

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-3-30-39

**Василькин А.А.**

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

E-mail: vasilkinaa@mgsu.ru

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ФРИКЦИОННОГО СОЕДИНЕНИЯ ПРИ СРЫВЕ КОНТАКТНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

**Аннотация.** В современной практике соотношение действующей нагрузки и сдвига стальных фрикционных соединений оценивается на основе коэффициента трения и предварительного натяжения болтов. Коэффициент трения определяется экспериментально путем испытания стандартных образцов. Обычно предполагается линейная зависимость действующей нагрузки и сдвига. Для разработки более точных моделей болтовых стальных соединений важно понимать поведение стандартных образцов на всех этапах нагружения. В статье представлены результаты проведения экспериментального исследования на натурных образцах фрикционных соединений стальных пластин на сжатие. Представлены и проанализированы результаты испытаний. Проанализирована работа фрикционных соединений после срыва контактных поверхностей. На основании анализа полученных результатов выявлена зависимость нагрузка – сдвиг на этапе фрикционной работы соединения и после срыва контактных поверхностей. Для проведения испытаний изготовлено 15 моделей фрикционных соединений с двусторонней накладкой с использованием болтов М18, класса прочности 10.9, болтов М20 класса 10.9, болтов М24 класса 12.9. Поверхность пластин обработана пескоструйной обработкой. Для определения усилия сдвига пакета использовалась разрывная машина Instron 1000HDX.

**Ключевые слова:** фрикционное соединение, соединение с контролируемым натяжением болтов, болтовое соединение, коэффициент трения.

**Введение.** Одним из способов соединения стальных элементов ответственных конструкций, в том числе работающих под воздействием динамической нагрузки, является фрикционные соединения, когда несущая способность соединения обеспечена за счет силы трения между поверхностями соединяемых элементов [1,2].

В представленной статье поставлена задача уточнения поведения фрикционного соединения после сдвига пластин.

В отечественной методике расчета по предельным состояниям наступление предельного состояния по первой группе возникает при превышении действующей нагрузки несущей способности болтового соединения. Последующие этапы работы стыка не учитываются в работе соединения. В тоже время в литературе имеется достаточно исследований работы соединения после сдвига пластин.

Улучшенное понимание поведения при сдвиге может быть использовано при проектировании соединений для модульных зданий, которые обеспечивают соответствующие допуски при монтаже на месте и контролируют возможное суммарное смещение при проскальзывании [3]. Также, данный этап работы учитывают в работе болтовых соединений с отверстиями большого размера, для допуска при выполнении монтажных работ в качестве разъёмных соединений крупногабаритных сборных элементов с возможностью повторного использова-

ния элементов [4], экспериментах по усталостному истиранию и износу контактных поверхностей [5], при работе болтов на циклическую нагрузку [6]. Исследователи отмечают, что состояние контакта следует разделить на три типа: полное скольжение без области сцепления, незначительное скольжение без стабильной области сцепления и локальное скольжение со стабильной областью сцепления [7].

**Материалы и методы.** В настоящем исследовании используются образцы, собранные на болтах М18, М20, М24, в продолжение исследования автора [8], где для соединения элементов были использованы болты М14.

Кроме того, в отличие от [8] нагружение образцов выполняется путем сжатия пакета пластин, поскольку данное нагружение позволяет уменьшить металлоемкость соединения и использовать один болтокомплект. Данный способ нагружения также достаточно часто используется при исследовании работы фрикционных соединений [9].

Для проведения испытания было подготовлено три группы образцов по пять стыков в каждой группе, которые отличались между собой диаметром и классом прочности используемого высокопрочного болта.

Были использованы болты

- диаметр М18, класс прочности 10.9 – 5 стыков;
- диаметр М20, класс прочности 10.9 – 5 стыков;



Таблица 1

## Значения момента закручивания

Диаметр болта	Класс прочности болта	Усилие натяжения болта, кН	Коэффициент закручивания болта	Момент закручивания болта, Н·м
M18	10.9	140	0,17	428
M20	10.9	179	0,17	657
M24	12.9	318	0,17	1297

Согласно действующих норм СП 16.13330.2017. Свод правил. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81\*. Редакция 6 [2] расчетное усилие, которое может быть воспринято каждой плоскостью трения элементов, стянутых одним болтом с контролируемым натяжением, следует определять по формуле:

$$Q_{bh} = \frac{R_{bt} \cdot A_{bn} \cdot \mu}{\gamma_n} \quad (2)$$

где  $R_{bt}$  - расчетное сопротивление растяжению болта, определяемое согласно требованиям п. 6.5 СП.

По нормам значение  $R_{bt}$  определяется как 0,7 от нормативного сопротивления стали болта по пределу текучести.

Для класса прочности 10,9:  $R_{bun} = 1040$  МПа,  $R_{bt} = 0,7R_{bun} = 1040 \cdot 0,7 = 728$  МПа

Для класса прочности 12,9:  $R_{bun} = 1220$  МПа,  $R_{bt} = 854$  МПа.

$\mu = 0,58$  – коэффициент трения для пескоструйной обработки;

$\gamma_n = 1,12$  – коэффициент контроля натяжения болта по моменту

Болт M18 площадь болта нетто  $A_{bn} = 1,92$  см<sup>2</sup>

Болт M20 площадь болта нетто  $A_{bn} = 2,45$  см<sup>2</sup>

Болт M24 площадь болта нетто  $A_{bn} = 3,53$  см<sup>2</sup>

Максимальная несущая способность соединения

$$N_{max} = Q_{bh} \cdot k \cdot \gamma_b \cdot \gamma_c \cdot n$$

$k=2$  – количество плоскостей трения

$n=1$  – количество болтов

$\gamma_c = 1$  – коэффициент условия работы соединения

$\gamma_b = 0,8$  – при количестве болтов  $n < 5$

Итак, окончательно имеем несущую способность фрикционного соединения:

Соединение **Тип 1**, болт M18, класс прочности 10,9

$$Q_{bh} = \frac{R_{bt} \cdot A_{bn} \cdot \mu}{\gamma_n} = \frac{72,8 \cdot 1,92 \cdot 0,58}{1,12} = 72,3 \text{ кН}$$

$$N_{max} = Q_{bh} \cdot k \cdot \gamma_b \cdot \gamma_c \cdot n = 72,3 \cdot 2 \cdot 0,8 \cdot 1 \cdot 1 = 116 \text{ кН}$$

**Тип 2.** болт M20; класс прочности 10,9

$$Q_{bh} = \frac{72,8 \cdot 2,45 \cdot 0,58}{1,12} = 92,3 \text{ кН}$$

$$N_{max} = 92,3 \cdot 2 \cdot 0,8 \cdot 1 \cdot 1 = 147,8 \text{ кН}$$

**Тип 3.** болт M24; класс прочности 12,9

$$Q_{bh} = \frac{85,4 \cdot 3,53 \cdot 0,58}{1,12} = 156 \text{ кН}$$

$$N_{max} = 156 \cdot 2 \cdot 0,8 \cdot 1 \cdot 1 = 249,6 \text{ кН}$$

Испытания проводились в лаборатории испытаний строительных материалов, изделий и конструкций НИУ МГСУ.

Образцы испытаны на сжатие в разрывной машине Instron 1000HDX (рис. 2).

По результатам проведения испытаний были построены графики работы стыков пластин. Характерная форма графика представлена на рис. 3.

На графике (рис. 3) можно выделить следующие этапы работы соединения.

На участке А-Б происходит упругая деформация пластин от приложенной нагрузки, затем от точки Б до точки 1 появляются пластические деформации; точка 1 – максимальная несущая способность соединения за счет силы трения соединяемых поверхностей, после преодоления которой несущая способность снижается и после перемещения поверхностей трения на 0,2d остается практически без изменений.

Несущую способность соединения в точке 1, то есть момент исчерпания несущей способности соединения  $Q_{bh}$  предложено обозначать как срыв контактных поверхностей [15], что весьма точно отражает физический смысл работы стыка.

Результаты проведенных испытаний стыков представлены в таблице 2.

Как следует из представленных данных, все испытанные модели не достигли расчетного значения усилия сдвига, так что фактическая несущая способность соединения составила 0,35–0,45  $Q_{bh}$ .



Рис. 2. Испытание образцов на сжатие на разрывной машине Instron 1000HDX

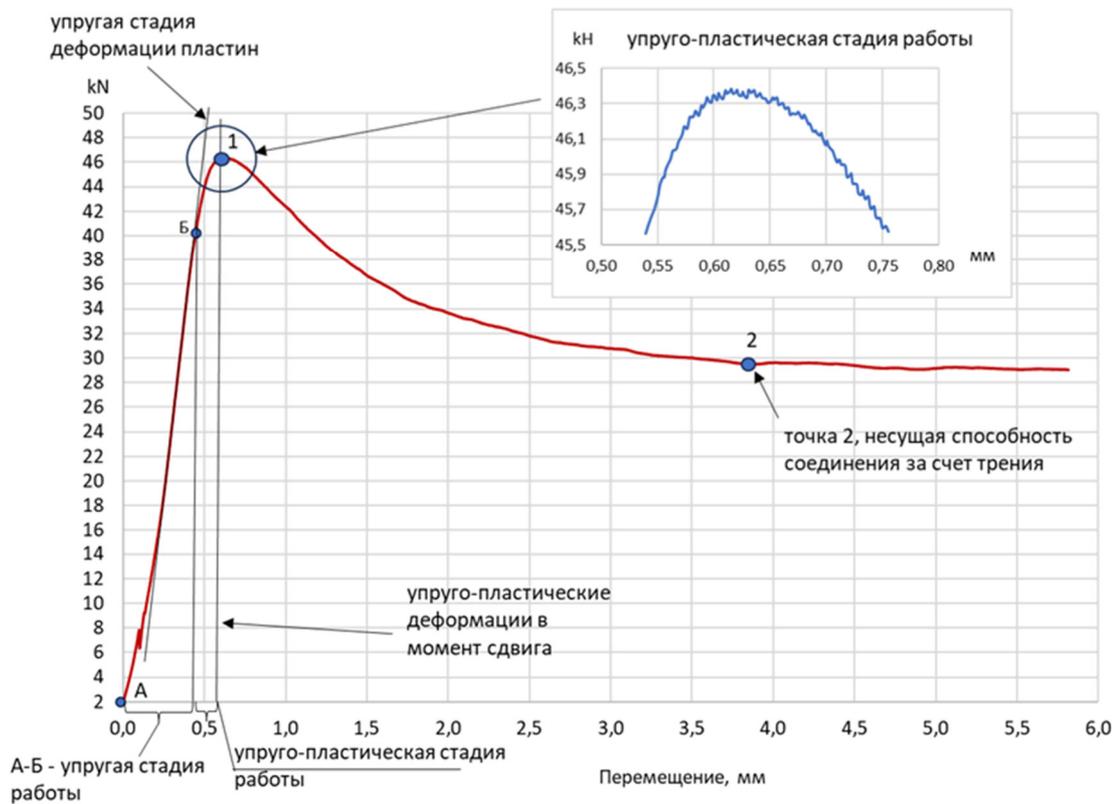


Рис. 3. Характерная диаграмма работы соединения

В отличие от исследования коллег [15] процесс срыва контактных поверхностей испытуемых стыков не сопровождался щелчками. Все 15 образцов после превышения усилия сдвига

плавно перемещались, что также отражают графики несущей способности, на которых изменение несущей способности происходит без резких перегибов.

Таблица 2

## Несущая способность образцов тип 1 (M18, 10.9), тип 2 (M20, 10.9), тип 3 (M24, 12.9)

Образец	Экспериментальное усилие сдвига, кН	Расчетная несущая способность соединения, кН	% от расчетной несущей способности	Значение перемещения, при котором произошел сдвиг, мм
1-2	82,1	116	70,78	1,66
1-3	83,6	116	72,07	0,93
1-4	53,0	116	45,69	2,42
1-5	65,0	116	56,03	2,76
2-1	53,7	147,8	36,4	0,76
2-2	68,4	147,8	46,3	1,66
2-3	59,7	147,8	40,4	0,97
2-4	50,9	147,8	34,4	0,79
2-5	66,1	147,8	44,7	0,81
3-2	184,5	249,6	73,92	2,78
3-3	152,8	249,6	61,22	2
3-4	185,5	249,6	74,32	2,89
3-5	204,9	249,6	82,09	3,5

В исследовании сдвиг происходит при 0,76 – 0,97 мм. За рубежом предложено считать начало сдвиг пластин при перемещении 0,15 мм [16].

После срыва контактных поверхностей несущая способность образцов не уменьшается до

нуля, поскольку перемещению препятствует коэффициент трения скольжения пластин. Полученные значения представлены в таблице 3 (точка 2 на графике 3).

Таблица 3

## Несущая способность моделей после срыва контактных поверхностей

Образец	Максимальное усилие сдвига, кН	Несущая способность соединения, N <sub>min</sub> , кН	Снижение несущей способности, %	Перемещение соответствующее N <sub>min</sub> , мм
1-2	82,1	44,4	37,7	
1-3	83,6	51,7	31,9	
1-4	53,0	–	–	
1-5	65,0	46	19	
2-1	53,7	37,4	30,4	3,5–0,76 = 2,74
2-2	68,4	65,5	4,2	2,3–1,66 = 0,34
2-3	59,7	28,9	51,6	5,5–0,97 = 4,53
2-4	50,9	–	–	–
2-5	66,1	56,4	14,7	2,5–0,81 = 1,19

Из представленных результатов следует, что несущая способность за счет трения скольжения составляет  $N_{\min} = 0,48–0,85$  несущей способности соединения  $N_{\max}$ .

Разброс несущей способности соединения для одинаковых болтов можно объяснить различным усилием натяжения болтов. По исследованиям зарубежных авторов распределение усилия натяжения болта имеет гауссовское распределение и может различаться до 30 % для одного момента затяжки [17].

В трех испытанных образцах несущая способность при перемещении пластин после точки 2 постепенно возрастает. Однако растет она

весьма полого и не дает никакого практического значения, поскольку при перемещениях даже в 7–8 мм несущая способность соединения за счет силы трения скольжения не превышает несущую способность соединения до сдвига. Как известно, фактическая разность в диаметрах отверстия и болта для высокопрочных болтов составляет 2–3 мм, то есть в момент, когда болт выберет зазор и упрется в пластину, несущая способность соединения будет существенно снижена.

График изменения несущей способности образцов **Тип 1** (M18, 10.9) представлена на рис. 4.

Несущая способность образцов **Тип 3** (M24, 12.9) представлена на рис. 5.

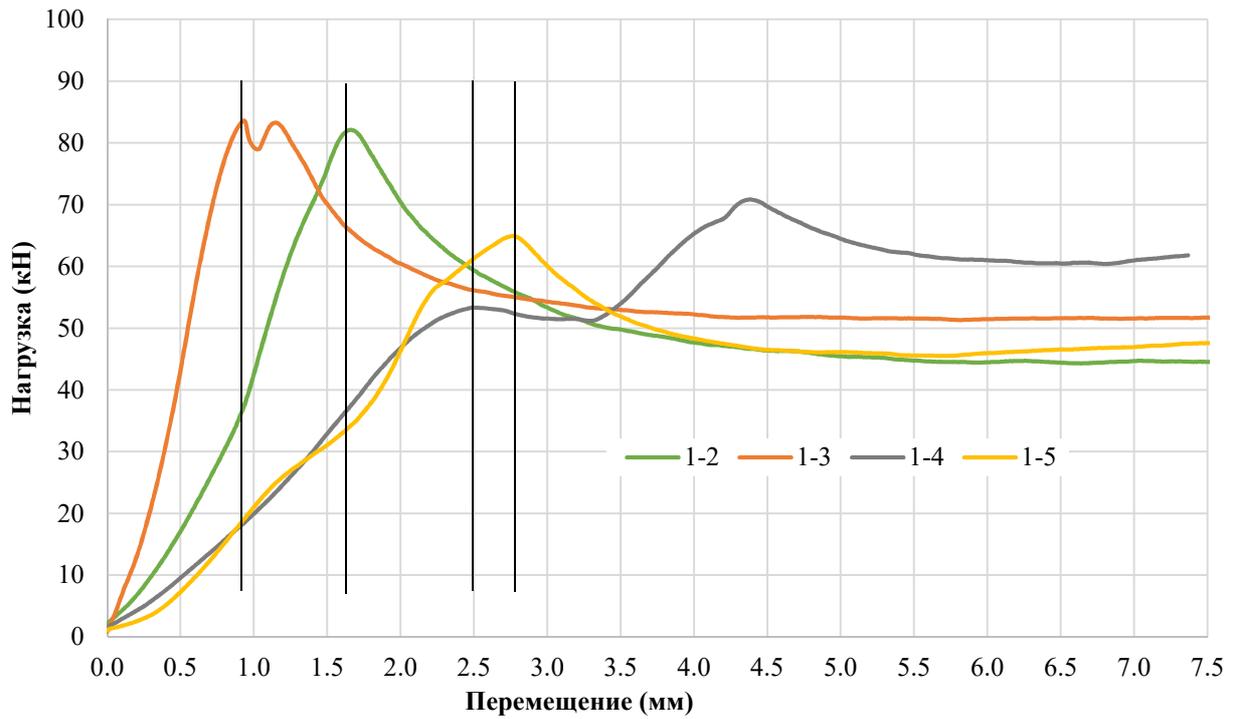


Рис. 4. Диаграмма работы образцов Типа 1

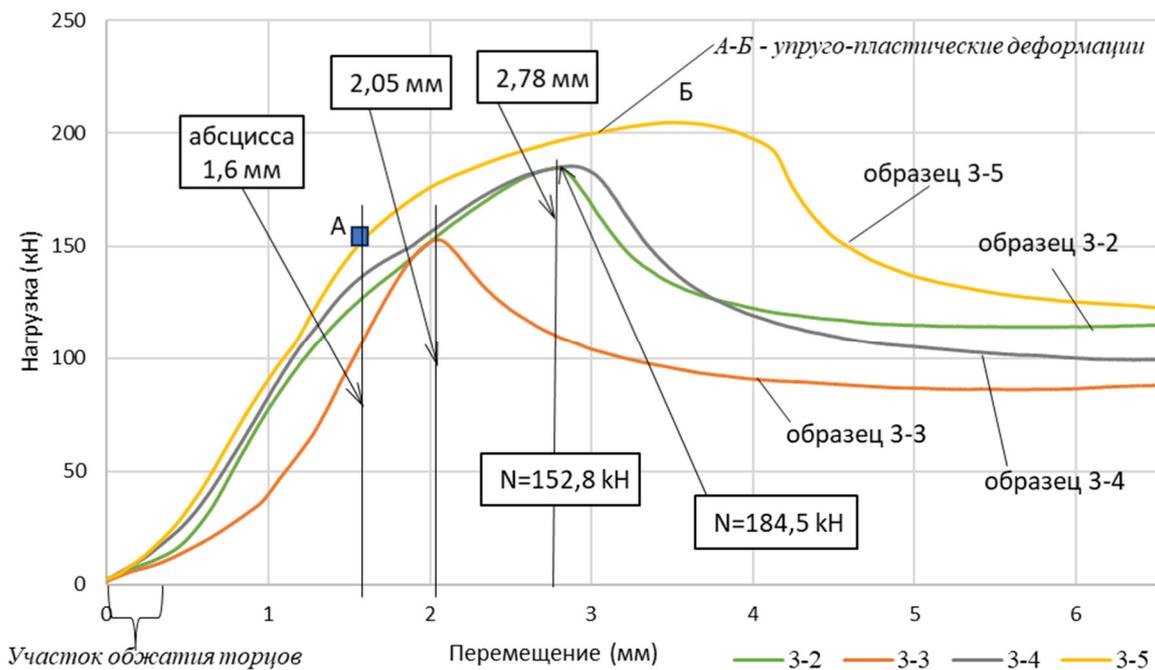


Рис. 5. Диаграмма работы образцы Типа 3

Разброс по несущей способности по образцам типа 3 лежит в пределах 10 %, за вычетом одного отбраковочного значения (образец 3-3).

Начальный участок на всех графиках выглядит как упруго-пластические деформации и видимо объясняется обжатием образцов из-за неточностей изготовления и сборки – непараллельность торцов пластин. Затем, на втором этапе работы – до ординаты 1,6 мм возникают упругие

деформации. Для образца 3-5 в точке А, а для образцов 3-2, 3-4 происходит изменение угла наклона кривой и очевидно переход к упруго-пластической работе образца. Данный вывод подкрепляется расчетом, откуда следует, что напряжения в элементах 3-2, 3-4, 3-5 превысили расчетное сопротивление стали и сталь начала пластически деформироваться.

Также видно, что образец 3-3 сначала имеет длинный участок предварительного обжатия (обмятия) – почти в 1 мм и затем, практически до абсциссы 2,05 мм работает упруго, то есть добавляется к перемещениям еще 1 мм и затем график достаточно резко (по сравнению с остальными образцами) идет вниз, то есть экстремум графика есть несущая способность фрикционного соеди-

$$\text{Образец 3-2. } \sigma = \frac{N}{A} = \frac{184,5}{6,2 \cdot 1} = 29,8 \text{ kH/cm}^2 > R_y \gamma_c = 24,5 \text{ kH/cm}^2$$

$$\text{Образец 3-3. } \sigma = \frac{N}{A} = \frac{152,8}{6,2 \cdot 1} = 24,6 \text{ kH/cm}^2 \approx R_y \gamma_c = 24,5 \text{ kH/cm}^2$$

$$\text{Образец 3-4. } \sigma = \frac{N}{A} = \frac{184,5}{6,2 \cdot 1} = 29,8 \text{ kH/cm}^2 > R_y \gamma_c = 24,5 \text{ kH/cm}^2$$

$$\text{Образец 3-5. } \sigma = \frac{N}{A} = \frac{204,5}{6,2 \cdot 1} = 33 \text{ kH/cm}^2 > R_y \gamma_c = 24,5 \text{ kH/cm}^2$$

Нагрузка, при которой пластина переходит в упруго-пластическую стадию работы

$$N = R_y \gamma_c \cdot A = 24,5 \cdot 6,2 = 152 \text{ kH}$$

Поскольку средняя пластины выступает на 7–10 мм и ее толщина также составляет 10 мм принимаем, что пластина работает на сжатие без потери устойчивости, поэтому коэффициент продольного изгиба не учитывается.

Наиболее ярко упруго-пластическая работа пластин в образцах видна в образце 3-5, где на участке между точками А и Б сталь образца работает упруго-пластически. Анализируя графики на рис 5 можно сказать, что выбранные размеры пластин в исследуемом стыке позволили экспериментально и графически подтвердить теоретические представления о работе образцов за пределами несущей способности по пределу текучести, когда несущая способность соединения за счет контролируемого натяжения болта превышает несущую способность самих стальных элементов.

В результате эксперимента фактическая несущая способность соединения оказалась значительно ниже расчетной несущей способности – 0,60–0,80  $Q_{bh}$ . При увеличении усилия натяжения болта несущая способность соединения становится наиболее близкой к теоретической.

Отличие теоретической и фактической несущей способности испытанных образцов можно объяснить использованием болтов с обычной головкой. В работе И.И.Ведякова, Д.В. Коница, П.В. Нахвальнова [15] обращается внимание на необходимость использования метизов с увеличенными размерами болтов и гаек и более низкие значения несущей способности соединений с обычными размерами головки.

**Выводы.** В соответствии с вышеуказанными методами и теорией работы фрикционных соединений была определена работа соединения

после срыва контактах поверхностей. Описано изменение несущей способности соединения для болтов с различным усилием натяжения с использованием высокоточного оборудования.

Расчетные напряжения в пластинах составили

после срыва контактах поверхностей. Описано изменение несущей способности соединения для болтов с различным усилием натяжения с использованием высокоточного оборудования.

Основные выводы заключаются в следующем.

Установлено, что фактическая несущая способность соединения для всех образцов существенно ниже теоретической несущей способности,  $Q_{bh}$ . вычисленное по СП 16.13330.2017. Стальные конструкции и составляет для Тип 1 – 0,56–0,72  $Q_{bh}$ ; Тип 2 – 0,35–0,45  $Q_{bh}$ ; Тип 3 – 0,61–0,82  $Q_{bh}$ .

Наблюдается значительный разброс несущей способности соединения (для болтокомплектов с одинаковым диаметром и классом прочности). Разброс несущей способности по образцам тип 1 в пределах 23 % с отбросом одного явно минимального значения; по образцам тип 2 в пределах 20 % и по образцам типа 3 лежит в пределах 10 %, также за вычетом одного отбраковочного значения.

После преодоления статического коэффициента трения и сдвига пластин в пределах овольного отверстия несущая способность фрикционного соединения снижается в пределах: для Тип 1:  $N_{\min} = 0,65–0,8 N_{\max}$ ; Тип 2:  $N_{\min} = 0,48–0,85 N_{\max}$ ; Тип 3 – 0,61–0,82  $N_{\max}$ ., после чего несущая способность преимущественно снижается или остается неизменной.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Проектирование металлических конструкций. Часть 1: «Металлические конструкции. Материалы и основы проектирования». Учебник для ВУЗов / Тихонов С., Алехин В., Беляева З. и др. под общей. ред. Туснина А.. М.: Издательство «Перо», 2020. 468 с.

2. СП 16.13330.2017. Свод правил. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81\*. Редакция 6.
3. Lacey W., Chen W., Hao H., Bi K. Experimental and numerical study of the slip factor for G350-steel bolted connections // Journal of Constructional Steel Research. 2019. Vol. 158. Pp. 576-590. DOI: 10.1016/j.jcsr.2019.04.012
4. Christoforidou A, Baskar A., Barelts E., Kavoura F., Pavlovic M. Fatigue performance of preloaded bolted connection with oversized holes. 2023. 6(3-4). DOI:10.1002/cepa.2447.
5. Jiao X., Cai L., Liu Z., Yang C., Zhao Y., Cheng Q. Effect of bolt relaxation on surface micro dynamic fatigue and wear // ACMME 2019. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 612. 032066. DOI:10.1088/1757-899X/612/3/032066.
6. Sabbagh A. B., Petkovski M., Pilakoutas K., Mirghaderi R. Cyclic behaviour of bolted cold-formed steel moment connections: FE modelling including slip // Journal of Constructional Steel Research. 2013. Vol. 80. Pp. 100–108.
7. Izumi S, Sakai S. Analytical modeling of the transverse load-displacement relation of a bolted joint with consideration of the mechanical behavior on contact surfaces. 2009. DOI:10.1115/PVP2009-77612.
8. Василькин А.А., Зубков Г.В., Прокаев С.А., Василькин И.А. Размер площадки трения фрикционного болтового соединения // Строительство: наука и образование. 2024. Т. 14. Вып. 1. С. 61–72. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.1.4
9. Соловьев Д.В., Конин Д.В., Коваленко А.И., Нахвальнов П.В. Исследование работы соединений на высокопрочных болтах // Сборник тезисов докладов. Международный строительный конгресс. 2023. С. 202–205
10. ГОСТ 32484.1-2013. Болтокомплекты высокопрочные для предварительного натяжения конструкционные. Общие требования. 2014.
11. СП 006-97. Устройство соединений на высокопрочных болтах в стальных конструкциях мостов. Трансстрой. М. 1998.
12. СТО НОСТРОЙ 2.10.76-2012. Болтовые соединения. Правила и контроль монтажа, требования к результатам работ. М.: ЦНИИПСК им. Мельникова, 2013, 57 с.
13. ГОСТ Р 70132-2022. Сборка болтовых соединений строительных металлических конструкций. Правила и контроль выполнения работ. 2022.
14. ГОСТ Р 52643-2006. Болты и гайки высокопрочные и шайбы для металлических конструкций. Общие технические условия. 2007.
15. Ведяков И.И., Конин Д.В., Нахвальнов П.В. Экспериментальное исследование фрикционных болтовых соединений из высокопрочных сталей // Промышленное и гражданское строительство. 2022. № 7. С. 24–33.
16. Poposka M., Petreski B., Cvetanovski P., Popovski D. Experimental procedure for slip factor determining at connections with preloaded bolts. 2014. 8. Pp. 37–43.
17. Jiao X., Cai L., Liu Z., Yang C., Zhao Y., Cheng Q. Effect of bolt relaxation on surface micro dynamic fatigue and wear // ACMME 2019. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol.612. 032066. DOI:10.1088/1757-899X/612/3/032066.

#### Информация об авторах

**Василькин Андрей Александрович**, кандидат технических наук, доцент кафедры металлических и деревянных конструкций E-mail: vasilkinaa@mgsu.ru. Национальный исследовательский «Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское ш., 26.

Поступила 03.10..2024 г.

© Василькин А.А. 2025

#### **Vasilkin A.A.**

National Research University Moscow State University of Civil Engineering (MGSU)

E-mail: vasilkinaa@mgsu.ru

### **EXPERIMENTAL STUDY OF THE SLIP FACTOR STEEL BOLTED CONNECTIONS**

**Abstract.** In modern practice, the ratio of the effective load and shear of steel friction joints is estimated based on the coefficient of friction and pre-tension of bolts. The coefficient of friction is determined experimentally by testing standard samples. A linear dependence of the effective load and shear is usually assumed. In order to develop more accurate models of bolted steel joints, it is important to understand the behavior of standard samples at the initial stage of loading. An experimental study was carried out on full-scale samples of friction joints of steel plates for compression. The test results are presented and analyzed. The work of friction joints after the breakdown of the contact surfaces is analyzed. Based on the analysis of the results obtained, the load –shift dependence was revealed at the stage of friction operation of the joint and after the

*breakdown of the contact surfaces. For testing, 15 full-scale joints of friction joints with a double-sided lining were made using M18 bolts, strength class 10.9, M20 bolts of class 10.9, M24 bolts of class 12.9, the surface of the plates was sandblasted. The Instron 1000HDX breaking machine was used to determine the shear force of the package.*

**Keywords:** *coefficient of static friction, steel high-strength bolted connection; faying surface slip.*

## REFERENCES

1. Design of metal structures. Part 1: Metal structures. Materials and fundamentals of design. Textbook for universities [Proektirovanie metallicheskikh konstrukcij. Chast' 1: «Metallicheskie konstrukcii. Materialy i osnovy proektirovaniya». Uchebnik dlya VUZov] Tihonov S., Alekhin V., Belyaeva Z. i dr. pod obshchej. red. Tushina A. Moscow. Pero. 2020, 468 p. (rus)
2. SP 16.13330.2017. A set of standards. Steel structures. Updated version of SNiP II-23-81\*. Edition 6. [SP 16.13330.2017. Svod pravil. Stal'nye konstrukcii. Aktualizirovannaya redakciya SNiP II-23-81\*. Redakciya 6.] (rus)
3. Lacey W., Chen W., Hao H., Bi K. Experimental and numerical study of the slip factor for G350-steel bolted connections. Journal of Constructional Steel Research. 2019. Vol. 158. Pp. 576-590. DOI: 10.1016/j.jcsr.2019.04.012
4. Christoforidou A, Baskar A., Bareltis E., Kavoura F., Pavlovic M. Fatigue performance of preloaded bolted connection with oversized holes. 2023. 6(3-4). DOI: 10.1002/cepa.2447.
5. Jiao X., Cai L., Liu Z., Yang C., Zhao Y., Cheng Q. Effect of bolt relaxation on surface micro dynamic fatigue and wear. ACMME 2019. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 612. 032066. DOI: 10.1088/1757-899X/612/3/032066.
6. Sabbagh A. B., Petkovski M., Pilakoutas K., Mirghaderi R. Cyclic behaviour of bolted cold-formed steel moment connections: FE modelling including slip. Journal of Constructional Steel Research. 2013. Vol. 80. Pp. 100–108.
7. Izumi S, Sakai S. Analytical modeling of the transverse load-displacement relation of a bolted joint with consideration of the mechanical behavior on contact surfaces. 2009. DOI: 10.1115/PVP2009-77612.
8. Vasil'kin A., Zubkov G., Prokaev S., Vasil'kin I. The size of the friction pad of the friction bolt connection [Razmer ploshchadki treniya frikcionnogo boltovogo soedineniya]. Construction: science and education. 2024. Vol. 14. No. 1. Pp. 61–72. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.1.4 (rus)
9. Solov'ev D.V., Konin D.V., Kovalenko A.I., Nahval'nov P.V. Investigation of the work of joints on high-strength bolts. [Issledovanie raboty soedinenij na vysokoprochnyh boltah]. Collection of abstracts. International Construction Congress. 2023. Pp. 202–205. (rus)
10. GOST 32484.1-2013. Bolt sets are high-strength structural for prestressing. General requirements [Boltokomplekty vysokoprochnye dlya predvaritel'nogo natyazheniya konstrukcionnye. Obshchie trebovaniya.] 2014. (rus)
11. STP 006-97. The device of connections on high-strength bolts in steel structures of bridges. Transstroy [Ustrojstvo soedinenij na vysokoprochnyh boltah v stal'nyh konstrukciyah mostov]. Transstroj. Moscow. 1998. (rus)
12. STO NOSTROJ 2.10.76-2012. Bolted connections. Rules and control of installation, requirements for the results of work [Boltovye soedineniya. Pravila i kontrol' montazha, trebovaniya k rezul'tatam rabot]. Moscow. CNIIPSK im. Mel'nikova. 2013. 57 p. (rus)
13. GOST P 70132-2022. Assembly of bolted joints of building metal structures. Rules and control of work performance [Sborka boltovyh soedinenij stroitel'nyh metallicheskikh konstrukcij. Pravila i kontrol' vypolneniya rabot]. 2022. (rus)
14. GOST P 52643-2006. Bolts and nuts vysokoprochnye and shajby dlya metallicheskikh konstrukcij. Obshchie tekhnicheskie usloviya [Bolty i gajki vysokoprochnye i shajby dlya metallicheskikh konstrukcij. Obshchie tekhnicheskie usloviya]. 2007. (rus)
15. Vedyakov I., Konin D., Nahval'nov P. Experimental study of friction bolted joints made of high-strength steels [Eksperimental'noe issledovanie frikcionnyh boltovyh soedinenij iz vysokoprochnyh stalej]. 2022. Vol.7. Pp. 24-33. (rus)
16. Poposka M., Petreski B., Cvetanovski P., Popovski D. Experimental procedure for slip factor determining at connections with preloaded bolts. 2014. 8. Pp. 37–43.
17. Jiao X., Cai L., Liu Z., Yang C., Zhao Y., Cheng Q. Effect of bolt relaxation on surface micro dynamic fatigue and wear. ACMME 2019. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol.612. 032066. doi:10.1088/1757-899X/612/3/032066.

### Information about the authors

**Vasilkin Andrey A.** PhD. E-mail: vasilkinaa@mgsu.ru. National Research "Moscow State University of Civil Engineering" (NRU MGSU), 129337, Moscow, Yaroslavskoe sh., 26.

*Received 03.10.2024*

**Для цитирования:**

Василькин А.А. Экспериментальное исследование работы фрикционного соединения при срыве контактных поверхностей// Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 3. С. 30–39. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-3-30-39

**For citation:**

Vasilkin A.A. Experimental study of the slip factor steel bolted connections. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 3. Pp. 30–39. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-3-30-39