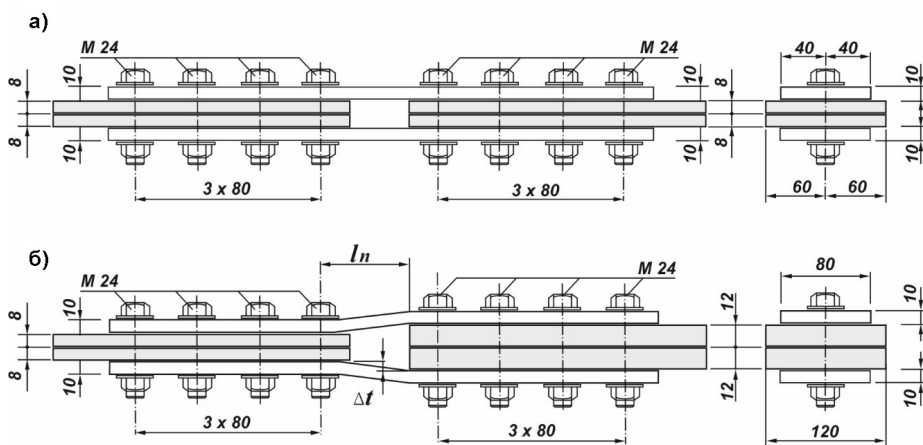


Рис. 7. Образцы для испытаний монтажного фрикционного стыка:
а – образец типа 1; б – образец типа 2

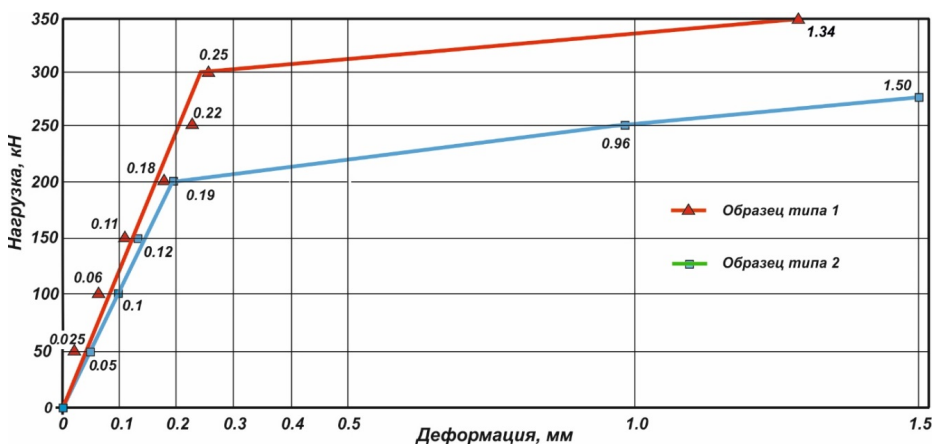


Рис. 8. График зависимости приращения перемещений от нагрузки

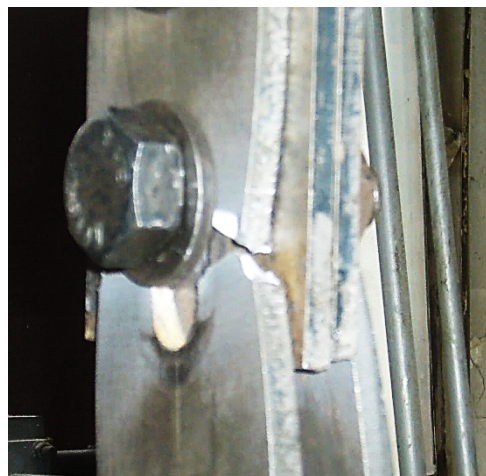
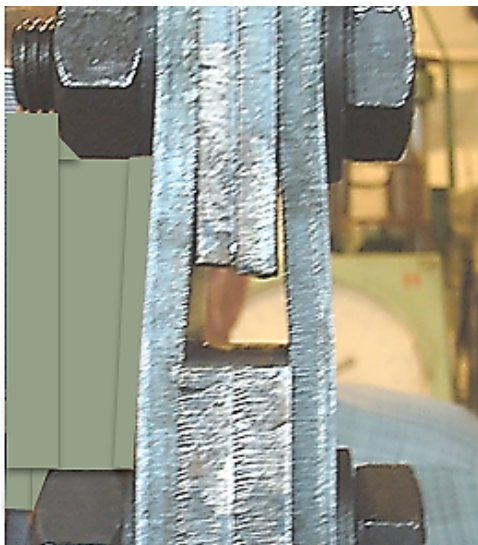


Рис. 9. Испытание образцов типа 2 и характер его разрушения

ниже теоретических значений (в 1,5–2,0 раза), что можно объяснить нестабильностью коэффициента трения при обработке металлическими щетками, что подтверждается исследованиями [10].

Выводы

1. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния стыковой накладки из стали 09Г2С показало, что при закрытии зазора в 1,0 мм, образованного разностью толщин соединяемых элементов, в зоне перегиба напряжения превышают предел текучести стали. При закрытии допускаемого нормами зазора в 3,0 мм в зоне перегиба накладки возникает шарнир пластичности.

2. Наличие остаточной пластической деформации в 2–4 % снижает ударную вязкость стали 09Г2С при отрицательных температурах на 11–14 %.

3. Допускаемый нормами единый норматив зазора в 3 мм между толщинами стыкуемых элементов в фрикционных соединениях необходимо дифференцировать в зависимости от ответственности конструкции и напряженного состояния стыковых накладок при деформационном закрытии зазора.

Литература

1. СП 70.13330.2012. Несущие и ограждающие конструкции. Актуализированная редакция СНиП 3.03.01-87. – М.: ОАО «ЦПП», 2012. – 170 с.

2. Перельмутер, А.В. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа / А.В. Перельмутер, В.И. Сливкер. – М.: Изд-во ДМК, 2007. – 592 с.

3. Городецкий, А.С. Компьютерные модели конструкций / А.С. Городецкий, И.Д. Евзеров. – Изд. 2-е, дополн. – Киев: Факт, 2007. – 394 с.

4. СП 131.13330.2012. Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99*. – М.: ОАО «ЦПП», 2012. – 109 с.

5. ГОСТ 19281–2014. Прокат повышенной прочности. Общие технические условия. – М.: Стандартинформ, 2016.

6. Горицкий, В.М. Диагностика металлов / В.М. Горицкий. – М.: Металлургиздат, 2004. – 408 с.

7. Гладштейн, Л.И. Высокопрочная строительная сталь / Л.И. Гладштейн, Д.А. Литвиненко. – М.: Металлургия, 1972. – 240 с.

8. Рекомендации по проектированию работающих на сдвиг болтовых соединений стальных строительных конструкций / ЦНИИПСК им. Мельникова, ВНИПИ Промстальконструкция. – М., 1990. – 26 с.

9. СП 16.13330.2011. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81*. – М.: ОАО «ЦПП», 2011. – 173 с.

10. Чесноков, А.С. Сдвигоустойчивые соединения на высокопрочных болтах / А.С. Чесноков, А.Ф. Княжев. – М.: Стройиздат, 1974. – 120 с.

Сабуров Валерий Федорович, доктор технических наук, профессор кафедры «Строительные конструкции и сооружения», Южно-Уральский государственный университет (Челябинск), saburov_skiis@mail.ru

Козьмин Николай Борисович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительные конструкции и сооружения», Южно-Уральский государственный университет (Челябинск), nikkoz@yandex.ru

Коржук Дмитрий Андреевич, технический директор ООО «ПроектСервис» (Челябинск), старший преподаватель кафедры «Строительные конструкции и сооружения», Южно-Уральский государственный университет (Челябинск), expert2074@yandex.ru

Поступила в редакцию 11 февраля 2019 г.

BEARING CAPACITY OF A FRICTION JOINT OF A TRUSS CHORD WITH CONSTRUCTION DEFECTS

V.F. Saburov¹, saburov_skiis@mail.ru

N.B. Kozmin¹, nikkoz@yandex.ru

D.A. Korzhuk^{1,2}, expert2074@yandex.ru

¹ South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

² Project Service LLC, Chelyabinsk, Russian Federation

Bolted joints of structures with high-strength bolts are widely used in construction. In the article, bearing capacity of a friction joint with various thicknesses of joint elements is analyzed by the example of a real construction object. Results of mathematical modeling of the bending of junction plates as well as results of experimental researches of samples of friction joints and test results for the impact elasticity of the plates with different values of residual plastic deformation are given. It is shown that when closing a gap equal 1,0 mm in the bending zone, stresses in the plate exceed the yield limit of steel. When closing the allowable gap equal 3,0 mm, there is a conditional plastic hinge appears in the bending zone.

Keywords: bolted joint, bearing capacity, high-strength bolts, friction joint, joint construction defect, mathematical modeling, impact elasticity.

References

1. SP 70.13330.2012. *Nesushchiye i ograždayushchiye konstruksii*. [Set of Rules 70.13330.2012. Load-Bearing and Separating Constructions]. Moscow, OAO «TSPP» Publ., 2012. 170 p.
2. Perel'muter A.V., Slivker V.I. *Raschetnyye modeli sooruzheniy i vozmozhnost' ikh analiza* [Design Models of Structures and the Possibility of their Analysis]. Moscow, DMK Publ., 2007. 592 p.
3. Gorodetskiy A.S., Evzerov I.D. *Komp'yuternyye modeli konstruksiy* [Virtual Models of Structures]. Kiyev, Fakt Publ., 2007. 394 p.
4. SP 131.13330.2012. *Stroitel'naya klimatologiya* [Set of Rules 131.13330.2012 Building Climatology]. Moscow, OAO «TSPP» Publ., 2012. 109 p.
5. GOST 19281–2014. *Prokat povyshennoy prochnosti. Obshchiye tekhnicheskiye usloviya* [State Standard 19281 – 2014. High Strength Rolled Steel. General Specification]. Moscow, Standartinform Publ., 2016.
6. Goritskiy V.M. *Diagnostika metallov* [Diagnostics of Metals]. Moscow, Metallurgizdat Publ., 2004. 408 p.
7. Gladshiteyn L.I., Litvinenko D.A. *Vysokoprochnaya stroitel'naya stal'* [High-Strength Construction Steel]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1972. 240 p.
8. *Rekomendatsii po proyektirovaniyu rabotayushchikh na sdvig boltovykh soyedineniy stal'nykh stroitel'nykh konstruksiy* [Recommendations for the Design of Bolted Joints of Steel Structures Using High-Strength Bolts]. Moscow, CNIIPSK im. Melnikova Publ., 1990. 26 p.
9. SP 16.13330.2011. *Stal'nyye konstruksii* [Set of Rules 16.13330.2011 Steel structures]. Moscow, OAO «TSPP» Publ., 2011. 173 p.
10. Chesnokov A.S., Knyazhev A.F. *Sdvigoustoychivyye soyedineniya na vysokoprochnykh boltakh* [Slip-Resistant Joints Using High-Strength Bolts]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1974. 120 p.

Received 11 February 2019

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Сабуров, В.Ф. Несущая способность фрикционного стыка пояса стропильной фермы с дефектами монтажа / В.Ф. Сабуров, Н.Б. Козьмин, Д.А. Коржук // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2019. Т. 19, № 2. – С. 29–35. DOI: 10.14529/build190205

FOR CITATION

Saburov V.F., Kozmin N.B., Korzhuk D.A. Bearing Capacity of a Friction Joint of a Truss Chord with Construction Defects. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*. 2019, vol. 19, no. 2, pp. 29–35. (in Russ.). DOI: 10.14529/build190205