DOI 10.15593/2409-5125/2019.01.10

УДК 624.014

М.П. Сон

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

ВЛИЯНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БОЛТОВ НА НДС И РАБОТУ ФЛАНЦЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ БАЛОК С КОЛОННАМИ

Для повышения надежности соединений необходимо применять методы проектирования, основанные на достоверных испытаниях. Фланцевые соединения балок с колоннами являются ответственными узлами, часто предопределяющими надежность всего сооружения. Разрыв болта может служить причиной выхода из строя как узла, так и всего сооружения. В ходе отдельных испытаний при помощи разработанного реверсора были получены диаграммы деформирования болтов класса прочности 8.8 сталей 40X и 20Г2Р и 10.9 стали 40X. Данные диаграммы могут служить основой для численного моделирования болтов в программных комплексах, а также ручного расчета их податливости. Приводятся результаты испытаний, ранее не проводившихся в России, а именно испытаний полномасштабных натурных моделей фланцевых соединений балок с колоннами. Испытания проводились до разрушения моделей, в их ходе измерялись и записывались нагрузки, перемещения, деформации и удлинения болтов. Показано влияние механических характеристик болтов на распределение деформаций в стенке колонны и на податливость всего соединения. На данный момент в России принято проектировать ответственные узлы на болтах из стали 40X с временным сопротивлением выше 1100 МПа. Испытания отдельных болтов и соединений на болтах из сталей 40X и 20Г2Р выявили следующие преимущества последних: большее относительное удлинение при разрыве, меньший разброс механических свойств. Также болты 8.8 из стали 20Г2Р показали временное сопротивление 960–970 МПа, что выше предъявляемого к этому классу, в связи с чем рекомендуется применение болтов из стали 20Г2Р в узлах и сооружениях любого уровня ответственности.

Ключевые слова: болт, фланцевые соединения, механические характеристики, натурные испытания, прочность.

Болтовые соединения балок с колоннами, резервуаров высокого давления и других конструкций являются ответственными узлами, часто предопределяющими надежность всего сооружения. Для повышения на-

---

Сон М.П. Влияние механических характеристик болтов на НДС и работу фланцевых соединений балок с колоннами // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. – 2019. – № 1. – С. 142–152. DOI: 10.15593/2409-5125/2019.01.09

Son M. Influence of mechanical characteristics of bolts on stress-strain state and behavior of flange connections of beams with columns. PNRPU. Applied ecology. Urban development. 2019. No. 1. Pp. 142-152. DOI: 10.15593/2409-5125/2019.01.09

дежности соединений данного типа необходимо применять методы проектирования и расчета, основанные на достоверных испытаниях [1].

На данный момент существует большое количество работ, посвященных исследованию механического поведения болтовых и фланцевых соединений, например исследование работы Т-образных фланцев [2, 3]. В статье [4] представлены варианты узлов болтовых соединений балок с колоннами. В работе [5] представлены результаты серии испытаний на полномасштабных образцах. Образец, состоящий из колонны и примыкающей к ней балки, нагружался изгибающим моментом, приложенным к балке, до разрушения соединения. При этом варьировался размер пластины и количество соединяющих болтов. Исследование [6] показало, что усиление фланца с помощью дополнительных ребер жесткости приводит к увеличению прочности, но одновременно к снижению деформативности соединения. Доля пластических деформаций в усиленном соединении снижается и, как следствие, снижается способность соединения рассеивать колебания, вызванные сейсмическими нагрузками. В экспериментально-теоретическом исследовании болтового стыка «колонна – колонна» [7] выполнено детальное математическое моделирование узла с учетом трехмерной геометрии колонн, фланцев и болтов. На фланцах задано контактное условие, реализующее сухое трение, учитывается преднапряжение болтов. Анализ конструкции, состоящей из большого количества балок, соединенных болтами, представлен в работе [8]. Моделируется поведение конструкции при исключении одного из болтов фланцевого соединения. Необходимо отметить, что метод конечных элементов является одним из основных методов моделирования, расчета и анализа работы соединений конструктивных элементов [9–11].

Большое количество работ направлено на изучение болтовых соединений, при этом упускается исследование самих болтов. Именно разрыв болта может служить причиной выхода из строя как узла, так и всего сооружения. При расчете болтовых соединений из механических характеристик болтов используют только их расчетное сопротивление, соответствующее классу прочности. В действительности болты одного класса прочности могут быть выполнены из стали разных марок, следовательно, отличаться по относительному удлинению при разрыве и разбросу механических характеристик.

Испытание болтов на растяжение. Каждый болт, следуя ГОСТ 52627–2006 «Болты, винты и шпильки. Механические свойства и методы испытаний», должен маркироваться обозначением класса прочности, который определяется согласно результатам испытаний болтов. Нами были

испытаны болты М24 разных сталей, партий и классов прочности. Испытания проводились с помощью разработанного реверсора [12, 13], устанавливаемого в гидравлический пресс. Технические характеристики прессы: точность по нагрузке – 16 кг, по деформациям – 0,003 мм, скорость нагружения 133 кН/мин. Получены диаграммы растяжения болтов (рис. 1).

Рис. 1. Диаграммы испытания болтов на растяжение: *а* – болты из стали 40Х; *б* – болты из стали 20Г2Р

Диаграммы 2–4 построены для болтов класса прочности 8.8 из стали 40Х. По результатам испытаний временное сопротивление болтов разрыву $R_{bun} = 950 \dots 1090$ МПа.

Диаграммы 5–11 построены для болтов класса прочности 10.9 из стали 40Х «селект». По результатам испытаний временное сопротивление болтов разрыву $R_{bun} = 1040 \dots 1200$ МПа, кроме болта 7, который воспринял максимальную нагрузку 238,5 кН ($\sigma = 676$ МПа) и показал кардинально отличную от остальных болтов диаграмму деформирования: данное изделие считается бракованным. Также болт 8 можно считать браком: несмотря на то, что он выдержал $R_{bun} = 1165$ МПа, разрушение произошло путем срыва резьбы, а по ГОСТ испытание считают удовлетворительным, если разрыв происходит в стрессе или свободном резьбовом участке болта.

В остальных случаях (испытания 2–6, 9–11) разрушение было хрупким, болты разрушались по нормали по резьбовому участку путем отрыва.

Также были испытаны болты 8.8 из боросодержащей стали 20Г2Р. Диаграммы деформирования четырех испытанных болтов (см. рис. 1) практически полностью повторили друг друга. Максимальная нагрузка на болты со-

ставила 339–343 кН, что соответствовало напряжениям $\sigma = 960 \dots 970$ МПа. Болты показали большую пластичность по сравнению с болтами из стали 40Х. Разрушение было вязким с образованием наклонных площадок и характерной шейкой сужения (рис. 2).

Рис. 2. Характерное разрушение болтов: *а* – болты класса прочности 10.9 из стали 40Х; *б* – болты класса прочности 8.8 из стали 20Г2Р

Испытание полномасштабных моделей. Дальнейшие испытания проводились на полномасштабных натурных моделях (НМ) фланцевых соединений типа «балка – колонна». Испытания проводились в России впервые, на разработанном автором испытательном стенде [14]. Сечение конструктивных элементов натурных моделей взято по ГОСТ Р 57837–2017 «Двутавры стальные горячекатаные с параллельными гранями полок» и соответствует 25К6 для колонн и 30ШЗ для ригелей. Класс прочности стали элементов натурной модели С345. Нагружение НМ осуществляется гидравлическими домкратами грузоподъемностью 56 и 109 тс, подключенными к общей гидравлической линии. Плечо от оси домкратов до фланца 1 м (рис. 3). В соединениях использовались болты класса прочности 8.8 и 10.9. Фланцевые соединения выполнялись с контролируемым натяжением, контроль осуществлялся по моменту закручивания динамометрическим ключом и составил 900 Нм для болтов 8.8 и 1100 Нм для болтов 10.9. Испытания проводились до разрушения моделей, но часть данных при развитии больших деформаций и перемещений снимали с НМ. Для измерения деформаций в НМ расклеивались тензорезисторы (ТР), координаты их установки брались по результатам расчета численной модели. ТР устанавливались в растянутую и сжатую зону стенок колонн [15].

Были проведены две серии однотипных экспериментов с использованием болтов разного класса прочности (рис. 4).

Рис. 3. Чертеж натурной модели (размеры указаны в миллиметрах)

a

б

Рис. 4. Испытание НМ: *a* – одностороннее примыкание балки;
б – двустороннее примыкание балок, несимметричное нагружение

Первая серия испытаний. Одностороннее соединение ригеля с колонной, толщина фланца 20 мм. Испытывались две НМ. Первая – с болтами класса прочности 10.9, сила давления домкрата P в момент разрушения составила 42,8 тс. Для второй НМ (с болтами класса прочности 8.8 из стали 20Г2Р) разрушающая сила P составила 47,6 тс. При этой величине воздействия как в первом, так и втором случае произошел разрыв болта

нижнего ряда. Графики прогиба для точки, находящейся на 85 см от фланца балки, можно видеть на рис. 5. Графики горизонтальных деформаций для одних и тех же точек двух НМ представлены на рис. 6. Графики деформаций показаны двумя линиями, так как ТР клеились парами – на тыльную и фронтальную сторону стенки колонны [15].

Рис. 5. Графики прогиба балок: *a* – 1-я серия испытаний; *б* – 2-я серия испытаний

Рис. 6. Графики горизонтальных деформаций в растянутой и сжатой зоне стенок колонн: *a* – 1-я серия испытаний; *б* – 2-я серия испытаний

По результатам экспериментов первой серии наблюдается парадокс – соединение на более прочных болтах (10.9) имело на 10 % меньшую несущую способность, чем соединение на болтах меньшей прочности (8.8). Этот феномен можно объяснить, если рассмотреть графики удлинений болтов первой НМ (рис. 7).

Рис. 7. Графики удлинения болтов 1-й серии испытаний, класс прочности 10.9

Для определения удлинений болтов растянутой зоны соединения разработано следующее устройство (рис. 8). Вдоль болта просверливается сквозное отверстие диаметром 2,5 мм, в которое вставляется и закрепляется тонкий шток (проволока). Второй конец штока закрепляется на ДПЛ (линейный датчик перемещений) путем зажима фиксационным болтом (рис. 8). Сам ДПЛ прикручивается к уголку, который приваривается к гайке. Соответственно, болты должны быть длиннее стягиваемого пакета на 3 гайки, для закручивания болта, для установки ДПЛ, контрольная гайка для фиксации ДПЛ. По рис. 7 видно, что до силы в 21 тс удлинение болтов не происходит, так как усилия в болтах не превосходят усилий предварительного натяжения. При дальнейшем увеличении силы удлинение одного из болтов стало расти быстрее, чем у других, что в конечном счете и привело к его разрыву.

Рис. 8. Устройство для измерения удлинения болта

Вторая серия испытаний. НМ с двусторонним примыканием ригелей, толщина фланцев 30 мм. Нагружение образца осуществлялось двумя домкратами: слева 100-тонный, справа 50-тонный. Испытывались две НМ. Первая с болтами 10.9, сила давления домкрата P в момент разрушения составила 55 тс. Для второй НМ (с болтами 8.8 из стали 20Г2Р) разрушающая сила P составила 48,7 тс. При этой величине воздействия как в первом, так и втором случае произошел разрыв двух болтов нижнего ряда. Для этой серии испытаний выбиралась партия болтов 10.9 с меньшим разбросом механических характеристик.

Заключение. Для расчета болтовых соединений необходимо знать реальные диаграммы работы болтов, так как их податливость складывается из податливости тела болта, податливости головки и податливости резьбы. По результатам испытаний были получены диаграммы деформирования для болтов класса прочности 8.8 сталей 40Х и 20Г2Р и 10.9 стали 40Х. Данные диаграммы могут служить основой для численного моделирования болтов в программных комплексах.

Испытания полномасштабных моделей фланцевых соединений на болтах разного класса прочности выявили следующие закономерности:

1. Из анализа графиков деформаций (см. рис. 6) видно, что горизонтальные деформации в сжатой зоне стенки колонн не зависят от механических характеристик болтов на всем пути нагружения. В растянутой зоне измеренные в точках с идентичными координатами деформации одинаковы до нагрузок, не превосходящих предварительное натяжение болтов. При дальнейшем увеличении нагрузки деформации в растянутой зоне растут быстрее при использовании болтов класса 10.9 (40Х). Из-за большей пластичности болтов класса 8.8 (20Г2Р) усилия от более нагруженного ряда «перетекают» к менее нагруженному, что и вызывает более равномерное деформирование растянутой зоны стенки колонны.

2. Из анализа графиков перемещений (см. рис. 5) видно, что до нагрузок, не вызывающих пластических деформаций в болтах, прогибы не зависят от используемых болтов. При более высоких нагрузках использование болтов с большей пластичностью класса прочности 8.8 (20Г2Р) приводит к увеличению податливости соединений.

3. Важными характеристиками болтов наряду с прочностью являются относительная деформация при разрыве и разброс механических свойств. Использование болтов большей прочности, но меньшей пластичности может привести к уменьшению несущей способности соединения.

На данный момент в России принято проектировать ответственные узлы на болтах из стали 40Х с временным сопротивлением выше 1100 МПа,

как предписывают устаревшие рекомендации по проектированию. Испытания выявили ряд преимуществ болтов из стали 20Г2Р в сравнении с 40Х. Во-первых, большее относительное удлинение при разрыве. Во-вторых, меньший разброс механических свойств. Также болты 8.8 из стали 20Г2Р показали временное сопротивление 960–970 МПа, что выше предъявляемого к этому классу (800 МПа), в то время как болты из стали 40Х в некоторых случаях показали недопустимую прочность или сценарий разрушения (по резьбе) и были признаны браком. Таким образом, нами рекомендуется применение болтов из боросодержащей стали 20Г2Р в узлах любого уровня ответственности.

Библиографический список

1. Baker M. Is there a reproducibility crisis? // *Nature*. – 2016. – Vol. 533. – P. 452–454.
2. Swanson J.A. Ultimate Strength Prying Models for Bolted T-stub Connections // *Engineering journal*. – 2002. – Third quarter. – P. 136–147.
3. Huong K.T., Nguyen G.H. Discussion about effecting of stiffener in four bolts in a row end plate connection for long span and heavy load steel structures in Vietnam // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. – 2018. – № 143. – 6 p.
4. Ghindea M., Ballok R. State-of-the-art review on bolted steel beam-to-column connections // *Bulletin of the Transilvania University of Braşov*. – 2015. – Vol. 8 (57), special iss., no. 1. – 8 p.
5. Experimental testing and simulation of bolted beam-column connections having thick extended endplates and multiple bolts per row / G.S. Prinz, A. Nussbaumer, L. Borges, S. Khadka // *Engineering Structures*. – 2014. – Vol. 59. – P. 434–447.
6. Abidelah A., Bouchair A., Kerdal D.E. Experimental and analytical behavior of bolted end-plate connections with or without stiffeners // *Journal of Constructional Steel Research*. – 2012. – Vol. 76. – P. 13–27.
7. Compression-bend-shearing performance of column-to-column bolted-flange connections in pre-fabricated multi-high-rise steel structures / X.C. Liu, X.N. He, H.X. Wang, A.L. Zhang // *Engineering Structures*. – 2018. – Vol. 160. – P. 439–460.
8. Blachowski B., Gutkowski W. Effect of damaged circular flange-bolted connections on behaviour of tall towers, modelled by multilevel substructuring // *Engineering Structures*. – 2016. – Vol. 111. – P. 93–103.
9. Chen X., Shi G. Finite element analysis and moment resistance of ultra-large capacity end-plate joints // *J. Construct. Steel Res.* – 2016. – Vol. 126. – P. 153–162.
10. Konstantinos D.T., Papadopoulos T.A. FE parametric study of RWS beam-to-column bolted connections with cellular beams // *Journal of Constructional Steel Research*. – 2016. – Vol. 116. – P. 92–113.
11. Krishna M.M., Shunmugam M.S., Prasad N.S. A study on the sealing performance of bolted flange joints with gasketeds using finite element analysis // *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. – 2007. – Vol. 84, iss. 6. – P. 349–357.
12. Son M.P. Bolts pulling test. Reverser for bolts testing // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. – 2018. – Vol. 14 (3). – P. 144–149.
13. Сон М.П. Захват для испытания болтов: пат. 184639 Российская Федерация; заявл. 06.04.2018; опубл. 01.11.2018, Бюл. № 31.
14. Сон М.П. Фланцевые соединения в строительных конструкциях // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика*. – 2018. – № 1 (29). – С. 125–136.
15. Сон М.П. Коэффициент условий работы стенки колонны во фланцевых соединениях // *Строительная механика и расчет сооружений*. – 2018. – № 1. – С. 11–16.

References

1. Baker M. Is there a reproducibility crisis? *Nature*, vol. 533, 2016, pp. 452-454.
2. Swanson J.A. Ultimate Strength Prying Models for Bolted T-stub Connections// *Engineering Journal Third quarter*, 2002, pp.136-147.
3. Huong K. T., Nguyen G. H. Discussion about effecting of stiffener in four bolts in a row end plate connection for long span and heavy load steel structures in Vietnam/ IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2018, no. 143.
4. Ghindea M., Ballok R. State-of-the-art review on bolted steel beam-to-column connections. *Bulletin of the Transilvania University of Braşov*, vol. 8 (57), Special Issue no. 1, 2015.
5. Prinz G.S., Nussbaumer A., Borges L., Khadka S. Experimental testing and simulation of bolted beam-column connections having thick extended endplates and multiple bolts per row. *Engineering Structures*, vol. 59, 2014, pp. 434-447.
6. Abidelah A., Bouchair A, Kerdal D.E. Experimental and analytical behavior of bolted end-plate connections with or without stiffeners. *Journal of Constructional Steel Research*, 2012, vol. 76, pp. 13-27.
7. Liu X.C., He X.N., Wang H.X., Zhang A.L. Compression-bend-shearing performance of column-to-column bolted-flange connections in prefabricated multi-high-rise steel structures. *Engineering Structures*, vol. 160, 2018, pp. 439-460.
8. Blachowski B., Gutkowski W. Effect of damaged circular flange-bolted connections on behaviour of tall towers, modelled by multilevel substructuring. *Engineering Structures*, 2016, vol. 111, pp. 93-103
9. Chen X., Shi G. Finite element analysis and moment resistance of ultra-large capacity end-plate joints. *J. Construct. Steel Res*, 2016, vol. 126, pp. 153-162.
10. Konstantinos D.T., Papadopoulos T.A. FE parametric study of RWS beam-to-column bolted connections with cellular beams. *Journal of Constructional Steel Research*, 2016, vol. 116, pp. 92-113.
11. Krishna M.M., Shunmugam M.S., Prasad N.S. A study on the sealing performance of bolted flange joints with gasketeds using finite element analysis. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2007, vol.84, iss. 6, pp. 349-357.
12. Son M.P. Bolts pulling test. Reverser for bolts testing. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, 2018, vol. 14 (3), pp. 144-149.
13. Son M.P. Zakhvat dlya ispytaniya boltov: pat. 184639 [Capture for testing bolts: pat. 184639] Russian Federation, 2018.
14. Son M.P. Flancevye soedineniya v stroitel'nyh konstrukciyah [Flanged connections in building structures]. Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Prikladnaya ehkologiya. Urbanistika. 2018, no. 1 (29), pp. 125-136.
15. Son M.P. Koehfficient uslovij raboty stenki kolonny vo flancevyh soedineniyah [Partial ratio of the column wall in flange connections] Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenij, no. 1, 2018, pp. 11-16.

Получено 4.09.2018

M. Son

INFLUENCE OF MECHANICAL CHARACTERISTICS OF BOLTS ON STRESS-STRAIN STATE AND BEHAVIOR OF FLANGE CONNECTIONS OF BEAMS WITH COLUMNS

Flanged joints of beams with columns are responsible nodes, often predetermining the reliability of the entire structure. Rupture of a bolt can cause breakdown of both the node and the entire structure. To increase the reliability of connections, it is necessary to use design methods based on reliable tests. During the individual tests with the use of the developed reverser bolt deformation dia-

grams were obtained for bolts of 8.8 strength class of 40Kh and 20G2R steels, and 10.9 strength class of 40Kh steel. These diagrams can serve as the basis for numerical modeling of bolts in software systems, as well as manual calculation of compliance. In the article the results of tests that were previously not conducted in Russia, namely full-scale actual models of flange connections of beams with columns, are presented. The tests were carried out until the destruction of the models; loads, displacements, deformations and bolts' lengthening were measured and recorded during the tests. In the article the influence of the mechanical characteristics of bolts on the distribution of deformations in the wall of the column and on the compliance of the entire joint is shown. At the moment in Russia it is common to design critical knots of 40Kh steel bolts with a temporary resistance above 1100MPa. Tests of individual bolts and joints on 40Kh and 20G2R steel bolts have revealed the following advantages of the latter: greater elongation at break and less dispersion of mechanical properties. Also, 8.8 bolts of 20G2R steel showed temporary resistance of 960–970 MPa, which is higher than that required for this class; therefore it is recommended to use 20G2R steel bolts in the nodes and structures of any level of responsibility.

Keywords: bolt, flange connections, mechanical characteristics, full-scale tests, strength.

Сон Марк Петрович (Пермь, Россия) – канд. техн. наук, доцент, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: mark-son@mail.ru).

Mark Son (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Assistant Professor, Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolsky av., 29, e-mail: mark-son@mail.ru).