

DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-5-19-31

**\*Василькин А.А., Зубков Г.В.***Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет**\*E-mail: vasilkinaa@mgsu.ru*

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ УГЛА ПОВОРОТА ГАЙКИ ДЛЯ НАТЯЖЕНИЯ ВЫСОКОПРОЧНЫХ БОЛТОВ

**Аннотация.** Сдвигоустойчивое соединение на высокопрочных болтах и болтокомплектах является соединением с контролируемым натяжением, поскольку надежное обеспечение заданного усилия натяжения необходимо для того, чтобы гарантировать проектную работу соединения. Известно несколько способов контроля усилия натяжения болтов, однако в настоящее время регламентирован и используется на практике только один – по моменту закручивания. Использование иных методов контроля предварительного натяжения болтов может добиться повышения надежности соединений, в которых применяются болты с контролируемым натяжением, и отменить необходимость тарировки динамометрических ключей, проведения испытаний по определению коэффициента закручивания. В статье представлено экспериментальное определение угла закручивания для обеспечения расчетного усилия натяжения высокопрочных болтов диаметров М16, М20 и М24, класса прочности 10.9 в лабораторных условиях. Разработана экспериментальная установка, с помощью которой проведено исследование контролируемого натяжения болтов. Определена зависимость между углом поворота гайки, моментом закручивания и усилием натяжения болта. Проведена обработка полученных результатов.

**Ключевые слова:** *фрикционное соединение, сдвигоустойчивое соединение, контроль усилия натяжения болта, высокопрочный болт, угол поворота болта*

**Введение.** При исследовании действительной работы строительных конструкций уделяется большое внимание уточнению работы соединений и стыков элементов строительных конструкций [1–5], а также разработке новых способов соединений [6, 7].

Среди отечественных работ, посвященных соединениям стальных конструкций [8, 9], имеются исследования по соединению тонкостенных элементов [10, 11], изучению работы соединений с использованием как обычных [12–14], так и высокопрочных болтов [15–19]. Известны исследования работы фрикционных соединений, выполненные в НИЦ Строительство, под руководством Ивана Ивановича Ведякова, [20–22] и НИУ МГСУ по экспериментальному исследованию работы болтовых соединений [23–25].

Зарубежные ученые также проводят многочисленные экспериментальные исследования различных аспектов работы фрикционных соединений: влияние способа обработки соединяемых поверхностей, релаксация предварительного натяжения болта, соединение нержавеющей сталей [26–29].

Как известно, достижение высокопрочными болтами в соединении заданного усилия натяжения необходимо для обеспечения его проектной несущей способности [22, 24]. В нормативной документации, применяемой в России, регламентированы два способа обеспечения проектного усилия натяжения болтов – затяжкой до расчетного момента закручивания и поворотом гаек на заданный угол [30].

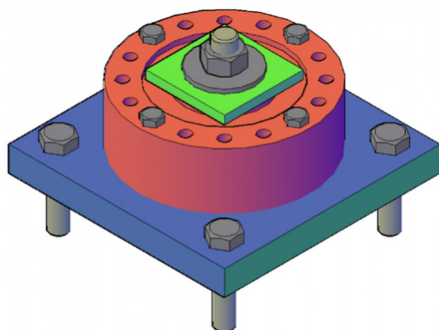
Метод контроля усилия натяжения по моменту закручивания зарекомендовал себя как надежный метод и повсеместно используется на практике, однако требует наличия мощных и дорогостоящих динамометрических ключей и проведение их ежедневной тарировки перед выполнением работ на строительной площадке.

Работы, посвященные исследованию метода контроля усилия натяжения по углу поворота гайки, существуют в значительно меньшем объеме, а в нормативной документации [30] отсутствуют указания по его использованию для большей части ряда диаметров болтов, за исключением болтов М24 класса прочности 10.9. Данный метод позволяет надежно обеспечить достижение в процессе натяжения болтов проектного усилия, исключает влияние на это усилие коэффициента закручивания, дает возможность исключить из технологического процесса монтажа процедуры тарировки динамометрических ключей и экспериментального определения среднего значения коэффициента закручивания каждой партии болтов.

Целью настоящего исследования является экспериментальное определение угла поворота высокопрочных болтов класса прочности 10.9 диаметров М24, М20, М16 для обеспечения расчетного усилия натяжения болта. Определение и анализ зависимости между углом поворота гайки, моментом закручивания и усилием в теле болта позволит расширить область применения метода контроля натяжения болтов по углу поворота гайки.

**Материалы и методы.** Экспериментальное исследование проводилось в лаборатории испытаний строительных материалов, изделий и конструкций НИУ МГСУ. В процессе проведения эксперимента выполнялось натяжение 15 болтов М24, М20, М16 (по 5 образцов каждого диаметра) класса прочности 10.9 по ГОСТ Р 52644-2006 длиной 150 мм. Толщина пакета, образованного испытательной установкой, составила 110 мм (между шайбами) для всех диаметров болтов, что составляет для М24 –  $4,8d$ , М20 –  $5,5d$ , М16 –  $6,8d$ . Для определения усилия натяжения болта использовался тензодатчик Load Cell DYLF 102 50Т, измеряющий усилие в диапазоне от 0 до 500 кН, с относительной погрешностью при измерении 0,05 %.

Экспериментальная установка для натяжения болтов представлена на рисунке 1. Она состоит из опорной пластины размером  $260 \times 260$  мм, толщиной 30 мм, выполненной из стали



С345, которая прикреплена к массивному неподвижному основанию (силовой раме) четырьмя болтами М20 класса прочности 10.9 через стальные прокладки, обеспечивающие необходимый зазор для размещения головки болта. Для проведения эксперимента изготовлено 3 пластины, отличающихся диаметром посадочного отверстия, для испытания болтов трех различных диаметров.

Для измерения угла поворота ключа на силовую раму устанавливался циферблат (транспортер). К опорной пластине с помощью двух болтов М12 прикреплён предварительно откалиброванный тензодатчик. На верхнюю плоскость датчика нагрузки установлена распределительная квадратная шайба размером толщиной 10 мм из стали С245.

При разработке установки была предварительно разработана 3-D модель для проверки возможности монтажа на силовой раме (см. рис. 1).

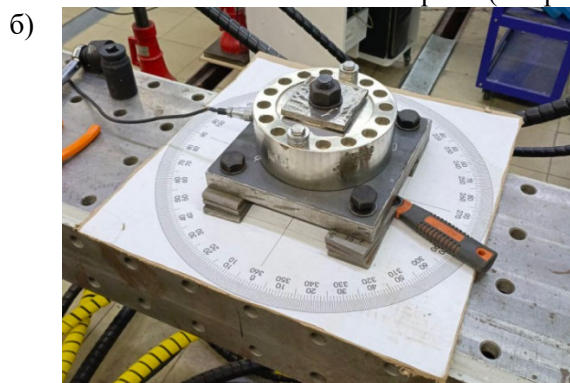


Рис. 1. Экспериментальная установка:  
а – 3-D модель; б – установка в сборе

Установка была разработана таким образом, чтобы обеспечить надёжную фиксацию элементов, исключить вращение болта в начальной фазе испытания (головка болта фиксировалась от перемещения ключом), а также обеспечить точную передачу нагрузки через опорную пластину. Особое внимание было уделено центровке элементов, учёту геометрии головки болта и установке измерительной аппаратуры.

Подготовка к процедуре натяжения болтов проводилась в соответствии с указаниями СП 70.13330.2012 [30]. Болты, гайки и шайбы были расконсервированы и выдержаны в смеси из 70–75 % неэтилированного бензина и 30–25 % минерального масла по ГОСТ Р 51634.

Для натяжения болта и определения угла закручивания использовалось два динамометрических ключа. Для диапазона начальных моментов 60–360 Н·м применялся динамометрический ключ USAG с длиной рукоятки 0,5 м. Второй ключ

NORGAU, с длиной рукоятки 2 м и максимальным моментом закручивания 2000 Н·м, использовался для натяжения болта на момент более 400 Н·м (рис. 2). Перед проведением эксперимента ключи тарировались в соответствии с требованиями ГОСТ 33530-2015 «Ключи моментные. Общие технические условия».

Для определения угла закручивания на ключ закреплялся лазерный дальномер и направлялся на бумажный транспортер; угол отмечался до начала затяжки и фиксировался после щелчка динамометрического ключа о достижении заданного момента, что снижало погрешности визуальной оценки (см. рис. 3). Усилие, возникающее в болте, регистрировалось тензодатчиком Load Cell DYLF 102 50Т и передавалось на универсальный цифровой индикатор ТС-32К с отображением на экране, что обеспечивало возможность непрерывной записи усилия натяжения (см. рис. 4).

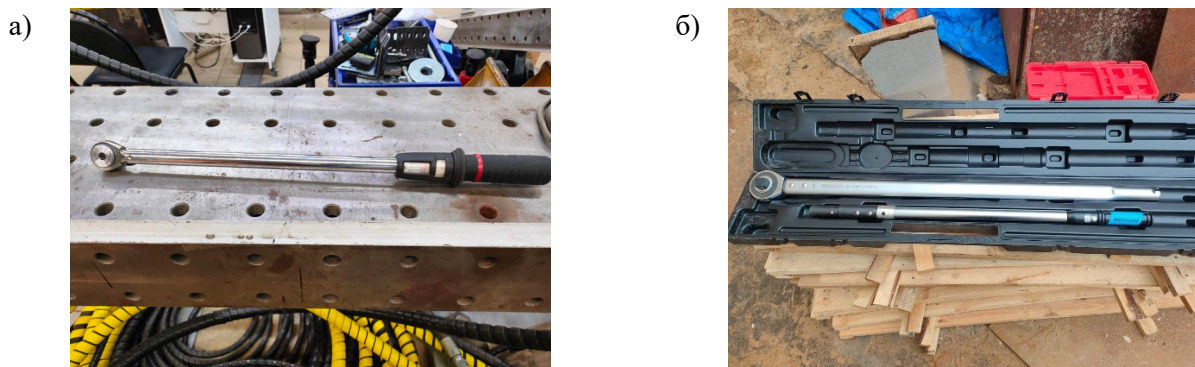


Рис. 2. Использование динамометрических ключей:  
а – ключ USAG для моментов 40–360 Н·м; б – ключ NORGAW 400–2000 Н·м

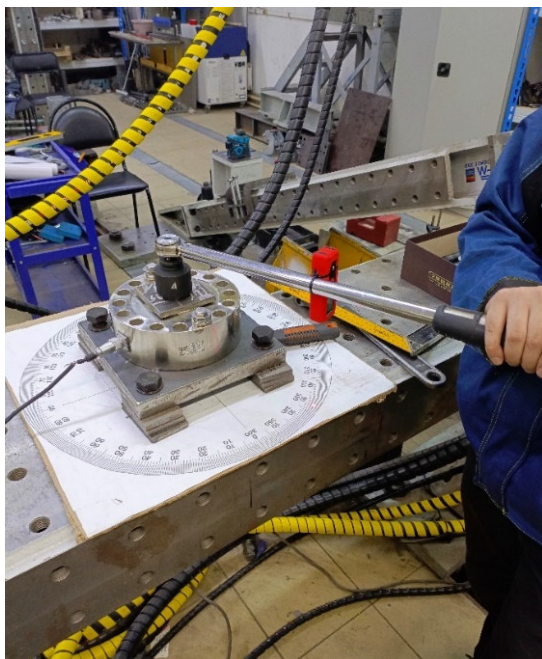


Рис. 3. Снятие показаний угла поворота ключа



Рис. 4. Цифровой индикатор ТС-32К

Дальнейшее натяжение болта происходило в следующем порядке:

1. Закручивание гайки вручную, без использования инструментов с максимально возможным усилием.

2. На динамометрическом ключе выставлялось значение момента закручивания, в дальнейшем момент увеличивался с определенным шагом.

3. Фиксирование начального значения угла между рукояткой ключа и нулевым делением на специально изготовленном циферблате. На первом шаге натяжения начальное значение угла фиксировалось при возрастании усилия в болте со стартового значения в 60–100 кг.

4. Осуществлялось натяжение болта на выставленный момент закручивания до щелчка. Поворот ключа проводился плавно, без рывков.

5. После щелчка ключа о достижении установленного момента фиксировался конечный угол закручивания. Конечный угол фиксировался при положении ключа «в натяг», при воздействии на рукоятку ключа силы, соответствующей необходимому моменту закручивания.

6. Снятие показаний с индикатора ТС-32К о достигнутом усилии натяжения болта (рис. 5).

Для определения угла закручивания на ключ закреплялся лазерный дальномер и направлялся на бумажный транспортир; угол отмечался до начала затяжки и фиксировался после щелчка динамометрического ключа о достижении заданного момента, что снижало погрешности визуальной оценки (см. рис. 3). Усилие, возникающее в болте, регистрировалось тензодатчиком Load Cell DYLF 102 50T и передавалось на универ-

сальный цифровой индикатор ТС-32К с отображением на экране, что обеспечивало возможность непрерывной записи усилия натяжения (см. рис. 4).

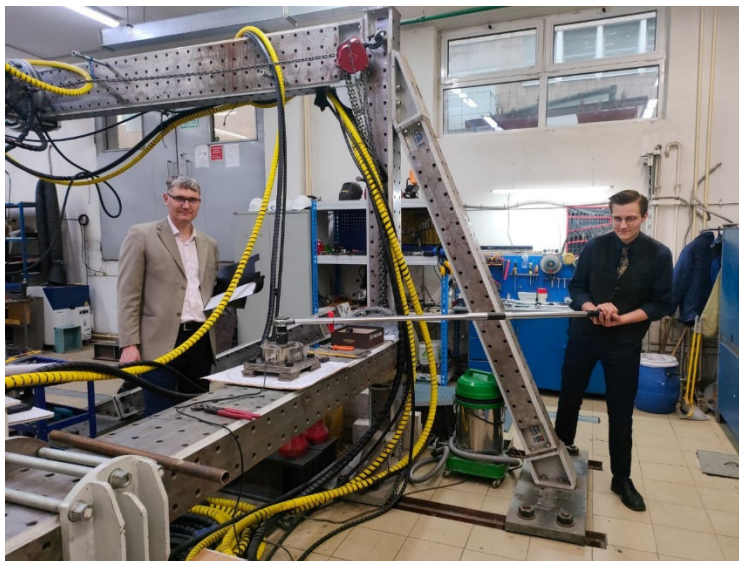


Рис. 5. Процедура натяжения высокопрочного болта

Таким образом, процесс натяжения болта был разбит на шаги, на каждом из которых фиксировались крутящий момент, приложенный к гайке, угол ее поворота относительно начального положения и усилие в болте. Шаг увеличения крутящего момента был выбран таким образом, чтобы расчетный момент, определенный согласно указаниям СП 70.13330.2012 при коэффициенте закручивания, равном 0,17, достигался за 10 шагов. Расчетные усилия для болтов определялись в соответствии с указаниями СП 16.13330.2017.

Расчетное усилие натяжения для болтов М24 класса прочности 10.9 составляет 257,0 кН, для болтов М20 – 178,4 кН, для болтов М16 – 114,3 кН. Расчетный момент закручивания для болтов М24 составляет 1048,5 Н·м, для болтов М20 – 606,4 Н·м, для болтов М16 – 310,8 Н·м.

**Основная часть.** Таблица 1 отображает снятие результатов эксперимента для образца диаметром М24. Момент закручивания болта меняется вручную с шагом в 100 Н·м, каждому значению момента закручивания соответствует угол поворота ключа до достижения установленного момента. В применяемых моделях динамометрических ключей момент закручивания устанавливается на рукоятке ключа, достижение момента сигнализируется громким щелчком. После достижения искомого (установленного на ключе) момента брался отсчет по прибору ТС-32К и определялось усилие натяжения болта. При данном методе исследования было превышено расчетное усилие натяжения болта Р. Так, для болта М24 значение Р составляет 257 кН = 26214 кг. Из

табл. 1 видно, что при  $M=1500$ , усилие натяжения составило 23500 кг, при следующем моменте равном 1600 Н·м, уже 28000 кг.

После выполнения первого цикла эксперимента с болтами М24 и анализа полученных результатов было обращено внимание на данную проблему. Поэтому на следующих этапах эксперимента при работе с болтами М20 и М16 порядок натяжения болта был изменен.

Таблица 1

Результаты эксперимента болт №2 М24х150

Момент	Усилие	Угол закручивания ключа, градусов
200	3658	0
300	5212	10
400	7100	22
500	8800	30,5
600	10880	39
700	12540	48
800	14500	58
900	16500	67,5
1000	18800	78,5
1100	19200	81,5
1200	22500	96
1300	22700	98,5
1400	23150	103,5
1500	23500	104,5
1600	28000	143,5

На подготовительном этапе эксперимента было принято значение коэффициента закручивания равным 0,17, вычислен момент закручивания и соответственно имелся ориентир по теоре-

тическому моменту закручивания, чтобы не превысить расчетное усилие натяжения и соответствующий искомый угол закручивания. Далее, при закручивании болта внимание акцентировалось на показаниях прибора цифрового индикатора ТС-32К. При приближении показаний прибора к значению расчетного усилия натяжения болта один исследователь закручивал болт ключом, второй снимал показания на цифровом индикаторе, третий человек следил за отсчетом угла на транспорте. При достижении на индикаторе значения расчетного усилия натяжения подавался сигнал и в этот момент снимались показания по углу поворота на транспорте. Из-за того, что физически тяжело затягивать болт М20 и тем более М24, один человек не мог плавно закручивать болт и отслеживать угол в момент сигнала.

На графике, представленном на рис. 3 и в таблице 1, можно увидеть, что у образца № 2 в диапазоне момента закручивания 1200–1300 Н·м изменение усилия натяжения произошло всего на 200 кг при изменении угла поворота на 2,5°. Было предположено, что в данный момент происходила пластическая деформация болта, когда момент существенно увеличился, а усилие натяжения мало возросло. Однако, в таком случае был бы логичен значительный угол поворота ключа (как это бывает при пластической деформации или срыве резьбы, когда ключ поворачивается на большой угол, а усилие натяжения в болте не возрастает), чего не происходило. Получается, что нужно приложить значительную силу (значительный момент), чтобы хоть немного затянуть

болт (что показывает небольшой угол). Возможно, это объясняется тем, что в данном месте болта имеется дефект резьбы болта, который тяжело «пройти» гайке. По-видимому, на практике может сложиться ситуация, когда болт с подобным дефектом будет закручен на расчетный момент, который определит проектировщик, однако из-за проблем с резьбой не будет достигнуто необходимое усилие натяжения болта. Данное наблюдение важно для понимания особенностей процесса натяжения болта и было выявлено в результате анализа полученных данных натурального эксперимента. Данный эффект проявился в одном из пяти исследуемых болтов (что составило 20 %), то есть в реальном узле тяжелой стальной конструкции с сотней болтов, количество потенциальных болтов, не имеющих требуемого усилия натяжения и соответственно не обладающих запроектированной несущей способностью, будет достаточно много. Указанное размышление подтверждает работа группы болтов М16 (графики на рис. 5), где также имеется один образец с подобным НДС (образец № 2) в процессе закручивания.

Обращает на себя внимание, что график зависимости угол поворота – усилие натяжения, представленные на рис. 6–8 не имеет резких изломов и указывает, что при контроле усилия натяжения болта по углу поворота на него не влияет состояние резьбы и коэффициент закручивания.

Зависимости усилия натяжения в болтах от момента закручивания показаны на рисунках 3–5, зависимости усилия в болтах от угла поворота гайки показаны на рисунках 6–8.

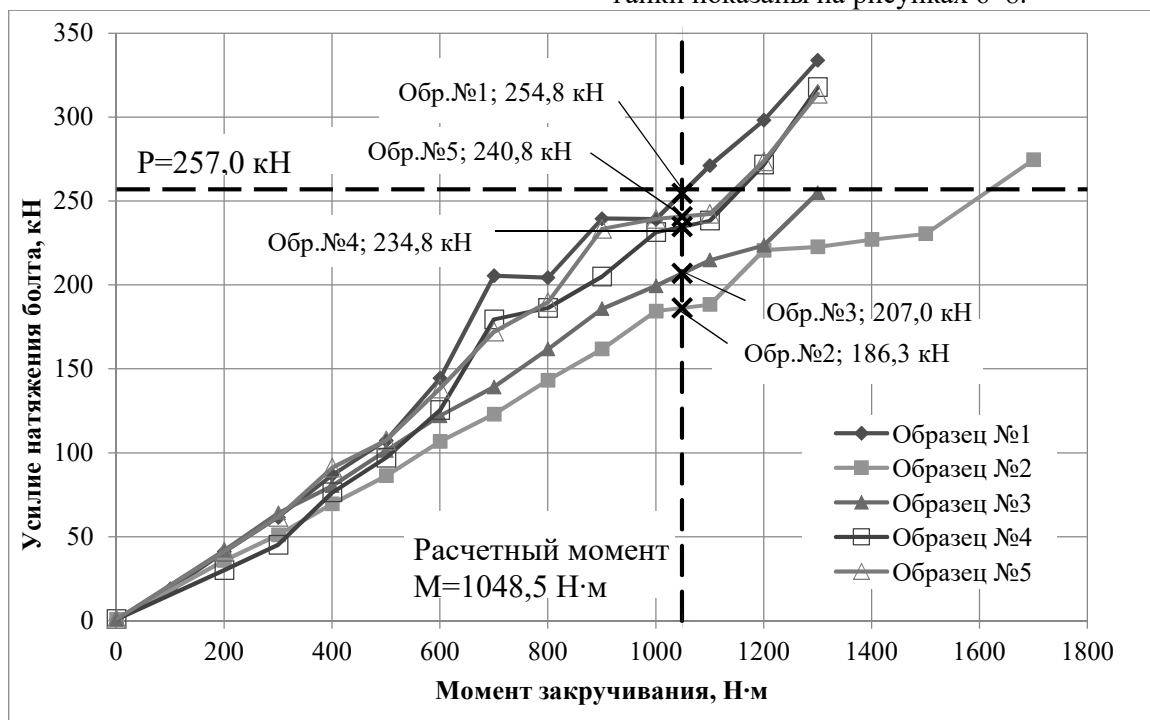


Рис. 3. Зависимость усилия от крутящего момента, М24, 10.9

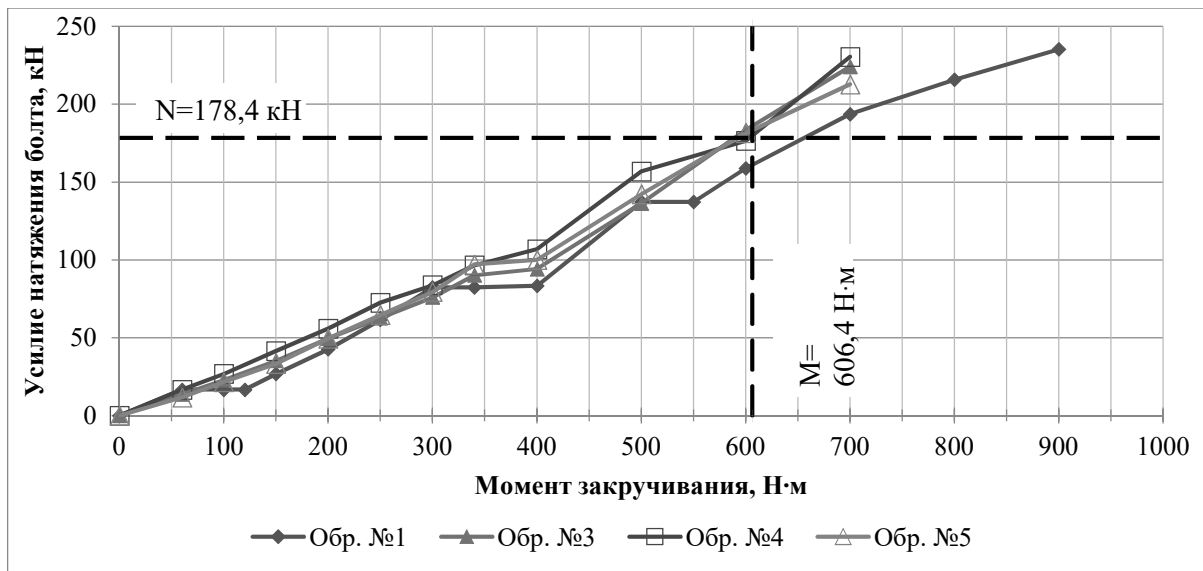


Рис. 4. Зависимость усилия от крутящего момента, M20, 10.9

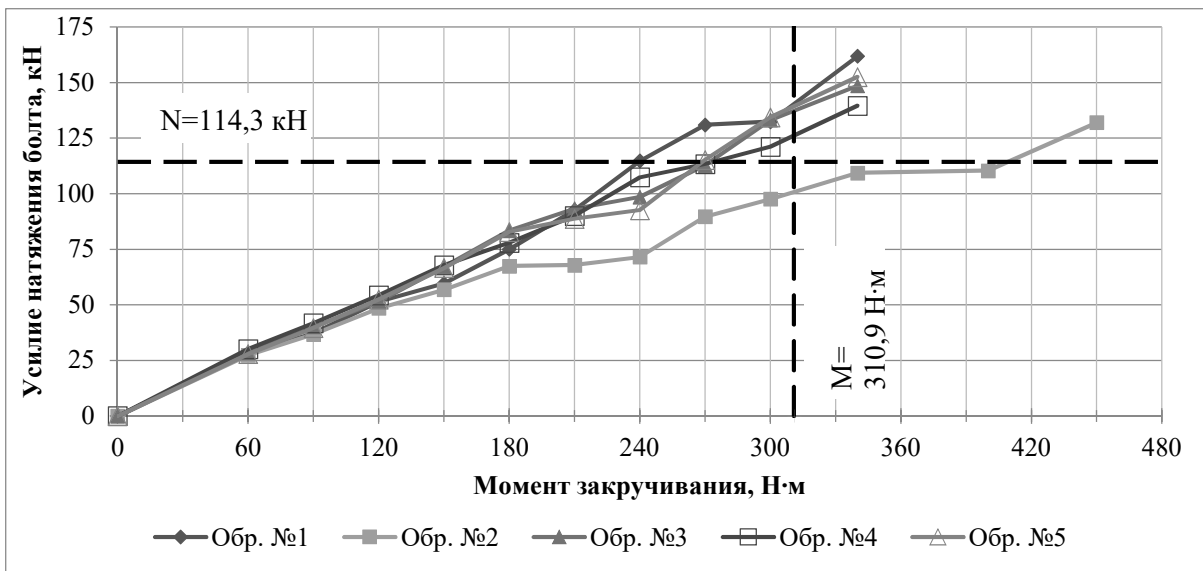


Рис. 5. Зависимость усилия от крутящего момента, M16, 10.9

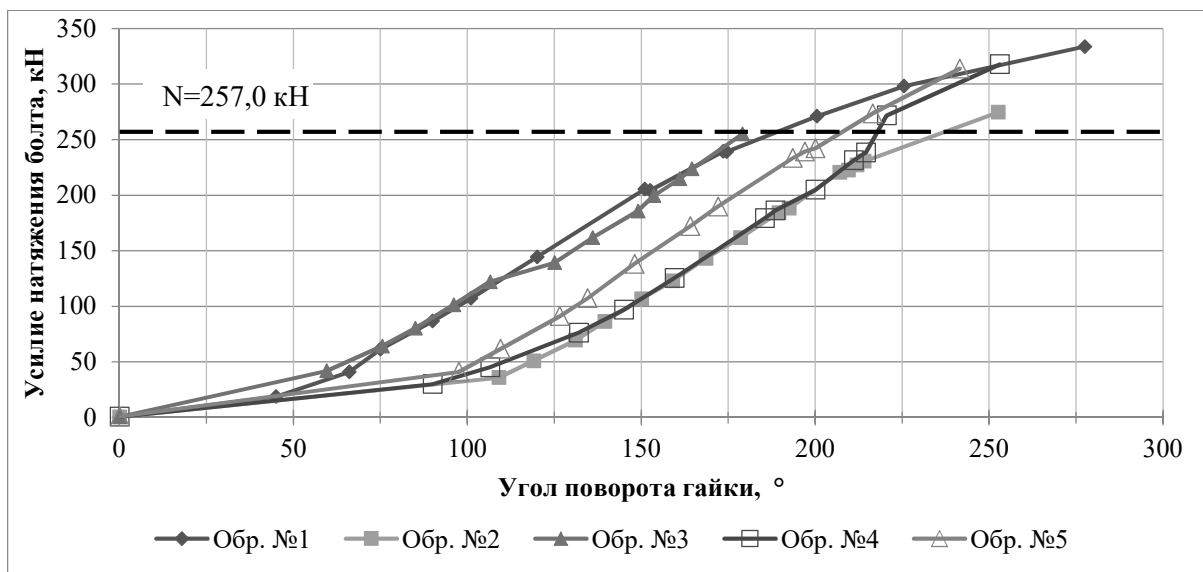


Рис. 6. Зависимость усилия от угла поворота гайки, M24, 10.9

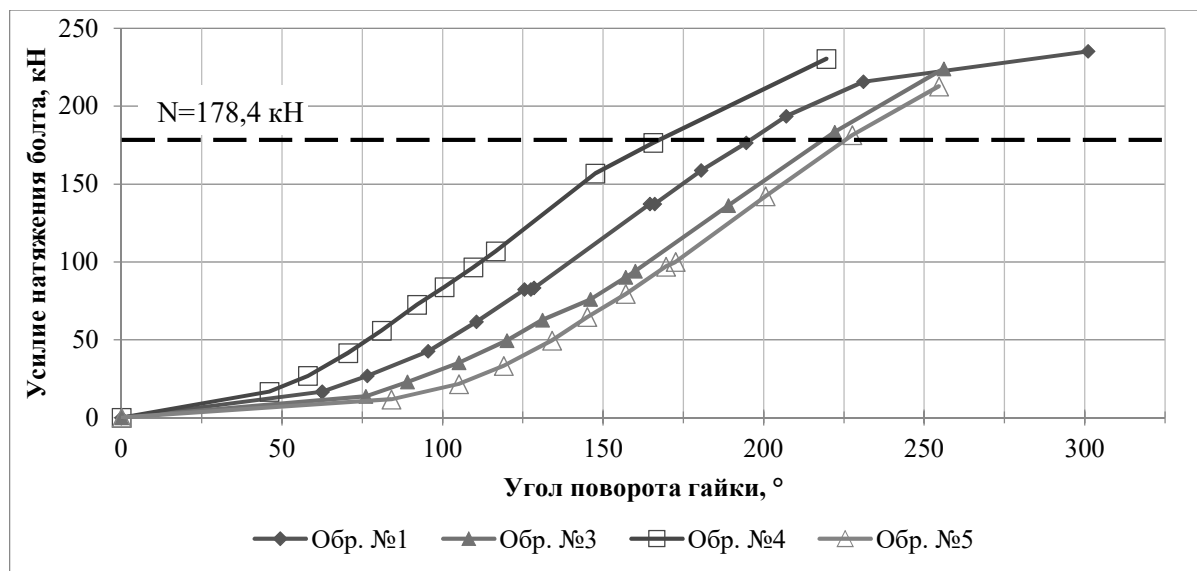


Рис. 7. Зависимость усилия от угла поворота гайки, M20, 10.9

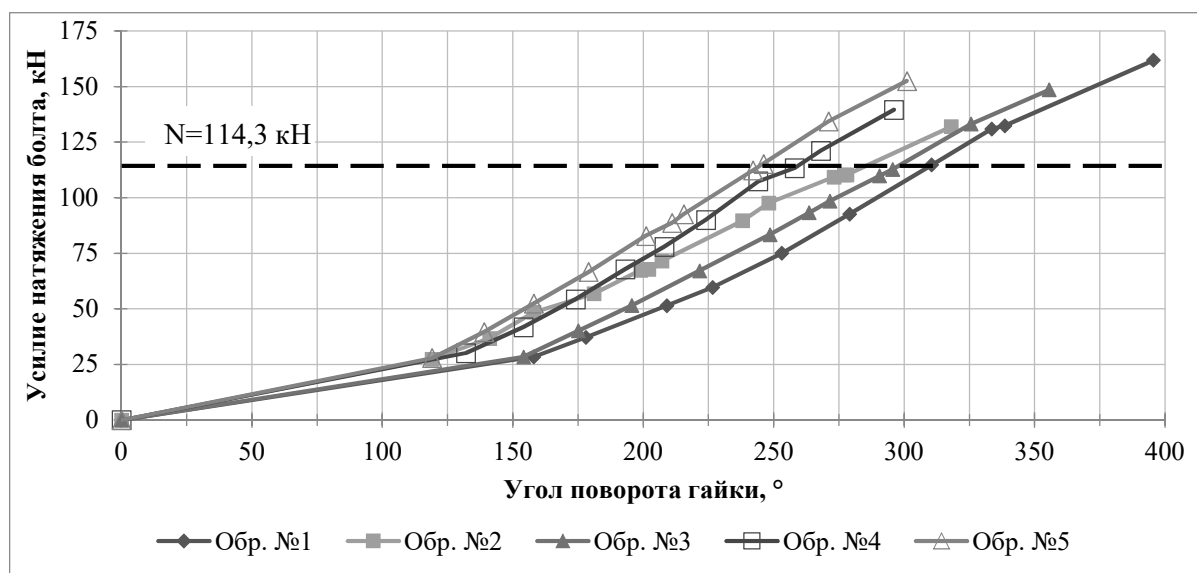


Рис. 8. Зависимость усилия от угла поворота гайки, M16, 10.9

Предположим следующую зависимость усилия натяжения болта от угла поворота гайки. Процесс натяжения болта с этой точки зрения можно разделить на 4 этапа.

Первым этапом, не отраженным на графиках, будет являться свободное накручивание гайки на болт вручную, происходящее до момента относительно плотного контакта гайки с шайбой. На этом этапе усилие в болте близко к нулю.

На втором этапе происходит уплотнение соединения, обжатие шайб и других его элементов. Значительная часть перемещения, вызываемого поворотом гайки, «расходуется» не на создание преднапряжения в болте, а на упругое и пластическое деформирование элементов соединения, приведение их в контакт, так называемое обжатие. Зависимость усилия в болте от угла поворота на этом этапе нелинейная.

Третий этап характеризуется линейной зависимостью между углом поворота (перемещением) и усилием в болте. Можно предположить, что после приведения в контракт всех элементов соединения и его полного обжатия в соединении происходят упругие деформации. Деформируются такие его элементы, как резьба в гайке и болте, пластины, входящие в состав соединения, головка болта, а также непосредственно его стержень. Упругая деформация элементов в соединении отображается на графике линейной зависимостью между углом поворота (перемещением) гайки и усилием в болте.

Четвертый этап, предположительно, характеризуется началом процесса развития пластических деформаций в элементах соединения. В процессе проведения эксперимента не все образцы достигли этого состояния, в основном его можно наблюдать на примере образца № 1 диаметра

М24. На этом этапе линейная зависимость усилия преднапряжения снова переходит в нелинейную.

Одним из важных вопросов, который возникает при проведении эксперимента, это определение начального угла поворота. С какого момента брать отсчет угла поворота? По данному вопросу можно высказать насколько соображений.

При выполнении исследования мы задавались начальным минимальным моментом, который можно выставить на ключе – для М16 это момент равный 100 Н·м, для М20  $M=100$  Н·м, для болта М24 начальный момент составил 200 Н·м.

Далее момент менялся с шагом 30 Н·м для болтов М16 и М20 и шагом 100 Н·м для болта М24. Положение гайки после закручивания болта на эти моменты принималось за нулевое значение. Мы предполагаем, что начальный момент закручивания в 100 и 200 Н·м можно достичь в условиях строительной площадки применением гайковертов небольшой мощности. Таким образом, метод контроля по углу поворота будет двухстадийный.

Полученные в результате проведения эксперимента значения углов поворота представлены в таблице 2.

Таблица 2

### Углы поворота гайки для достижения расчетного усилия натяжения высокопрочных болтов

Болт	М24		М20		М16	
	Угол поворота эксперимент от 200 Н·м, градусов	Значения угла поворота ключа	Угол поворота эксперимент от 100 Н·м, градусов	Значения угла поворота ключа	Угол поворота эксперимент от 100 Н·м, градусов	Значения угла поворота ключа
1	135	max 145° среднее 129°	132	max 133° среднее 124°	132	max 135° среднее 120°
2	144		-		135	
3	120		133		120	
4	131		108		104	
5	119		122		107	

**Выводы.** Как показывают отечественные и иностранные работы, метод контроля усилия натяжения высокопрочного болта по углу поворота гайки позволяет обеспечить проектную величину усилия в болтах соединений с контролируемым натяжением. При этом использование этого метода дает возможность понизить трудоемкость монтажа таких соединений за счет отсутствия необходимости технического обслуживания – тарировки – динамометрических ключей и проведения испытаний по определению коэффициента закручивания болтов.

В результате разработки экспериментальной установки и проведения эксперимента получены значения углов поворота ключа, необходимые для достижения расчетного усилия натяжения высокопрочных болтов диаметров М24, М20, М16, класса прочности 10.9.

Установлено, что при использовании метода контроля натяжения болта по моменту закручивания на достигнутое усилие натяжения болта влияют геометрические характеристики и состояние резьбы болта и гайки. При наличии дефекта резьбы болта достижение расчетного момента закручивания не обеспечивает расчетное преднапряжение болта.

В качестве развития и уточнения указаний по использованию метода контроля усилия натяжения болта по углу поворота представляется необходимым в дальнейшем исследовать работу соединения с различной толщиной пакета, а

также использовать болты класса прочности 8.8 и 12.9. Подобные исследования могут дать возможность применять описанный метод при монтаже широкого ряда соединений металлических конструкций на болтах с контролируемым натяжением.

**Благодарности.** Авторы выражают благодарность научным работникам лаборатории испытаний строительных материалов изделий и конструкций НИУ МГСУ (ЛИСМИиК) и ее заведующему В.А. Какуше за компетентные предложения и рекомендации при проведении экспериментального исследования, а также профессорам кафедры МДК НИУ МГСУ д.т.н. Туснину Александру Романовичу и д.т.н. Ибрагимову Александру Майоровичу за ценные замечания.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Туснин А.Р., Линьков Н.В., Клюкин А.А. Исследование несущей способности и деформативности соединений деревянных конструкций с применением композиционных материалов // Строительные материалы. 2023. № 10. С. 99–108. DOI: 10.31659/0585-430X-2023-818-10-99-108.
2. Тамразян А.Г., Карандеев М.В. К анализу методик оценки сейсмостойкости узла сопряжения безбалочной плиты перекрытия. В сборнике: Безопасность строительного фонда

России. Проблемы и решения. Материалы Международных академических чтений. Курск, 2023. С. 144–149.

3. Линьков Н.В. Несущая способность деревянных балок составного сечения на соединении «км-вкладыш» // Вестник МГСУ. 2011. № 1–2. С. 161–166.

4. Карпенко С.Н., Травуш В.И., Чепизубов И.Г. Определение деформативности и прочности муфтовых соединений арматуры. Международный журнал по расчету гражданских и строительных конструкций. 2015. Т. 11. № 4. С. 70–76.

5. Емельянов С.Г., Федорова Н.В., Колчунов В.И. Особенности проектирования узлов конструкций жилых и общественных зданий из панельно-рамных элементов для защиты от прогрессирующего обрушения // Строительные материалы. 2017. № 3. С. 23–27.

6. Колчунов В.И., Травуш В.И., Ильющенко Т.А., Шубин И.Л. Платформенный сборно-монолитный стык. Патент на изобретение RU 2836701 С2, 19.03.2025. Заявка № 2023124158 от 19.09.2023.

7. Дежин М.А., Ибрагимов А.М. Узел соединения колонн и ригелей с применением деревянных элементов на металлических накладках и клеевинченных шурупах. Патент на полезную модель RU 222579 U1, 11.01.2024. Заявка № 2023111649 от 05.05.2023.

8. Мысак В.В., Туснина О.А., Данилов А.И., Туснин А.Р. Особенности работы соединений металлических элементов на заклепках различных типов // Вестник МГСУ. 2014. № 3. С. 82–91.

9. Травуш В.И., Конин Д.В. Численное исследование стыков с фрезерованными торцами колонн коробчатого и двутаврового сечений // Academia. Архитектура и строительство. 2010. № 4. С. 69–74.

10. Холопов И.С., Тур В.И., Тур А.В. Испытания узловых соединений купола со стержнями из тонкостенных холодногнутых стальных профилей // Вестник Волжского регионального отделения Российской академии архитектуры и строительных наук. 2014. № 17. С. 199–202.

11. Просяников Б.Д. Болтовое соединение с взаимным продавливанием соединяемых тонкостенных профилей // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2016. № 2 (55). С. 130–138.

12. Шафрай К.А., Шафрай С.Д. Особенности работы фланцевых соединений архитектурно-строительных конструкций. внецентренное растяжение болтов // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2013. № 7 (655). С. 84–92.

13. Решетников А.А., Леонова Д.А., Корнет В.Ю. Несущая способность и живучесть шарнирного узла крепления балок к колоннам на 2-х болтах // Инженерный вестник Дона. 2018. № 1 (48). URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4799](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4799).

14. Алексеева Е.А. Монтажные стыки металлических балок на болтах. Аллея науки. 2018. Т. 3. № 6 (22). С. 433–437.

15. Шемелова Е.С. Фрикционные соединения металлических конструкций. В сборнике: Технология строительного производства. Материалы Всероссийской молодежной научно-практической конференции, посвященной 190-летию Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета (ЛИСИ – СПбГАСУ). Санкт-Петербург, 2022. С. 219–223.

16. Гладштейн Л.И., Бабушкин В.М. Высокочечные болты класса прочности 12.9 в монтажных соединениях строительных металлоконструкций // Промышленное и гражданское строительство. 2011. № 6. С. 37–39.

17. Павлов А.Б., Бормот Ю.Л., Бабушкин В.М. Фрикционные соединения стальных конструкций из проката большой толщины // Промышленное и гражданское строительство. 2008. № 5. С. 25–27.

18. Тихоньких С.С., Чечель М.В. Особенности соединений на высокопрочных болтах. В сборнике: Архитектура, Строительство, Землеустройство И Кадастры На Дальнем Востоке В XXI веке. материалы международной научно-практической конференции. ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет». 2016. С. 208–213.

19. Мартынов Г.В., Монастырева Д.Е., Макаров А.И., Морина Е.А. Напряженно-деформированное состояние фрикционных соединений с лазерной обработкой контактных поверхностей // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. Вып. 1. С. 72–82. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.1.72-82.

20. Ведяков И.И., Конин Д.В., Нахвальнов П.В. Влияние зазоров на напряженное состояние фланцевых соединений // Строительная механика и расчет сооружений. 2024. № 6 (317). С. 19–26. DOI: 10.37538/0039-2383.2024.6.19.26.

21. Коваленко А.И., Конин Д.В., Нахвальнов П.В., Соловьев Д.В. Экспериментальное исследование коэффициента трения фрикционных болтовых соединений // Строительная механика и расчет сооружений. 2022. № 4 (303). С. 61–67. DOI: 10.37538/0039-2383.2022.4.61.67.

22. Ведяков И.И., Конин Д.В., Нахвальнов П.В. Экспериментальное исследование фрикционных болтовых соединений из высокопрочных

статей // Промышленное и гражданское строительство. 2022. № 7. С. 24–33. DOI: 10.33622/0869-7019.2022.07.24-33.

23. Vasilkin A., Akhmetzyanov R., Zubkov G., Vasilkin I. Experimental determination of the tightening coefficient of bolts according to the din standard. E3S Web of Conferences. 2023. № 389, 01080. DOI: 10.1051/e3sconf/202338901080.

24. 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. 61–74. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.1.4.

25. Василькин А.А., Зубков Г.В. Деформация элементов сдвигоустойчивых соединений при предварительном натяжении болта // Актуальные проблемы строительной отрасли и образования – 2024: сборник докладов V Национальной научной конференции (г. Москва, 16 декабря 2024 г.). Москва : Издательство МИСИ – МГСУ, 2025. С. 22–29.

26. Monville J-M. Optimal tightening process of bolted joints. // International Journal for Simulation and Multidisciplinary Design Optimization. 2016. № 7. DOI: 10.1051/smdo/2016005.

27. Chaki S., Corneloup G., Lillamand I., Walaszek H. Combination of Longitudinal and Transverse Ultrasonic Waves for In Situ Control of the Tightening of Bolts. // ASME. Pressure Vessel Technology. August 2007. № 129(3). С. 383–390. DOI: 10.1115/1.2748821

28. Berenbak J. Evaluation tightening pre-loaded bolt assemblies according to EN 1090-2 “Technical requirements for steel structures” for 95% reliability EN 1990. Delft University of Technology. 2012. 36 с.

29. Kulak G.L. High Strength Bolting for Canadian Engineers. Canadian Institute Of Steel Construction. 2005. 56 с.

30. СП 70.13330.2012. Свод правил. Несущие и ограждающие конструкции. Актуализированная редакция СНиП 3.03.01-87" (ред. от 22.11.2023)

#### 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). Россия, г. Москва, 129337, Ярославское ш., 26.

**Георгий Владиславович Зубков**, аспирант 4 курса Института промышленного и гражданского строительства. E-mail: gronar363@gmail.com. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ). Россия, г. Москва, 129337, Ярославское ш., 26.

Поступила 17.11.2025 г.

© Василькин А.А., Зубков Г.В., 2026

**\*Vasilkin A.A., Zubkov G.V.**

*National Research University Moscow State University of Civil Engineering*

*\*E-mail: vasilkinaa@mgsu.ru*

## STRESS-STRAIN STATE OF SLIP-CRITICAL CONNECTIONS IN METAL STRUCTURES, WITH REGARD TO THE SPECIFICS OF BOLT TENSION CONTROL

**Abstract.** *A slip-critical connection using high-strength bolted assemblies is a tension-controlled connection, since reliable provision of a specified tension force is necessary to guarantee the design performance of the connection. A number of methods for accomplishing this task are known, but only one of them is sufficiently well regulated and used in practice – the torque method. The use of alternative methods of bolt tension control may make it possible to improve the reliability of tension-controlled bolted connections and eliminate the need for calibration of torque wrenches and tests to determine the tightening coefficient. An experimental study of the tensioning process for high-strength bolt sets of various diameters – M16, M20, and M24 – has been carried out in this article. An experimental setup has been developed, which has been used to study the controlled tension of bolts. The relationship between the angle of rotation of the nut, the torque applied to it using a torque wrench, and the bolt tension force was determined.*

**Keywords:** *slip-critical connection, bolted joint, bolt pretensioning, high-strength bolts, steel high-strength bolted connection*

### REFERENCES

1. Tusnin A.R., Lin'kov N.V., Klyukin A.A. Study of the load-bearing capacity and deformability

of connections of wooden structures using composite materials [Issledovanie nesushchej sposobnosti i deformativnosti soedinenij derevyannyh konstrukcij s primeneniem kompozicionnyh materialov]. Building

materials [Stroitel'nye materialy]. 2023. No. 10. Pp. 99–108. DOI: 10.31659/0585-430X-2023-818-10-99-108. (rus)

2. Tamrazyan A.G., Karandeev M.V. To the analysis of methods for assessing the seismic resistance of the joint of a beamless floor slab [K analizu metodik ocenki sejsmostojkosti uzla sopryazheniya bezbalochnoj plity perekrytiya]. Safety of Russia's Construction Stock: Problems and Solutions. Proceedings of the International Academic Conference. Kursk [Bezopasnost' stroitel'nogo fonda Rossii. Problemy i resheniya. Materialy Mezhdunarodnyh akademicheskikh chtenij. Kursk], 2023. P. 144–149. (rus)

3. Lin'kov N.V. Load-bearing capacity of composite timber beams with a «CM-liner» connection [Nesushchaya sposobnost' derevyannyh balok sostavnogo secheniya na soedinenii «km-vkladyshe»] MGSU Bulletin [Vestnik MGSU]. 2011. No. 1–2. Pp. 161–166. (rus)

4. Karpenko S.N., Travush V.I., Chepizubov I.G. Determination of the deformability and strength of coupling connections of reinforcement [Opredelenie deformativnosti i prochnosti muftovykh soedinenij armatury]. International Journal of Civil and Structural Engineering [Mezhdunarodnyj zhurnal po raschetu grazhdanskih i stroitel'nyh konstrukcij]. 2015. Vol. 11. No. 4. Pp. 70–76. (rus)

5. Emel'yanov S.G., Fedorova N.V., Kolchunov V.I. Design features of structural units of residential and public buildings made of panel-frame elements to protect against progressive collapse [Osobennosti proektirovaniya uzlov konstrukcij zhilyh i obshchestvennykh zdaniy iz panel'no-ramnykh elementov dlya zashchity ot progressivnykh obrusheniya]. Building materials [Stroitel'nye materialy]. 2017. No. 3. Pp. 23–27. (rus)

6. Kolchunov V.I., Travush V.I., Il'yushchenko T.A., Shubin I.L. Platform precast-monolithic joint [Platformennyj sborno-monolitnyj styk]. Patent for invention RU 2836701 C2, 19.03.2025. Application No. 2023124158, 19.09.2023. (rus)

7. Dezhin M.A., Ibragimov A.M. A connection unit for columns and beams using wooden elements on metal plates and glued screws [Uzel soedineniya kolonn i rigelej s primeneniem derevyannykh elementov na metallicheskih nakladkah i kleevvinchennykh shurupah]. Patent for a utility model RU 222579 U1, 11.01.2024. Application No. 2023111649, 05.05.2023. (rus)

8. Mysak V.V., Tusnina O.A., Danilov A.I., Tustin A.R. Features of the operation of connections of metal elements using rivets of various types [Osobennosti raboty soedinenij metallicheskih elementov na zaklepkah razlichnykh tipov]. MGSU Bulletin [Vestnik MGSU]. 2014. No. 3. Pp. 82–91. (rus)

9. Travush V.I., Konin D.V. Numerical study of joints with milled ends of box-section and I-beam columns [Chislennoe issledovanie stykov s frezerovannymi torcami kolonn korobchatogo i dvutavrovogo sechenij]. Academia. Architecture and Construction [Academia. Arhitektura i stroitel'stvo]. 2010. No. 4. Pp. 69–74. (rus)

10. Holopov I.S., Tur V.I., Tur A.V. Testing of dome nodal connections with rods made of thin-walled cold-formed steel sections [Ispytaniya uzlovykh soedinenij kupola so sterzhnyami iz tonkostennykh holodnognutykh stal'nykh profilej]. Bulletin of the Volga Regional Branch of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences [Vestnik Volzhskogo regional'nogo otdeleniya Rossijskoj akademii arhitektury i stroitel'nyh nauk]. 2014. No. 17. Pp. 199–202. (rus)

11. Prosyaniukov B.D. Bolted connection with mutual pushing of connected thin-walled profiles [Boltovoe soedinenie s vzaimnym prodavlivaniem soedinyaemykh tonkostennykh profilej]. Bulletin of Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering [Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta]. 2016. No. 2 (55). Pp. 130–138. (rus)

12. Shafraj K.A., Shafraj S.D. Features of flange joints in architectural structures. Eccentric bolt tension [Osobennosti raboty flancevykh soedinenij arhitekturno-stroitel'nyh konstrukcij. Vnecentrennoe rastyazhenie boltov]. News of Higher Education Institutions. Construction [Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Stroitel'stvo]. 2013. No. 7 (655). Pp. 84–92. (rus)

13. Reshetnikov A.A., Leonova D.A., Kornet V.Y. Load-bearing capacity and durability of the hinged joint for fastening beams to columns using 2 bolts [Nesushchaya sposobnost' i zhivuchest' sharnirnogo uzla krepleniya balok k kolonnam na 2-h boltah]. Engineering Bulletin of the Don [Inzhenernyj vestnik Dona]. 2018. No. 1 (48). URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4799](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4799). (rus)

14. Alekseeva E.A. Assembly joints of metal beams with bolts [Montazhnye styki metallicheskih balok na boltah]. Alley of Science [Alleya nauki]. 2018. Vol. 3. No. 6 (22). Pp. 433–437. (rus)

15. Shemelova E.S. Friction connections of metal structures [Frikcionnye soedineniya metallicheskih konstrukcij]. Proceedings of the All-Russian Youth Scientific and Practical Conference dedicated to the 190th anniversary of the St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering [Materialy Vserossijskoj molodezhnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, posvyashchennoj 190-letiyu Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta]. St. Petersburg, 2022. Pp. 219–223. (rus)

16. Gladshcheyn L.I., Babushkin V.M. High-strength bolts of strength class 12.9 in assembly joints of building metal structures [Vysokoprochnye bolty klassa prochnosti 12.9 v montazhnykh soedineniyakh stroitel'nykh metallokonstrukcij]. Industrial and civil construction [Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo]. 2011. No. 6. Pp. 37–39. (rus)

17. Pavlov A.B., Bormot Yu.L., Babushkin V.M. Friction joints of steel structures made of thick rolled products [Frikcionnye soedineniya stal'nykh konstrukcij iz prokata bol'shoj tolshchiny]. Industrial and civil construction [Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo]. 2008. No. 5. Pp. 25–27. (rus)

18. Tihon'kih S.S., Chechel' M.V. Features of connections with high-strength bolts [Osobennosti soedinenij na vysokoprochnykh boltah.]. Proceedings of the international scientific and practical conference. Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Komsomolsk-on-Amur State Technical University» [Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. FGBOU VO «Komsomol'skij-na-Amure gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet»]. 2016. Pp. 208–213. (rus)

19. Martynov G.V., Monastyreva D.E., Makarov A.I., Morina E.A. Stress-strain state of friction joints with laser treatment of contact surfaces [Napryazhenno-deformirovannoye sostoyaniye friktsionnykh soyedineniy s lazernoy obrabotkoy kontaktnykh poverkhnostey]. MGSU Bulletin [Vestnik MGSU]. 2019. Vol. 14. Issue. 1. Pp. 72–82. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.1.72-82. (rus)

20. Vedyakov I.I., Konin D.V., Nakhval'nov P.V. The influence of gaps on the stress state of flange joints [Vliyanie zazorov na napryazhennoe sostoyanie flancevykh soedinenij]. Construction mechanics and calculation of structures [Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy]. 2024. No. 6 (317). Pp. 19–26. DOI: 10.37538/0039-2383.2024.6.19.26. (rus)

21. Kovalenko A.I., Konin D.V., Nakhval'nov P.V., Solov'yev D.V. Experimental study of the friction coefficient of friction bolted joints [Eksperimental'noye issledovaniye koefitsiyenta treniya friktsionnykh boltovykh soyedineniy]. Construction mechanics and calculation of structures [Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy]. 2022. No. 4 (303). Pp. 61–67. DOI: 10.37538/0039-2383.2022.4.61.67. (rus)

22. Vedyakov I.I., Konin D.V., Nakhval'nov P.V. Experimental study of friction bolted joints

made of high-strength steels [Eksperimental'noye issledovaniye friktsionnykh boltovykh soyedineniy iz vysokoprochnykh staley]. Industrial and civil construction [Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo]. 2022. No. 7. Pp. 24–33. DOI: 10.33622/0869-7019.2022.07.24-33. (rus)

23. Vasilkin A., Akhmetzyanov R., Zubkov G., Vasilkin I. Experimental determination of the tightening coefficient of bolts according to the din standard. E3S Web of Conferences. 2023. No. 389, 01080. DOI: 10.1051/e3sconf/202338901080. (rus)

24. Vasilkin A.A., Zubkov G.V., Prokaev S.A., Vasilkin I.A. Friction area of a slip-critical bolt connection [Razmer ploshchadki treniya frikcionnogo boltovogo soedineniya]. Construction: science and education [Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie]. 2024. Vol. 14. Issue. 1. Pp. 61–74. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.1.4. (rus)

25. Vasilkin A.A., Zubkov G.V. Deformation of slip-critical connection elements during pretensioning of the bolt [Deformatsiya elementov sdvigoustojchivykh soedinenij pri predvaritel'nom natyazhenii bolta]. Current Issues in Construction and Education — 2024: Proceedings of the V National Scientific Conference (Moscow, December 16, 2023). Moscow: Moscow State University of Civil Engineering Publishing House [Aktual'nye problemy stroitel'noj otrasli i obrazovaniya — 2024: sbornik dokladov V Nacional'noj nauchnoj konferencii (g. Moskva, 16 dekabrya 2024 g.). Moskva: Izdatel'stvo MISI – MGSU], 2025. Pp. 22–29. (rus)

26. Monville J-M. Optimal tightening process of bolted joints. International Journal for Simulation and Multidisciplinary Design Optimization. 2016. № 7. DOI: 10.1051/smdo/2016005.

27. Chaki S., Corneloup G., Lillamand I., Walaszek H. Combination of Longitudinal and Transverse Ultrasonic Waves for In Situ Control of the Tightening of Bolts. ASME. Pressure Vessel Technology. August 2007. No. 129(3). Pp. 383–390. DOI: /10.1115/1.2748821

28. Berenbak J. Evaluation tightening preloaded bolt assemblies according to EN 1090-2 «Technical requirements for steel structures» for 95 % reliability EN 1990. Delft University of Technology. 2012. 36 p.

29. Kulak G.L. High Strength Bolting for Canadian Engineers. Canadian Institute Of Steel Construction. 2005. 56 p.

30. SP 70.13330.2012. Load-bearing and separating constructions. Updated version of SNiP 3.03.01-87" (rev. 22.11.2023).

#### Information about the authors

**Vasilkin, Andrey A.** PhD. E-mail: vasilkinaa@mgsu.ru. National Research «Moscow State University of Civil Engineering» (NRU MGSU). Russia, 129337, Moscow, Yaroslavl'skoe sh., 26.

**Zubkov, Georgiy V.** Graduate student, Industrial and Civil Engineering Institute. E-mail: gronar363@gmail.com. National Research «Moscow State University of Civil Engineering» (NRU MGSU). Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoe sh., 26.

---

*Received 17.11.2025*

**Для цитирования:**

Василькин А.А., Зубков Г.В. Экспериментальное определение угла поворота гайки для натяжения высокопрочных болтов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2026. № 5. С. 19–31. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-5-19-31

**For citation:**

Vasilkin A.A., Zubkov G.V. Stress-strain state of slip-critical connections in metal structures, with regard to the specifics of bolt tension control. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2026. No. 5. Pp. 19–31. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-5-19-31