

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.014.2:624.042

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.11.1763-1779

Экспериментальные исследования влияния зазоров во фланцевых соединениях на напряженно-деформированное состояние узла

Александр Романович Туснин, Валерия Дмитриевна Платонова
*Национальный исследовательский Московский государственный строительный
университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. Для решения инженерных задач интерес представляет вопрос действительной работы каркаса здания в целом с учетом особенностей работы узлов, соединяющих несущие элементы. Предлагается исследовать влияние начальных зазоров во фланцевых соединениях типа «балка – колонна» на прочностные и деформативные характеристики узлового решения. Особое внимание уделяется работе высокопрочных болтов с предварительным натяжением в режиме работы «растяжение с изгибом». Предложена конфигурация экспериментальной модели, выбран способ фиксации величины напряжений в болтах в трех точках, что позволяет учитывать напряжения не только от растяжения болта, но и от его изгиба.

Материалы и методы. Выполнен литературный обзор темы влияния начальных несовершенств во фланцевых соединениях, рассмотрен вопрос недостатков существующих подходов к аналитическому расчету узлов на основе российских и зарубежных нормативных документов. Описаны экспериментальная установка и опытные образцы, приведены рекомендации по проведению экспериментальных исследований фрагмента рамы с двумя типами узлов. Установка и образцы разработаны на основе результатов численного расчета конечно-элементных моделей.

Результаты. Проведены испытание шпильки с заявленным классом прочности 8.8 для определения ее фактических механических характеристик, испытание на растяжение шпильки с прорезями для оценки достоверности данных тензометрических измерений и корректировки конструкции экспериментальных образцов с учетом результатов испытаний, испытание узловых решений двух видов конфигураций, обработка и аналитика результатов испытаний.

Выводы. Обоснована методология выполнения эксперимента по тематике исследования, определен характер влияния формируемого зазора на напряжения в элементах узла.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: фланцевые соединения балки и колонны, работа фрикционного соединения при наличии зазоров

Благодарности. Работа выполнена при поддержке гранта НИУ МГСУ. Приказ 453/130 от 15.05.2023 «О реализации проектов, поддержанных по результатам конкурса 2023 года на проведение фундаментальных и прикладных научных исследований (НИР) научными коллективами НИУ МГСУ».

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Туснин А.Р., Платонова В.Д. Экспериментальные исследования влияния зазоров во фланцевых соединениях на напряженно-деформированное состояние узла // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 11. С. 1763–1779. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.11.1763-1779

Автор, ответственный за переписку: Валерия Дмитриевна Платонова, platonovaleria@yandex.ru.

Influence of gaps in flange joints on the stress-strain state of the unit

Alexander R. Tusnin, Valeria D. Platonova

*Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. For the solution of engineering problems, the question of the actual operation of the building frame as a whole, taking into account the peculiarities of the operation of the joints connecting the load-bearing elements, is of interest. It is proposed to investigate the influence of initial gaps in flange “beam – column” type connections on strength and deformation characteristics of the joint solution. Special attention is paid to the operation of high-strength bolts with pretensioning in the “tension-bending” mode of operation. In this article, the configuration of the experimental model is proposed, the method of fixing the value of stresses in bolts at three points is chosen, which makes it possible to take into account stresses not only along the axis, but also in the plane of the cross-section of the bolt.

Materials and methods. A literature review of the subject of the influence of initial imperfections in flange joints is carried out, the question of disadvantages of existing approaches to the analytical calculation of assemblies on the basis of Russian

and foreign normative documents is considered. Experimental installation and prototypes are described, recommendations for experimental studies of a frame fragment with two types of joints are given. The installation and prototypes are developed on the basis of the results of numerical calculation of finite element models.

Results. A test of a stud with the declared strength class 8.8 to determine its actual mechanical characteristics, a tensile test of a stud with slots to assess the reliability of strain gauge data and adjust the design of experimental specimens taking into account the test results, testing of joint solutions of two types of configurations, processing and analyzing the test results were carried out.

Conclusions. The methodology of experiment execution on the research subject is substantiated, the character of the influence of the formed gap on the stresses in the elements of the joint is determined.

KEYWORDS: beam-column flange joints, friction joint operation in the presence of gaps

Acknowledgments. The study was supported by a grant from NRU MGSU. Order 453/130 dated May 15, 2023 "On the implementation of projects supported by the results of the 2023 competition for fundamental and applied scientific research (R&D) by the research teams of NRU MGSU".

FOR CITATION: Tushin A.R., Platonova V.D. Influence of gaps in flange joints on the stress-strain state of the unit. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(11):1763-1779. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.11.1763-1779 (rus.).

Corresponding author: Valeria D. Platonova, platonovaleria@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Проектирование стальных каркасов требует от конструктора решения таких вопросов, как прочность, жесткость, удобство сборки, расход стали и трудоемкость конструкции. Для поиска наиболее рациональных решений необходима комплексная оценка действительной работы каркаса с учетом вариативности нагрузок, перераспределения усилий в конструкции, принимая во внимание совместную работу элементов узлового соединения.

Монтаж зданий и сооружений из стали удобно выполнять на болтах различных классов прочности в зависимости требуемой несущей способности сечения стыка элементов. Наиболее интересным для рассмотрения является фланцевый рамный узел «балка – колонна». Значительный практический интерес представляют фланцевые узлы с минимальным числом дополнительных элементов. Для соединения балки и колонны из двутавровых профилей предлагается использовать два типа фланцевого узла, отличающиеся полным отсутствием поперечных ребер жесткости на колонне в районе узла (рис. 1).

В настоящее время для соединения балки с колонной широко используются типовые узлы [1–3], расчет которых задокументирован в рекомендациях и руководствах по проектированию^{1, 2, 3}. Такие узлы

хорошо изучены, но имеют сложную конструкцию, содержат избыточные элементы. Это обусловлено предпочтением, которое отдавалось использованию узлов, максимально приближенных к жесткому соединению по характеру работы. Также ведутся исследования по определению характера работы фланцевых узлов без дополнительных элементов усиления в различных конфигурациях [4–9]. В европейских странах применяется методика учета жесткостных характеристик соединения. К достоинствам методики Еврокода относится возможность учета вклада каждого отдельного конструктивного компонента в жесткость соединения, однако эта методика достаточно трудоемка для применения на практике.

В ряде научных публикаций представлены результаты исследований фланцевых узлов с учетом их жесткостных параметров [10–20]. Для определения жесткостных характеристик используются результаты расчетов конечно-элементных моделей и данные экспериментальных исследований. Вопрос начальных несовершенств обсуждается в меньшей степени, большее предпочтение отдается изучению работы соединений при разных видах динамических, термических и особых нагрузок. Так же рассматриваются вопросы работы различных сталей, их достоинства и недостатки в конкретных условиях эксплуатации.

Российские и зарубежные исследования показывают, что минимальные начальные несовер-

¹ Серия 2.440-2. Узлы стальных конструкций производственных зданий промышленных предприятий. Выпуск 7. Болтовые фланцевые рамные соединения балок с колоннами стальных каркасов зданий и сооружений. М. : НИПИПромстальконструкция, 1994.

² Рекомендации по расчету, проектированию, изготовлению и монтажу фланцевых соединений стальных строительных конструкций. М. : СО «Стальмонтаж»; ВНИПИ «Промстальконструкция»; ЦНИИПСК им. Мельникова, 1988. 83 с.

³ Серия 2.440-2. Узлы стальных конструкций производственных зданий промышленных предприятий. Выпуск 7. Болтовые фланцевые рамные соединения балок с колоннами стальных каркасов зданий и сооружений. М. : НИПИПромстальконструкция, 1994.

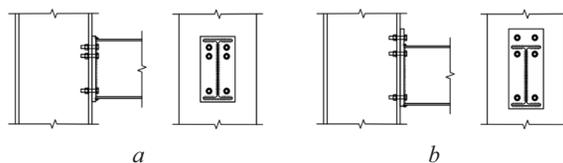


Рис. 1. Фланцевые узлы без усиления: *a* — соединение с фланцем в пределах высоты балки; *b* — соединение с удлиненным фланцем

Fig. 1. Flange units without reinforcement: *a* — connection with flange within the beam height; *b* — connection with extended flange

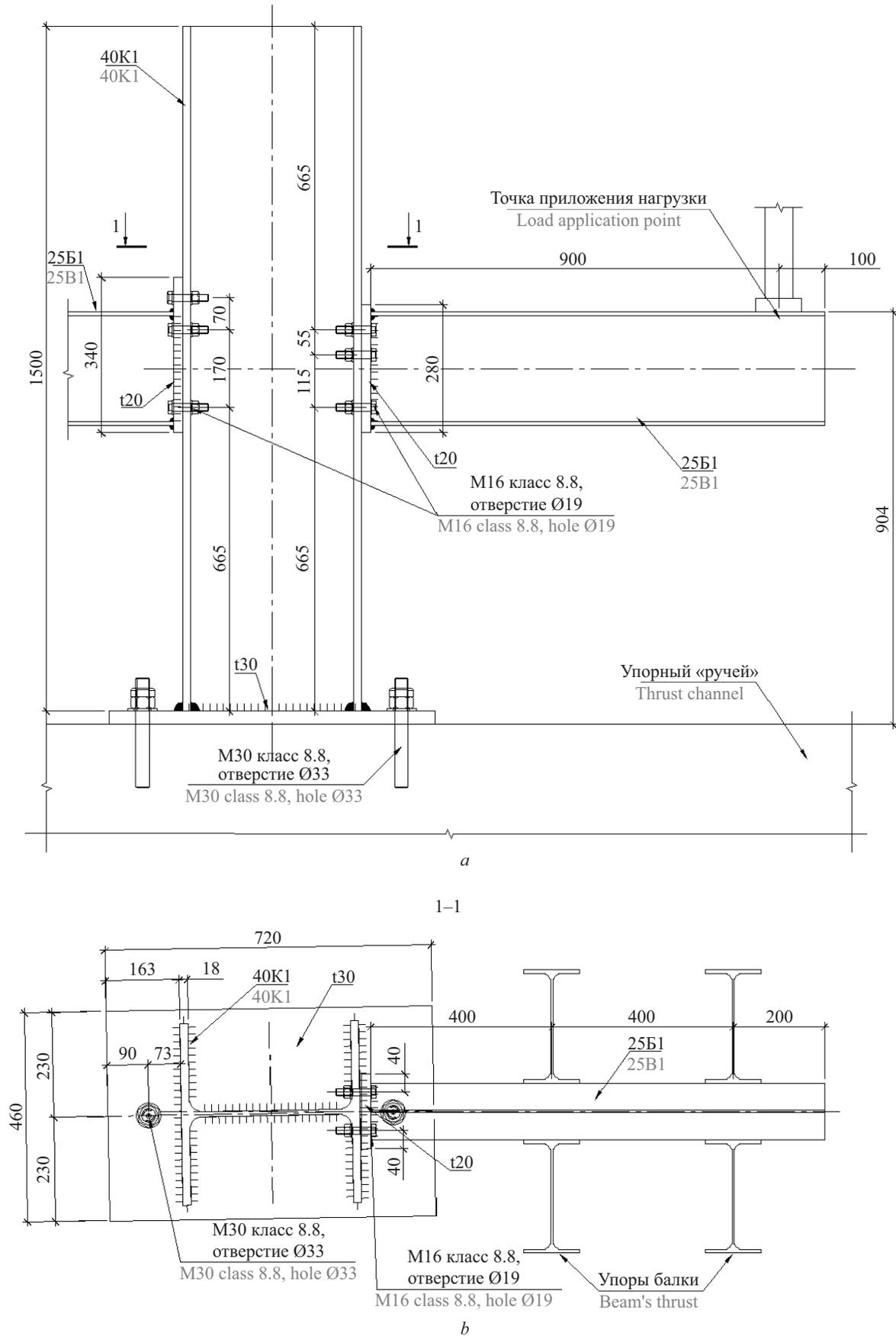


Рис. 2. Экспериментальная установка: *a* — вид сбоку; *b* — вид сверху

Fig. 2. Experimental setup: *a* — side view; *b* — top view

шенства, такие как сварочные деформации фланца, не влияют негативно на прочностные свойства соединения, снижая при этом начальную жесткость соединения. Для проектирования надежных фланцевых узлов необходимо установить, какая величина начальных зазоров во фланцах является допустимой при проектировании соединений и какой в действительности вклад она вносит в характеристики соединения.

Анализ применяемых для изготовления колонн прокатных профилей показал, что наибольшее влияние на формирование возникновения начальных зазоров между фланцем балки и полкой колонны оказывает отклонение полки прокатного профиля колонны от параллельности. По ГОСТ Р 57837–2017 при высоте профиля от 120 до 290 мм перепад плоскости полки по ее длине не должен превышать 3 мм, при высоте больше 290 мм — 4 мм. В настоящем исследовании предлагается рассмотреть непараллельность фланцев колонны и балки с раскрытием зазора в горизонтальной плоскости соединения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

С целью определения влияния начального зазора между фланцами на напряженно-деформированное состояние (НДС) соединения проведены экспериментальные исследования работы флан-

цевых узлов «балка – колонна». Для этого была разработана методика выполнения эксперимента и сконструирована экспериментальная установка, обеспечивающая формирование узла с варьируемыми по величине зазорами.

В состав экспериментальной установки входят колонна, балки с приваренными фланцами и боковые упоры, фиксирующие положение балки относительно колонны в горизонтальной плоскости и обеспечивающие формирование требуемого зазора. С учетом ограничений по допустимой высоте при осуществлении эксперимента колонна выполняется длиной 1500 мм. Для уменьшения влияния закручивания колонны на работу узла с зазорами колонна выполняется из прокатного двутавра 40К1, имеющего большую жесткость на кручение. Экспериментальная балка изготавливается из прокатного двутавра 25Б1, из таких же профилей выполнены 4 упора. Колонна и упоры крепятся к силовому полу анкерными болтами. При проведении испытаний предполагается работа стали колонны и балки в упругой стадии, что позволило выполнить многовариантные испытания при варьировании зазора между фланцем и полкой.

Для крепления балки к колонне фланцев выбран наименьший из доступных диаметров болтов 16 мм и класс прочности 8.8. Применение класса болтов 8.8

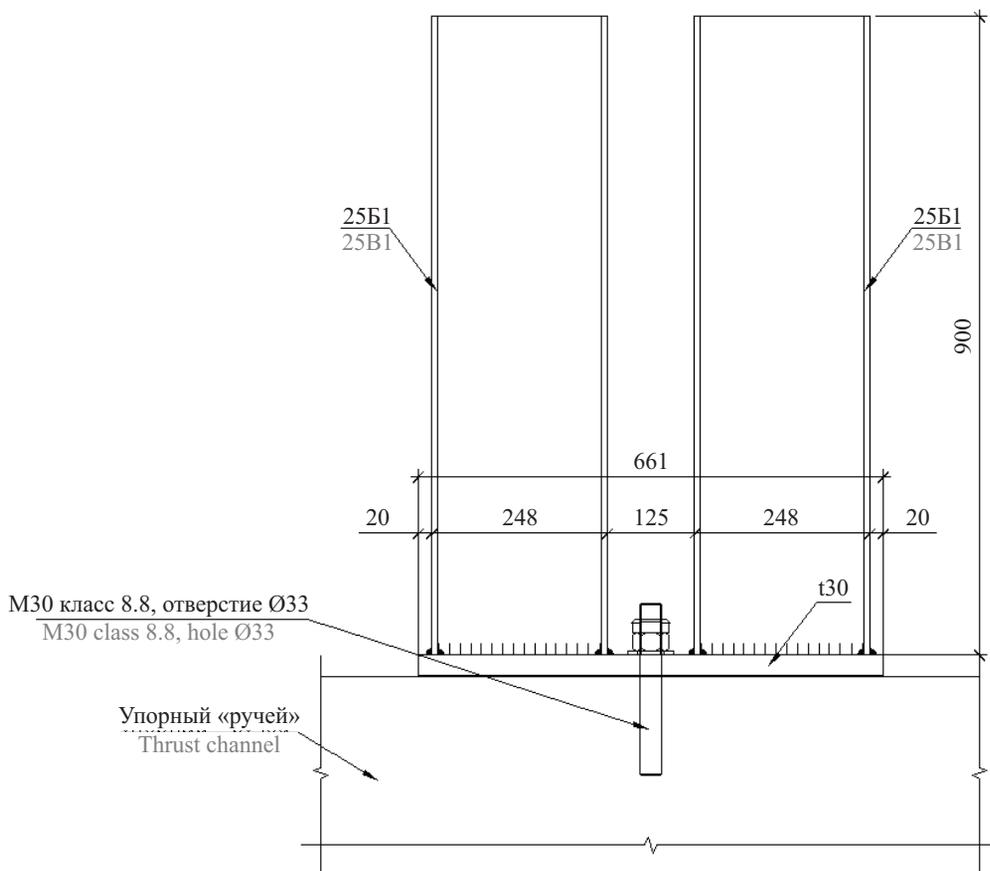


Рис. 3. Упоры балки

Fig. 3. Beam supports

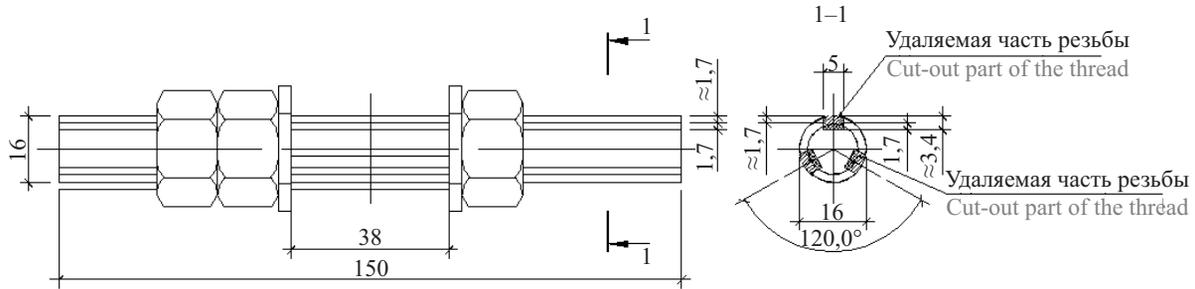


Рис. 4. Соединительная деталь с пазами для тензодатчиков

Fig. 4. Connection piece with slots for load cells



Рис. 5. Испытание шпильки с прорезями

Fig. 5. Testing a stud with slots



Рис. 6. Экспериментальная установка фланцевого соединения

Fig. 6. Experimental flange connection installation

во фланцевых узлах допустимо в конструкциях любых классов ответственности. Параметры болтов обеспечили работу соединения при отсутствии пластических деформаций в стыкуемых элементах. Особенностью болтового соединения являлось использование не стандартных высокопрочных болтов, шпилек класса 8.8, что позволило после соответствующей доработки разместить на шпильке тензометрические датчики для измерения деформаций болтов в процессе загрузки. Для того чтобы равномернее распределить нагрузку от преднатяжения болтов между стягиваемыми элементами толщина фланца принимается примерно равной толщине полки колонны. Полка колонны из двутавра 40К1 имеет толщину 18 мм, фланец балки принимается равным 20 мм.

Конструкция экспериментальной установки представлена на рис. 2.

При выполнении эксперимента испытаны образцы двух вышеприведенных видов узлов в следующей последовательности:

- 1) без начального зазора;
- 2) с максимальным расчетным зазором 2 мм;
- 3) с зазором, равным удвоенной величине максимального расчетного зазора 4 мм.

На рис. 3 показаны упоры, фиксирующие положение балки относительно колонны. При этом формирование зазора выполнялось с помощью поворота колонны на требуемый угол и жесткой фиксации опорной плиты колонны анкерными болтами.

Для определения деформаций болтов во фланцевом соединении была изготовлена соединительная деталь из шпильки класса прочности 8.8 диаметром 16 мм, в которой выточены пазы для крепления трех тензодатчиков с базой 3 мм и сопротивлением 120 Ом. Три датчика позволяют получить не только данные о продольной силе в болте, но и об изгибающем моменте в нем. Шпилька крепится гайками класса 8. Для фиксации положения гаек используется контргайка. Общий вид шпильки представлен на рис. 4.

Перед экспериментальными исследованиями узлов проведены испытания шпильки на растяжение для установления механических характеристик стали шпильки. Кроме этого, проведены испытания

шпилек с прорезями и наклеенными тензометрическими датчиками, что позволило уточнить величину прорезей и работоспособность предложенного способа измерения напряжений в шпильке. На рис. 5 показана шпилька с прорезями и приклеенными тензодатчиками в процессе испытания.

Нагрузка к шпилькам прикладывалась с равномерным ростом, показания с тензометрических датчиков снимались 10 раз в секунду, нагрузка прикладывалась до полного исчерпания прочности шпилек.

После испытания шпилек и уточнения их конструкции собрана и подготовлена экспериментальная установка. На рис. 6 представлена экспериментальная установка с подготовленным для испытания узлом первого из рассматриваемых типов.

При сборке установки отработаны процедуры надежной фиксации колонны и балки с формированием требуемого неравномерного зазора. После сборки было проведено пробное загрузжение, подтвердившее работоспособность конструкции и расчетные предпосылки, принятые при проектировании установки. Пробное загрузжение и все последующие выполнялись с использованием ручного пресса, рассчитанного на нагрузку до 10 т. С учетом пробного испытания уточнены программа и методика проведения эксперимента.

Для измерения деформаций элементов соединения на шпильках и фланцах были размещены тензометрические датчики. На рис. 7 показана нумерация болтов и расположение тензодатчиков на фланце. При этом болты под номерами 1–3 размещены со стороны с максимальным взаимным примыканием фланцев, а номера 4–6 со стороны формируемого при испытаниях зазора.

Значения напряжений в болтах принимались по средним деформациям трех датчиков, для фланца — приведенное напряжение (2D Von-Mises)

по двум датчикам, расположенным под 90° друг относительно друга:

$$\sigma_v = \sqrt{(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y)}.$$

При сборке добивались такого положения балки и колонны, чтобы при затяжке болтов с учетом деформирования фланца были обеспечены необходимые зазоры с одной стороны фланца. Для формирования зазора колонна поворачивалась относительно продольной оси на необходимый угол, после чего фиксировалась анкерными болтами к силовому полу. Зазоры измерялись набором машиностроительных шупов с пластинами 0,05–1 мм. При сборке установки балка предварительно фиксировалась относительно колонны, а затем закреплялась шпильками, которые затягивались с контролем относительных деформаций в датчиках. При затяжке шпилек усилие в них контролировалось так, чтобы не превысить расчетное значение затяжки, равное:

$$P_b = 0,6 \cdot R_{bt} \cdot A_{bn} = 0,6 \cdot 451 \text{ Н/мм}^2 \cdot 1,05 \text{ см}^2 = 28 \text{ кН}.$$

Экспериментально исследовалась работа узлов 1-го и 2-го типа с зазорами. В данной статье приведены результаты испытаний узла 1-го типа. Испытания узла 1-го типа проведены при трех вариантах зазора, сформированного в районе болтов номер 4–6:

- 1-е испытание — зазор величиной 1 мм;
- 2-е испытание — зазор величиной 1,8 мм;
- 3-е испытание — зазор величиной 4,7 мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

При проведении испытаний по определению механических свойств образца шпильки были получены следующие результаты (табл. 1, 2, рис. 8, 9).

На рис. 8 показана зависимость «деформация – нагрузка», полученная при испытании шпильки на растяжение. На диаграмме отмечены предел текучести и временное сопротивление.

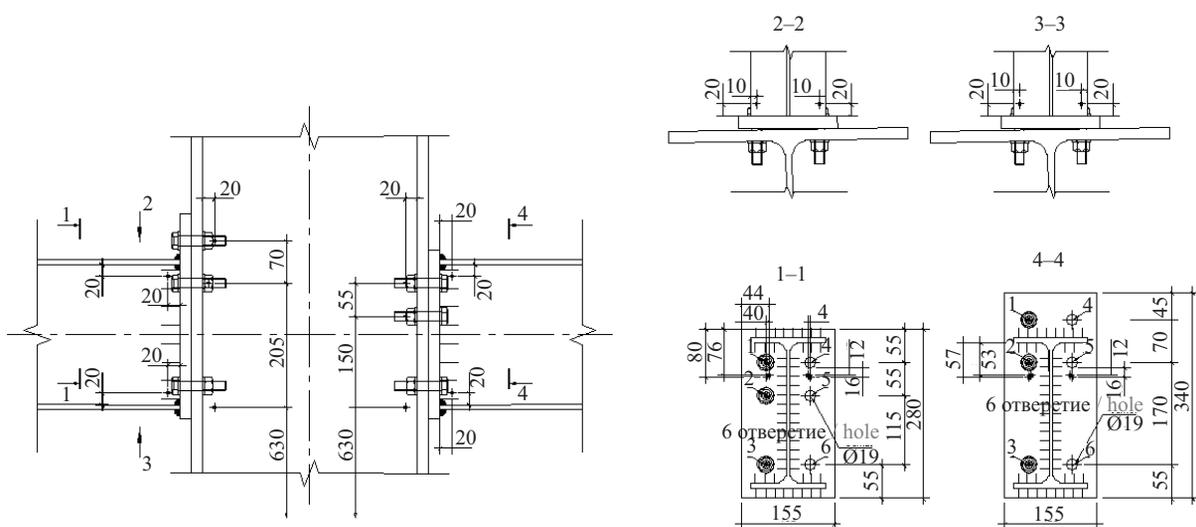


Рис. 7. Расположение тензодатчиков на фланце и нумерация болтов

Fig. 7. Location of load cells on the flange and numbering of bolts

Табл. 1. Механические свойства стали шпильки

Table 1. Mechanical properties of stud steel

Фактическая площадь сечения шпильки, мм ² Actual cross-sectional area of the stud, mm ²	Усилие появления предела текучести, кН Yield strength occurrence force, kN	Предел текучести, Н/мм ² Yield strength, N/mm ²	Нормируемое расчетное сопротивление болтов кл. 8.8, Н/мм ² Normalized design resistance of 8.8 class bolts, N/mm ²	Предельное усилие, кН Force limit, kN	Временное сопротивление образца на растяжение, Н/мм ² Tensile strength of the specimen, kN/mm ²	Нормируемое временное сопротивление болтов кл. 8.8, Н/мм ² Standardized time resistance of 8.8 class bolts, N/mm ²
104,7	59,64	569,5	451	93,39	891,0	830

Табл. 2. Нагрузка и напряжения в датчиках

Table 2. Load and stresses in the sensors

Нагрузка и напряжение Load and stress	Усилие появления предела текучести 59,64 кН Yield stress occurrence force 59.64 kN	Предельное усилие 93,39 кН Maximum force 93.39 kN
<i>Датчик № 1 / Sensor No. 1</i>		
Относительная деформация Relative deformation	0,002835	0,004243
Напряжение, МПа Stress, MPa	575,5	861,3
<i>Датчик № 2 / Sensor No. 2</i>		
Относительная деформация Relative deformation	0,001998	0,003810
Напряжение, МПа Stress, MPa	405,6	773,4
<i>Датчик № 3 / Sensor No. 3</i>		
Относительная деформация Relative deformation	0,002788	0,004217
Напряжение, МПа Stress, MPa	566,0	856,1
<i>Среднее значение по датчикам № 1 и 3 / Average value for sensors No. 1 and 3</i>		
Относительная деформация Relative deformation	0,002812	0,004230
Напряжение, МПа Stress, MPa	570,8	858,7

При определении механических характеристик стали шпилек установлено соответствие стали шпилек нормативным требованиям. Модуль упругости материала шпильки до предела текучести составил $2,03 \cdot 10^5$ МПа.

В табл. 2 представлены результаты испытания шпильки с прорезями на растяжение.

На рис. 9 приведены зависимости напряжений и нагрузки в процессе испытаний шпильки. Кроме данных по датчикам, на графике представлены зависимости напряжений, полученные делением нагрузки на площадь шпильки (обозначены как N/A).

Испытания образца шпильки с прорезями позволило установить характер разрушения. В результате нагружения экспериментального образца

соединение потеряло несущую способность по материалу резьбы гайки класса 8 со смятием шайбы кл. 5.4 (рис. 10).

Материал шпильки с учетом ослабленного пазами сечения соответствует нормируемым показателями расчетного сопротивления болтов класса 8.8 и не был разрушен в ходе испытания. Показания датчиков № 1 и 3 совпадают с теоретическими значениями. Для датчика № 2 наблюдается отклонение значений от теоретических, что обусловлено некорректной работой датчика. Испытания шпильки подтвердили работоспособность датчиков в прорезях шпилек. Показания датчиков адекватно отражают усилие, действующее в шпильке. Предварительная расклейка и распайка тензометрических датчи-

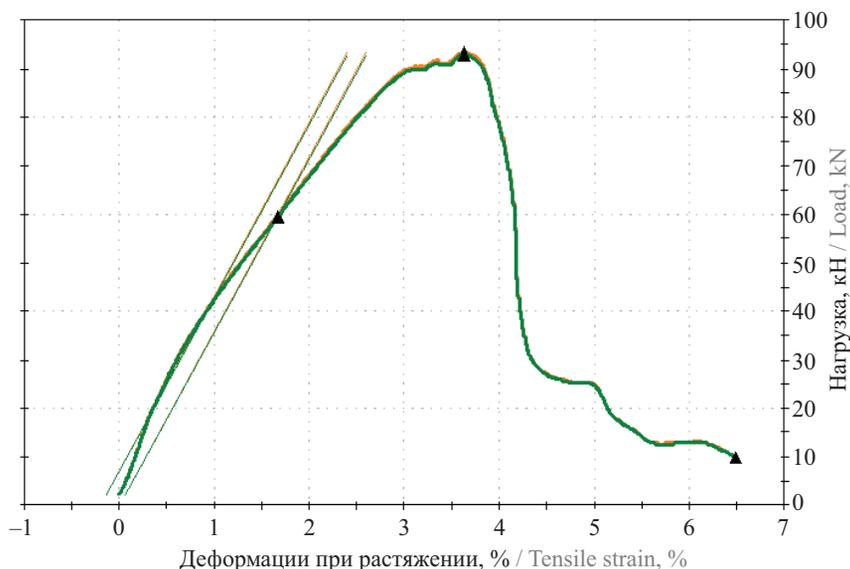


Рис. 8. Общий график «деформация – нагрузка» с обозначением характерных точек нагрузки текучести и временного сопротивления

Fig. 8. General strain – load diagram with characteristic points of yield stress and time resistance marked

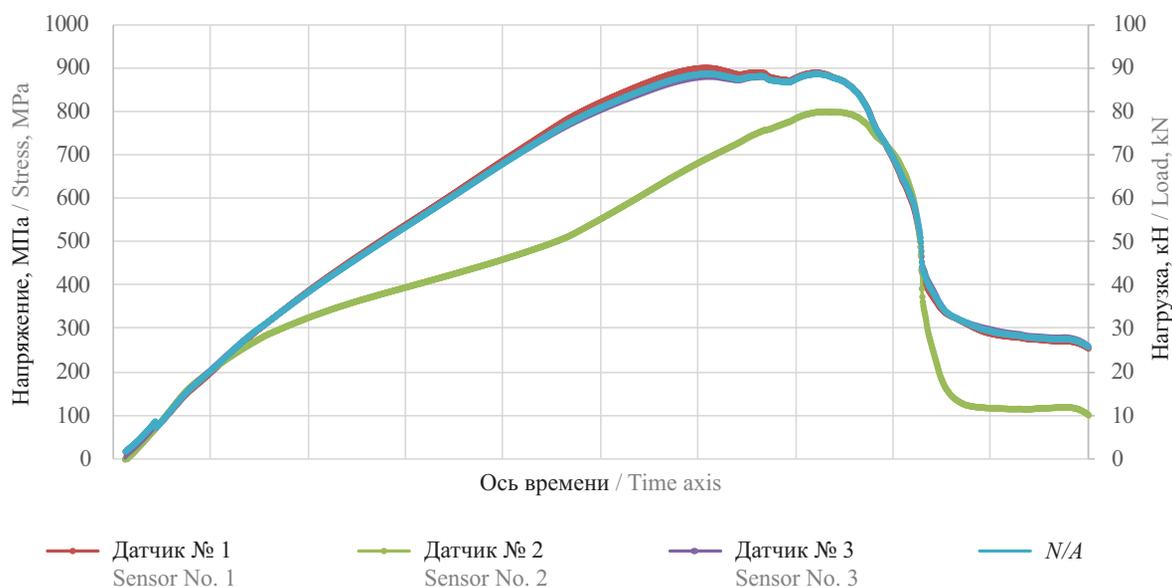


Рис. 9. График теоретического и фактического напряжения в датчиках

Fig. 9. The diagram of theoretical and fact tension in strain gages



Рис. 10. Шпилька после испытания и разрушения гайки

Fig. 10. Stud after testing and nut fracture

ков, сборка резьбового соединения и закрепления проводов датчиков, испытания шпильки дали возможность установить, что допустимо уменьшить глубину паза в шпильке для размещения датчиков до 3,4 мм. Так как разрушение произошло по материалу резьбы гайки, в дальнейших испытаниях фланцевых узлов используются контргайки с каждой стороны соединения.

В первом испытании болты затягивались на усилии 24–28 кН (табл. 3).

Разность в натяжении обусловлена перераспределением усилия натяжения между болтами при их последовательной затяжке и корректировке усилия.

Табл. 3. Предварительное натяжение в болтах, первое испытание

Table 3. Pre-tensioning in bolts, first test

Номер болта Number of bolt	1	2	3	4	5	6
Усилие натяжения, кН Tension force, kN	27,7	28,5	27,3	23,9	25,7	25,6
Начальное напряжение, кН Initial stress, kN	263,8	271,4	260,0	227,6	244,8	243,8

Максимальное сосредоточенное усилие на консоль балки на расстоянии 900 мм от фланца при первом испытании составило 35 кН. Максимальная нагрузка устанавливалась по факту достижения одним из болтов напряжения порядка 400 МПа при нормируемом значении на разрыв для болтов класса 8.8, равного 451 МПа. Разгрузка была проведена без выдержки. На рис. 11 представлено изменение напряжений в болтах в зависимости от нагрузки. Красным цветом показано изменение нагрузки, синим — напряжения в элементах.

В табл. 4 приведены напряжения в болтах до и после первого испытания.

По приведенным выше диаграммам видно, что болты верхних рядов в зоне плотного примыкания фланцев (№ 1, 2) сохраняют значения внутреннего напряжения на уровне значения предварительной затяжки до некоторой величины нагрузки (около 28 кН), после чего в них резко начинают расти напряжения сверх преднатяжения. Усилия в болтах № 4 и 5 нарастают сразу и увеличиваются пропорционально росту нагрузки на балку. Отсутствие роста

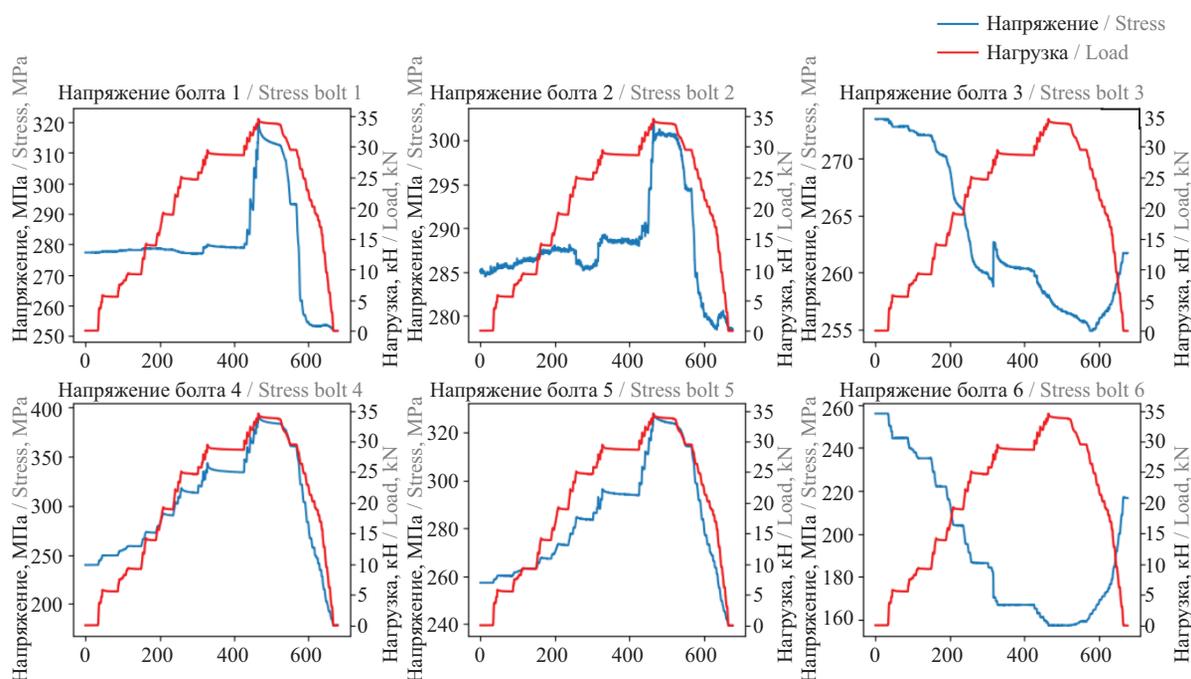


Рис. 11. Напряжения в болтах, первое испытание

Fig. 11. Bolt stresses, first test

Табл. 4. Напряжения в болтах до и после испытания, первое испытание

Table 4. Bolt stresses before and after test, first test

Номер болта Number of bolt	1	2	3	4	5	6
Предварительное напряжение, МПа Pre-stress, MPa	263,8	271,4	260,0	227,6	244,8	243,8
Напряжение при максимальной нагрузке, МПа Stress at maximum load, MPa	322,5	303,9	274,8	395,7	329,4	257,3
Остаточное напряжение, МПа Residual stress, MPa	252,9	279,8	262,9	179,7	240,6	217,7

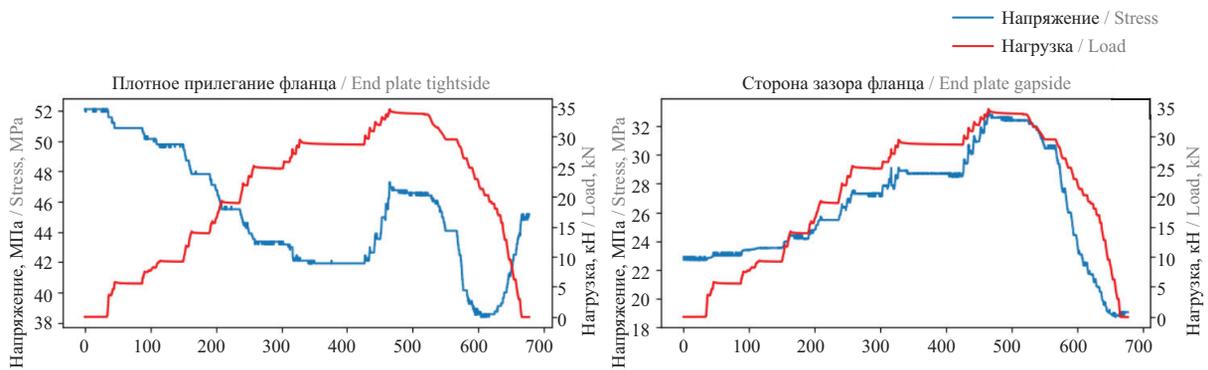


Рис. 12. Напряжения во фланце, первое испытание

Fig. 12. Flange stresses, first test

усилий в болтах 1 и 2 на начальном этапе загрузки обусловлено тем, что контакт фланца с полкой колонны в районе плотного примыкания сохраняется до достижения нагрузкой величины 28 кН и условия работы болтов близки к их начальному состоянию. При большей нагрузке контакт фланца и полки в районе болтов 1 и 2 нарушается, фланец не соприкасается с полкой, все сжимающие напряжения в полке и фланце в направлении толщины снимаются, а болты 1 и 2 дополнительно растягиваются при росте нагрузки. Усилия в болтах № 1 и 2 после этого достигают значений, соответствующих усилиям в болтах 4 и 5, изначально работающих в условиях отсутствия контакта фланца и полки. Рост напряжений в болтах при действии максимальной нагрузки составил от 12 до 74 % (болт № 2 и 4 соответственно). После разгрузки напряжения в болтах растянутой зоны уменьшаются от 2 до 21 % (болт № 5 и 4 соответственно). Исключением служит болт № 2, напряжение в котором увеличилось в сравнении с начальным состоянием на 3 %.

Нижний ряд болтов находится в сжатой зоне узла. С ростом нагрузки напряжения растяжения в них, как и ожидалось, падают с ростом нагрузки. У болта № 3 в диапазоне нагрузки 25–28 кН в цикле нагружения имеет место характерный участок смены знака изменения напряжения. При этом падение предварительного натяжения со стороны плотного примыкания (болт № 3) составило 18,6 МПа, а со стороны зазора (болт № 6) — 98,9 МПа. После разгрузки снижение напряжений в болте сжатой зоны № 6 составило 11 %, для болта № 3 напряже-

ние увеличилось на 1 % в сравнении с начальным значением.

На рис. 12 показаны зависимости напряжений во фланце при изменении нагрузки.

Первый график отображает напряжения со стороны плотного прилегания фланца к полке, второй — со стороны сформировавшегося зазора. В начальный момент времени приведенное напряжение от затяжки болтов в зоне плотного примыкания составило 52,1 МПа, в зоне зазора — 22,7 МПа. При увеличении нагрузки наблюдается снижение приведенных напряжений в зоне плотного примыкания фланца к полке до 42 МПа при нагрузке 28 кН, затем напряжения возрастают до 47 МПа при достижении максимальной нагрузки. Дополнительный рост напряжений в зоне плотного примыкания фланца к полке возникает при той же нагрузке, что и рост напряжений в болтах этой зоны. В зоне зазора напряжения растут по мере роста нагрузки во всем диапазоне нагружения.

С учетом результатов первого испытания было подготовлено второе. Натяжение болтов производилось с контролем остаточной величины сформированного зазора. Величина зазора во втором испытании составила 1,8 мм. Из-за податливости упора деформаций фланца и полки колонны болты со стороны зазора имели значительно меньшую величину натяжения, чем болты со стороны плотного примыкания (табл. 5).

При натяжении болтов на указанные в табл. 4 усилия остаточные зазоры со стороны более плотного прилегания фланцев составили 1 мм в зоне

Табл. 5. Предварительное натяжение в болтах, второе испытание

Table 5. Pre-tensioning in bolts, second test

Номер болта Number of bolt	1	2	3	4	5	6
Усилие натяжения, кН Tension force, kN	24,9	23,8	27,0	5,2	8,7	11,7
Начальное напряжение, кН Initial stress, kN	237,1	226,7	257,1	49,5	82,9	111,4



Рис. 13. Зазор 1,8 мм, второе испытание

Fig. 13. Gap 1.8 mm, second test

расположения болтов, со стороны формируемого зазора — 1,8 мм (рис. 13).

Нагрузка прикладывалась аналогично первому эксперименту с шагом 5 кН и кратковременной выдержкой. Максимальное значение нагрузки принималось по достижению относительных деформаций одного из болтов значений, соответствующих

напряжению в болте, равному нормируемому сопротивлению 450 МПа. Предельное значение нагрузки — 40 кН. Разгрузка при этом проводилась ступенчато по 5 кН, так же, как и нагружение. На рис. 14 представлена зависимость напряжений в болтах при изменении нагрузки.

В табл. 6 приведены напряжения в болтах до и после первого испытания.

При действии нагрузки 40 кН напряжения в болтах достигли порядка 440 МПа. В болтах № 1, 2 до нагрузки 16 кН усилия менялись мало. После достижения нагрузкой этого значения контакт между фланцем и полкой нарушался и болты 1 и 2 дополнительно растягиваются так же, как и болты в зоне зазора. Наличие для болтов № 1 и 2 участка с мало меняющимися напряжениями до нагрузки 14 кН свидетельствует о наличии контакта между фланцем и полкой непосредственно в районе этих болтов, несмотря на зазоры по краю фланца до 1 мм. Напряжения в болтах при действии максимальной нагрузки

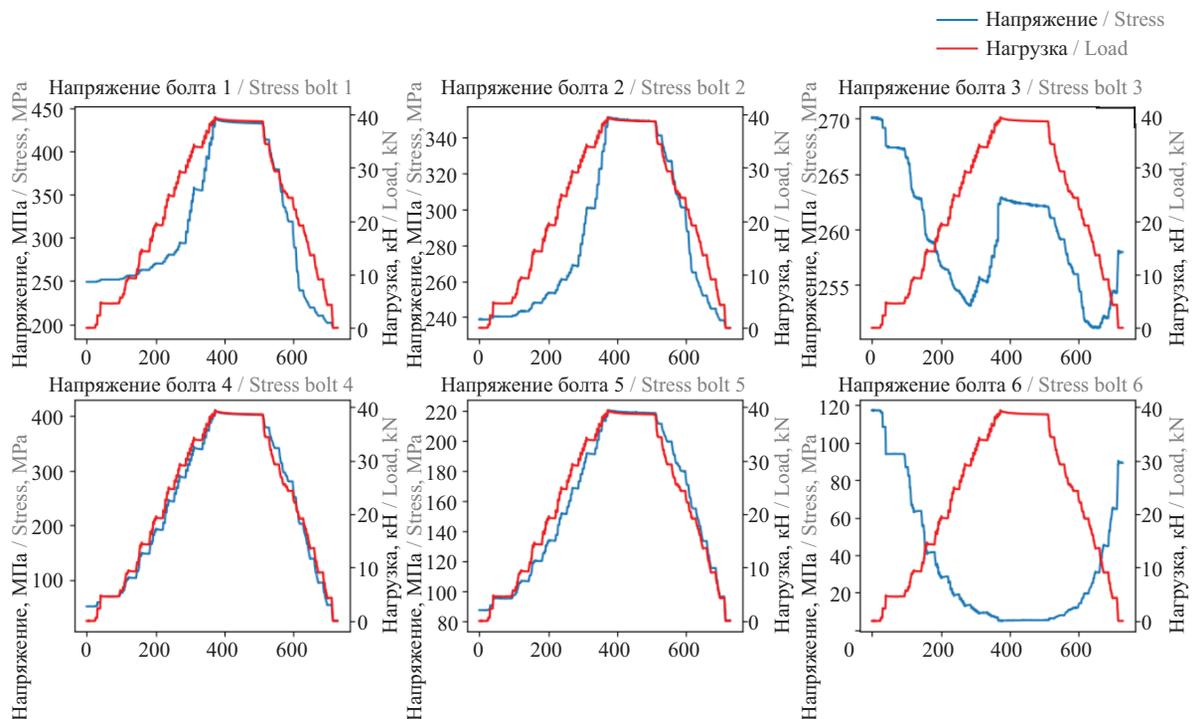


Рис. 14. Напряжения в болтах, второе испытание

Fig. 14. Bolt stresses, second test

Табл. 6. Напряжения в болтах до и после испытания, второе испытание

Table 6. Bolt stresses before and after test, second test

Номер болта Number of bolt	1	2	3	4	5	6
Предварительное напряжение, МПа Pre-tension, MPa	237,1	226,7	257,1	49,5	82,9	111,4
Напряжение при максимальной нагрузке, МПа Stress at maximum load, MPa	441,5	352,9	271,4	412,0	221,4	5
Остаточное напряжение, МПа Residual stress, MPa	197,1	235,2	259,2	25,8	81,3	89,6

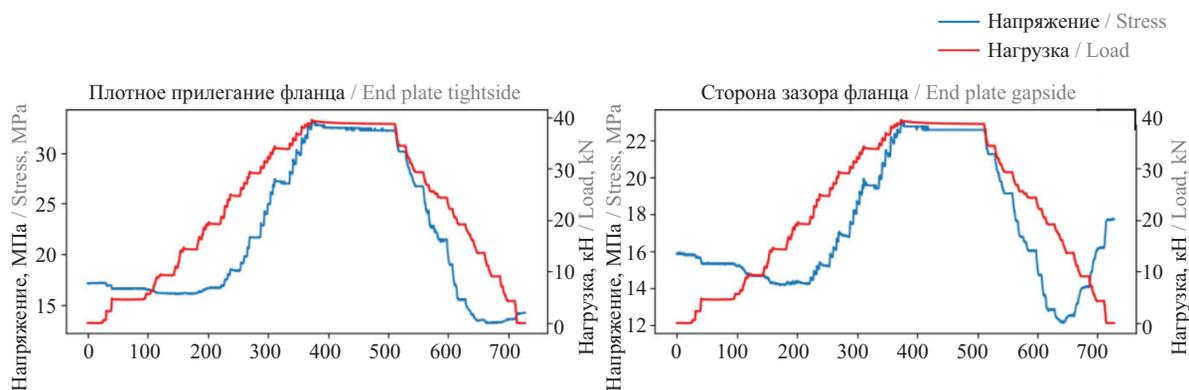


Рис. 15. Напряжения во фланце, второе испытание

Fig. 15. Flange stresses, second test

Табл. 7. Предварительное натяжение в болтах, третье испытание

Table 7. Pre-tensioning in bolts, third test

Номер болта Number of bolt	1	2	3	4	5	6
Усилие натяжения, кН Tension force, kN	17,9	14,7	13,0	12,7	12,5	14,3
Начальное напряжение, кН Initial stress, kN	170,5	140,0	123,8	121,0	119,0	136,2

значительно увеличились в 1,56–7,32 раза (болт № 2 и 4 соответственно). При этом большой рост напряжений в болте № 4 обусловлен малым значением преднатяжения на этапе, предшествующем приложению нагрузки на балку. После разгрузки напряжения в болтах растянутой зоны уменьшаются на 2–48 % (болт № 5 и 4 соответственно) по сравнению с начальным натяжением. Исключение составляет болт № 2, напряжение в котором увеличилось в сравнении с начальным состоянием на 4 %.

Так же, как и в первом эксперименте, прирост напряжений в болтах № 4, 5 со стороны зазора 1,8 мм практически совпадает с изменением нагрузки на балку. Болт № 3 аналогично первому испытанию имеет характерный участок смены направления роста напряжения, при этом более выраженный. Как и в первом испытании напряжения в болте № 3 уменьшаются в меньшей степени, чем в болте № 6. Так, напряжения в болте № 3 снизились при максимальной нагрузке на 3 %, а в болте № 6 произошло полное падение величины преднатяжения до нуля. После разгрузки снижение напряжений в болте № 6 сжатой зоны составило 20 %, для болта № 3 напряжение увеличилось на 1 % в сравнении с начальным значением.

На рис. 15 показаны зависимости напряжений во фланце при изменении нагрузки.

Для фланца характерно отсутствие снижения приведенного напряжения в обеих группах датчиков в сравнении с первым испытанием, так как по обе стороны болтов был сформирован зазор с раскрытием более 1 мм.

Третье испытание проведено с самым большим зазором с одной стороны фланца 4,7 мм. При этом с другой стороны на некоторых участках зазор составил до 1,4 мм. При сборке конструкции и формировании зазора были достигнуты следующие усилия предварительного натяжения в болтах (табл. 7).

Зазоры, сформированные во фланцевом соединении при проведении третьего испытания, показаны на рис. 16.



Рис. 16. Зазор 4,7 мм, третье испытание

Fig. 16. Gap 4.7 mm, third test

Табл. 8. Напряжения в болтах до и после испытания, третье испытание

Table 8. Bolt stresses before and after test, third test

Номер болта Number of bolt	1	2	3	4	5	6
Предварительное напряжение, МПа Pre-stress, MPa	170,5	140,0	123,8	121,0	119,0	136,2
Напряжение при максимальной нагрузке, МПа Stress at maximum load, MPa	525,9	228,2	0	412,0	37	0
Остаточное напряжение, МПа Residual stress, MPa	148,0	148,8	102,1	25,8	111,3	89,6

Нагрузка прикладывалась аналогично первому эксперименту с шагом 5 кН и кратковременной выдержкой. Предельное значение нагрузки — 30 кН. Разгрузка при этом проводилась ступенчато по 5 кН, так же, как и нагружение.

В табл. 8 и на рис. 17 представлены напряжения в болтах до и после третьего испытания.

Наличие зазора в районе болта № 1 привело к тому, что с самого начала загрузки балки напряжения в нем растут одновременно с ростом нагрузки. В районе болта № 2 имелся контакт фланца с полкой, поэтому он работает так же, как и в предшествующих испытаниях. Из-за большого зазора болт № 5 работает, как болт, расположенный в сжатой моментом зоне фланца. Это свидетельствует о неблагоприятном изменении характера работы соединения. Сжатая зона фланца увеличилась, она стала явно несимметричной, уменьшилось плечо пары сил между центром тяжести растянутых болтов и центром тяжести сжатой зоны фланца, а сама

пара сил стала работать не в вертикальной плоскости. Следствием таких неблагоприятных изменений стало уменьшение нагрузки до 30 кН при достижении предельных напряжений. Для болтов, в которых наблюдалось снижение преднапряжения, разность между начальным и конечным значением составила 7,3 кН для болта № 3, 2; 8 кН для болта № 5; 94,7 кН для болта № 6. В процессе испытания рост напряжений в болтах № 1, 2, 4 при действии максимальной нагрузки составил 208, 63 и 240 % соответственно. В болтах № 3, 6 произошло полное падение напряжений до нуля при действии максимальной нагрузки. В болте № 5 падение напряжений составило 69 %. После разгрузки напряжения во всех болтах, кроме болта № 2, уменьшились на 6–41 %. В болте № 2 напряжение увеличилось на 6 %.

На рис. 18 показаны зависимости напряжений во фланце при изменении нагрузки.

Развитие напряжений во фланце со стороны зазора происходит быстрее, чем в предыдущих ис-

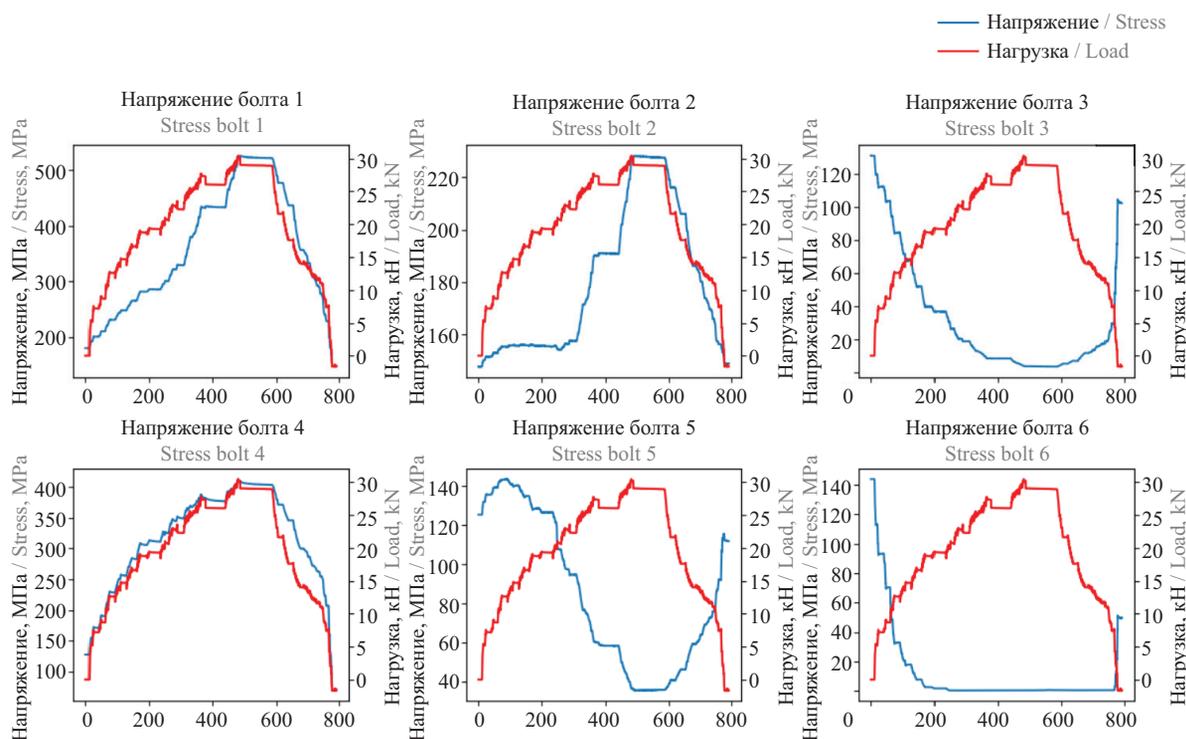


Рис. 17. Напряжения в болтах, третье испытание

Fig. 17. Bolt stresses, third test

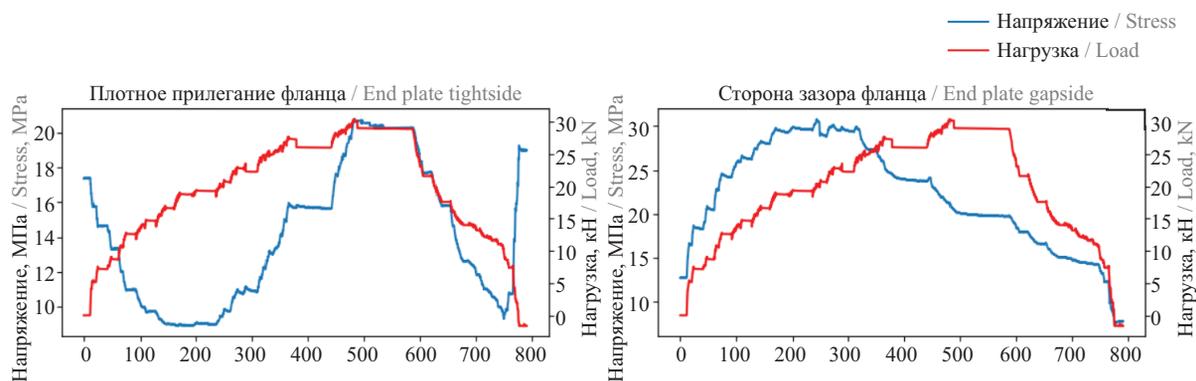


Рис. 18. Напряжения во фланце, третье испытание

Fig. 18. Flange stresses, third test

пытаниях. Особенностью напряжений со стороны максимального зазора является их уменьшение до начала снятия действующей на образец нагрузки. Со стороны плотного прилегания существенных отличий в характере работы не выявлено.

В табл. 9 представлены значения напряжений в болтах, которые конструктивно расположены в «растянутой» зоне фланцевого соединения. Напряжения в болтах первого испытания взяты при максимальной нагрузке этого испытания. Для второго и третьего испытаний напряжения в табл. 9 вычислены следующим образом. Полученные в результате испытаний напряжения корректировались умножением на поправочный коэффициент для второго испытания $35/40 = 0,875$, для третьего $35/30 = 1,167$. В указанных зависимостях 35, 40 и 30 кН соответственно максимальные нагрузки при первом, втором и третьем испытаниях. Это сделано для того, чтобы можно было оценить напряжения в болтах при одинаковых нагрузках. Кроме абсолютных значений, в табл. 9 представлены относительные величины напряжений по сравнению с первым испытанием и процент от суммы напряжений по всем болтам растянутой зоны.

Установлено выраженное смещение распределения напряжений в зону верхнего ряда болтов. Если для первого испытания разность между первым и вторым рядом составляет 6–17 %, то для вто-

рого и третьего испытаний эти значения составляют 20–46 % и 57–91 % соответственно. Для первого и второго испытаний характерно более равномерное распределение напряжений в растянутых болтах, чем при третьем испытании (параметр 3 табл. 9). Крайне неравномерное включение болтов в работу обусловлено наличием большого зазора, сильно влияющим на характер работы узла. При этом межгрупповая сумма напряжений в трех испытаниях различается не более чем на 10 %.

Экспериментально определено, что чем больше зазор, тем больше усилия в болтах. При этом максимальные значения возникают в болтах зоны плотного прижатия фланца к полке колонны. Такой характер распределения усилий является весьма опасным и может привести к разрушению сначала напряженных болтов зоны плотного прилегания, а затем после перераспределения усилий к разрушению болтов зоны зазора. В то же время при зазорах примыкания фланца к полке, соответствующих по величине зазорам 1–2 мм, обусловленным перекосом полок прокатных профилей или смещением колонн на монтаже, максимальные усилия в болтах (1-е и 2-е испытания) отличались мало. Экспериментальные исследования подтвердили работоспособность фланцевых соединений при зазорах больше нормативных, что является более благоприятными условиями для широкого применения фланцевых соединений.

Табл. 9. Напряжения в болтах «растянутой» зоны фланцевого соединения

Table 9. Stresses in the bolts of the “tensile” zone of the flange connection

Номер болта Bolt	Напряжения, МПа/%% от суммы Stresses, MPa/%% from the amount		
	1-е испытание First test	2-е испытание Second test	3-е испытание Third test
1	323/100/24	386/120/29	614/190/45
2	304/100/22	309/102/23	266/88/20
4	396/100/29	361/91/27	481/122/36
5	329/100/24	194/59/14	43/13/3
Суммарные напряжения Total stresses	1352/100/100	1250/—/92	1404/—/104

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ особенностей решаемых задач по учету влияния зазоров на работу фланцевых соединений, результаты численных расчетов фланцевых узлов и данных ранее проведенных исследований позволили разработать конструкцию экспериментальных образцов и установки для проведения многовариантных испытаний двух типов узлов при варьировании зазора между фланцем и полкой колонны. В ходе предварительных испытаний шпильки класса 8.8 определены механические характеристики стали шпильки. Подтверждена реализуемость установления напряжений в шпильке при помощи тензометрических датчиков, размещенных в прорезях, и достоверность получаемых данных.

На основании проведенных испытаний можно сделать следующие выводы:

- разработана модель экспериментального образца, предложен способ формирования начальных зазоров и метод снятия показаний с болтов, позволяющий учитывать сложное НДС;
- предложена методика определения зазора в районе оси болта, обусловленного перекосом полок и прокатных двутавров, и возможными смещениями колонн относительно разбивочных осей с учетом вероятностной природы монтажных неточностей;
- образец шпильки с учетом ослабления сечения под размещение тензодатчиков соответствует нормируемым прочностным характеристикам, предъявляемым к болтам класса 8.8;

- выбранная форма пазов позволяет разместить тензодатчики и выводящие провода без выхода за габариты болта по внешней резьбе, что обеспечивает сохранность датчиков и проводов во время проведения эксперимента, подтверждена достоверность результатов, получаемых с размещенных в пазах болта тензодатчиков, и возможность применения такого приема при испытаниях болтовых соединений;

- подтверждены теоретические предпосылки о характере работы болтов в заданной конфигурации — верхние ряды работают с увеличением растягивающих усилий, в то время как в нижнем ряду напряжения падают;

- выявлен характер работы болтов и фланцевой пластины балки в узле при наличии зазоров различной величины;

- установлено, что увеличение зазора ведет к росту напряжений в наиболее нагруженных болтах и может привести к изменению характера работы соседних болтов;

- обнаружено, что со стороны более плотного примыкания до некоторых значений нагрузки болты сохраняют способность работать с учетом преднапряжения и продольные усилия в них не изменяются, при этом болты со стороны зазора сразу же включаются в работу на растяжение;

- подтверждена работоспособность фланцевых соединений с зазорами до 2 мм, величина которых обусловлена перекосами полок или смещением колонн на монтаже.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Косенкова И.С., Егоров П.И. Сравнительный анализ узлов сопряжения стальной балки с колонной // Материалы 57-й студ. науч.-техн. конф. инженерно-строительного института ТОГУ. 2017. С. 150–154. EDN YTGEUL.

2. Добрачев В.М., Вершинин Д.С. Новое конструктивное решение жестких узлов стальных каркасов зданий // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2015. № 7 (679). С. 5–17. EDN UKQJWH.

3. Вершинин Д.С., Шабанов Е.А., Добрачев В.М. Исследование напряженно-деформированного состояния жестких узлов стальных каркасов зданий с предварительным напряжением на компьютерных моделях // Инновации и инвестиции. 2020. № 10. С. 193–198. EDN XGFBME.

4. Володин М.В., Катюшин В.В., Конин Д.В., Олуромби А.Р., Рычков С.П., Нормирование требований к проектированию и приемке фланцевых соединений на основании экспериментальных данных и расчетов // Строительная механика и расчет сооружений. 2020. № 1 (288). С. 62–73. EDN CBLPBA.

5. Сон М.П., Савич С.А., Землянухин А.Д., Шестаков А.П. Математическое моделирование фланцевых соединений в программном комплексе ANSYS // Международный научно-исследовательский журнал. 2017. № 6–3 (60). С. 164–167. DOI: 10.23670/IRJ.2017.60.081. EDN YTTIZJ.

6. 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 (33). С. 142–152. DOI: 10.15593/2409-5125/2019.01.10. EDN VXKZFU.

7. Кашевара Г.Г., Сон М.П., Землянухин А.Д. Сравнение несущей способности и деформативности фланцевых узлов примыкания балки к колонне при разных толщинах фланца // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. 2020. Т. 1. С. 44–49. EDN JRUIXN.

8. Сон М.П. Экспериментальные исследования прочности фланцевых соединений // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений.

2018. Т. 14. № 4. С. 348–356. DOI: 10.22363/1815-5235-2018-14-4-348-356. EDN UXZBEG.

9. Туснина В.М., Платонова В.Д. Численный анализ жесткости фланцевых узлов «балка – колонна» // Промышленное и гражданское строительство. 2020. № 9. С. 28–33. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.09.28-33. EDN ELLJF.

10. Elflah M.A.H. Structural behaviour of stainless steel bolted beam to column joints : thesis. University of Birmingham, 2018. URL: <https://etheses.bham.ac.uk/id/eprint/8545/9/Elflah18PhD.pdf>

11. Tartaglia R., D’Aniello M., Costanzo S., Landolfo R., De Martino A. Seismic design and performance of extended stiffened end-plate joints // *ce/papers*. 2017. Vol. 1. Issue 2–3. Pp. 570–579. DOI: 10.1002/cepa.94

12. Cassiano D., D’Aniello M., Rebelo C. Seismic behaviour of gravity load designed flush end-plate joints // *Steel and Composite Structures*. 2018. Vol. 26. Issue 5. DOI: 10.12989/scs.2018.26.5.621

13. Yoganata Y.S., Suswanto B., Iranata D., Irawan D. Analysis study of extended end plate connection due to cyclic load using finite element method // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 930. Issue 1. P. 012050. DOI: 10.1088/1757-899X/930/1/012050

14. Hasan M.J., Ashraf M., Uy B. Moment-rotation behaviour of top-seat angle bolted connections produced from austenitic stainless steel // *Journal of Constructional*

Steel Research. 2017. Vol. 136. Pp. 149–161. DOI: 10.1016/j.jcsr.2017.05.014

15. Luo L., Du M., Yuan J., Shi J., Yu S., Zhang Y. Parametric analysis and stiffness investigation of extended end-plate connection // *Materials*. 2020. Vol. 13. Issue 22. P. 5133. DOI: 10.3390/ma13225133

16. Pisarek Z. Calculation of the bolted end-plate joints subjected to two axis bending // *Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture*. 2013. Vol. 30. Issue 60. Pp. 219–229. DOI: 10.7862/rb.2013.27

17. Costa R., Valdez J., Oliveira S., da Silva L.S., Bayo E. Experimental behaviour of 3D end-plate beam-to-column bolted steel joints // *Engineering Structures*. 2019. Vol. 188. Pp. 277–289. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.03.017

18. Al-Rifaie A. Lateral impact responses of steel end plate beam-to-column connections : thesis. University of Liverpool, 2018. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/160276083.pdf>

19. Zhao D., Wang Z., Pan J., Wang P. Error analysis method of geometrically incomplete similarity of end-plate connection based on linear regression // *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10. Issue 14. P. 4812. DOI: 10.3390/app10144812

20. Luo L., Du M., Yuan J., Shi J., Yu S., Zhang Y. Parametric analysis and stiffness investigation of extended end-plate connection // *Materials*. 2020. Vol. 13. Issue 22. P. 5133. DOI: 10.3390/ma13225133

Поступила в редакцию 27 августа 2023 г.

Принята в доработанном виде 9 сентября 2023 г.

Одобрена для публикации 12 сентября 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: Александр Романович Туснин — доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой металлических и деревянных конструкций, директор института Промышленного и гражданского строительства; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 455914, Scopus: 6507367654, ORCID: 0000-0002-9997-9436; TusninAR@mgsu.ru;

Валерия Дмитриевна Платонова — аспирант кафедры металлических и деревянных конструкций; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; platonovaleria@yandex.ru.

Вклад авторов:

Туснин А.Р. — научное руководство, концепция исследования, развитие методологии, научное редактирование текста.

Платонова В.Д. — сбор и обработка материала, написание статьи, развитие методологии.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Kosenkova I.S., Egorov P.I. Comparative analysis of the coupling nodes of a steel beam with a column. *Materials of the 57th student scientific and technical conference of the Engineering and Construction Institute of TOGU*. 2017; 150-154. EDN YTGEUL. (rus.).

2. Dobrachev V.M., Vershinin D.S. New frame-parts engineering solutions for the steel frame of the building. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2015; 7(679):5-17. EDN UKQJWH. (rus.).

3. Vershinin D.S., Shabanov E.A., Dobrachev V.M. Research of stress-deformed state of rigid units of steel frames of buildings with preliminary voltage on computer models. *Innovations and Investments*. 2020; 10:193-198. EDN XGFBME. (rus.).
4. Volodin M.V., Katushin V.V., Konin D.V., Olurombi A.R., Rychkov S.P. Standardization of requirements for the design and acceptance of flange connections on the basis of experimental data and calculations. *Structural Mechanics and Analysis of Constructions*. 2020; 1(288):62-73. EDN CBLPBA. (rus.).
5. Son M.P., Savich S.A., Zemlyanukhin A.D., Shestakov A.P. Mathematical modeling of flange connections in ANSYS software complex. *International Research Journal*. 2017; 6-3(60):164-167. DOI: 10.23670/IRJ.2017.60.081. EDN YTTIZJ. (rus.).
6. Son M. Influence of mechanical characteristics of bolts on stress-strain state and behavior of flange connections of beams with columns. *PNRPU Bulletin. Urban development*. 2019; 1(33):142-152. DOI: 10.15593/2409-5125/2019.01.10. EDN VXKZFU. (rus.).
7. Kashevarova G.G., Son M.P., Zemlyanukhin A.D. Comparison of the bearing capacity and deformability of the flange units of the beam-to-column junction at different flange thicknesses. *Modern Technologies in Construction. Theory and Practice*. 2020; 1:44-49. EDN JRUIXN. (rus.).
8. Son M.P. Experimental studies of strength flanged connections. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2018; 14(4):348-356. DOI: 10.22363/1815-5235-2018-14-4-348-356. EDN UXZBEG. (rus.).
9. Tusnina V.M., Platonova V.D. Numerical analysis of the stiffness of the “beam-column” flange joints. *Industrial and Civil Engineering*. 2020; 9:28-33. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.09.28-33. EDN ELLLJF. (rus.).
10. Elflah M.A.H. *Structural behaviour of stainless steel bolted beam to column joints : thesis*. University of Birmingham, 2018. URL: <https://etheses.bham.ac.uk/id/eprint/8545/9/Elflah18PhD.pdf>
11. Tartaglia R., D’Aniello M., Costanzo S., Landolfo R., De Martino A. Seismic design and performance of extended stiffened end-plate joints. *ce/papers*. 2017; 1(2-3):570-579. DOI: 10.1002/cepa.94
12. Cassiano D., D’Aniello M., Rebelo C., Seismic behaviour of gravity load designed flush end-plate joints. *Steel and Composite Structures*. 2018; 26(5). DOI: 10.12989/scs.2018.26.5.621
13. Yoganata Y.S., Suswanto B., Iranata D., Irawan D. Analysis study of extended end plate connection due to cyclic load using finite element method. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 930(1):012050. DOI: 10.1088/1757-899X/930/1/012050
14. Hasan M.J., Ashraf M., Uy B. Moment-rotation behaviour of top-seat angle bolted connections produced from austenitic stainless steel. *Journal of Constructional Steel Research*. 2017; 136:149-161. DOI: 10.1016/j.jcsr.2017.05.014
15. Luo L., Du M., Yuan J., Shi J., Yu S., Zhang Y. Parametric analysis and stiffness investigation of extended end-plate connection. *Materials*. 2020; 13(22):5133. DOI: 10.3390/ma13225133
16. Pisarek Z. Calculation of the bolted end-plate joints subjected to two axis bending. *Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture*. 2013; 30(60):219-229. DOI: 10.7862/rb.2013.27
17. Costa R., Valdez J., Oliveira S., da Silva L.S., Bayo E. Experimental behaviour of 3D end-plate beam-to-column bolted steel joints. *Engineering Structures*. 2019; 188:277-289. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.03.017
18. Al-Rifaie A. *Lateral Impact Responses of Steel End Plate Beam-to-Column Connections: thesis*. University of Liverpool, 2018. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/160276083.pdf>
19. Zhao D., Wang Z., Pan J., Wang P. Error analysis method of geometrically incomplete similarity of end-plate connection based on linear regression. *Applied Sciences*. 2020; 10(14):4812. DOI: 10.3390/app10144812
20. Luo L., Du M., Yuan J., Shi J., Yu S., Zhang Y. Parametric analysis and stiffness investigation of extended end-plate connection. *Materials*. 2020; 13(22):5133. DOI: 10.3390/ma13225133

Received August 27, 2023.

Adopted in revised form on September 9, 2023.

Approved for publication on September 12, 2023.

BIONOTES: **Alexander R. Tusnin** — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Metal and Wooden Structures, Director of the Institute of Industrial and Civil Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 455914, Scopus: 6507367654, ORCID: 0000-0002-9997-9436; TusninAR@mgsu.ru;

Valeria D. Platonova — postgraduate student of the Department of Metal and Wooden Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; platonovaleria@yandex.ru.

Contribution of the authors:

Alexander R. Tusnin — supervision, conceptualization, methodology, scientific editing of the text.

Valeria D. Platonova — data gathering and processing, writing of the article, methodology.

The authors declare that there is no conflict of interest.