

Влияние режима пескоструйной обработки на шероховатость поверхности фрикционных соединений

Андрей Александрович Василькин, Илья Андреевич Василькин
Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В текущей практике основное влияние на работу фрикционных болтовых соединений стальных элементов оказывают коэффициент трения соединяемых поверхностей и усилие натяжения болта. Коэффициент трения прежде всего зависит от состояния контактных поверхностей. Для увеличения коэффициента трения применяют различные конструктивные способы. Наиболее эффективным способом подготовки контактных поверхностей фрикционных соединений или соединений на болтах с контролируемым натяжением является пескоструйная обработка, воздействие которой позволяет получить наибольшее значение коэффициента трения. Большинство существующих конструктивных норм определяют, что обработка контактных поверхностей указывается в проектной документации. Дополнительно уточняется, что шероховатость контактной поверхности после обработки должна составлять не более $R_z 40$. Проведение замеров шероховатости обработанной поверхности на монтажной площадке увеличивает трудоемкость выполнения работ, поэтому важно понимать, какое влияние оказывают различные режимы пескоструйной обработки или отступления от предписанного режима на шероховатость поверхности, что может привести к снижению величины коэффициента трения.

Материалы и методы. Выполнено исследование влияния 5 различных режимов пескоструйной обработки кварцевым песком на шероховатость 10 стальных пластин из низколегированной стали 09Г2С. Определение шероховатости проведено на профилометре M. ERA Platinum D1 с разрешением 7 нм.

Результаты. В общей сложности осуществлены 20 замеров шероховатости поверхности с построением профилей поверхности и определение средних значений R_a и R_z . Показано, что предложенные режимы обработки создают различную шероховатость на поверхности стальных пластин. Один из режимов создает наибольшее значение шероховатости.

Выводы. Сделаны выводы о корреляции между режимом пескоструйной обработки и шероховатостью поверхности. Полученные результаты сравнивались с прочими конструктивными способами обработки контактных поверхностей.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: фрикционное соединение, шероховатость, пескоструйная обработка, соединение с контролируемым натяжением, болтокомплект, режим обработки, высокопрочный болт

Благодарности. Авторы выражают благодарность Главному региональному центру коллективного пользования научным оборудованием и установками НИУ МГСУ, ЛИСМИИК НИИ ЭМ, кафедре метрологии и взаимозаменяемости МГТУ им. Н.Э. Баумана.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Василькин А.А., Василькин И.А. Влияние режима пескоструйной обработки на шероховатость поверхности фрикционных соединений // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 4. С. 516–528. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.4.516-528

Автор, ответственный за переписку: Андрей Александрович Василькин, vasilkinaa@mgsu.ru.

The influence of sandblasting mode on the surface roughness of friction joints

Andrey A. Vasil'kin, Ilya A. Vasilkin
Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. In current practice, the operation of friction bolted joints of steel elements is evaluated based on the coefficient of friction and the bolt tension force. The coefficient of friction depends on the condition of the contact surfaces. Various constructive methods are used to increase it. The most effective way to prepare the contact surfaces of friction joints or bolt joints with controlled tension is sandblasting, which creates the highest coefficient of friction. Most of the existing design standards specify that the treatment of contact surfaces is specified in the design documentation. Additionally, it is specified that the roughness of the contact surface after processing should be no more than $R_z 40$. Measuring the roughness of the treated surface on the installation site is quite a difficult task, therefore it is necessary to understand exactly how different modes of sandblasting or deviations from the prescribed regime affect the surface roughness, which can lead to lower values of the coefficient of friction.

Materials and methods. In this paper, the properties of 5 different modes of sandblasting contact surfaces with quartz sand on the roughness of 15 steel plates made of low-alloy steel 09G2C, made on a profilometer M. ERA Platinum D1, were studied.

Results. A total of 20 tests were carried out to determine the roughness with the construction of surface profiles and the determination of the average values of R_a and R_z . It was shown that the proposed processing modes create different roughness on the surface of steel plates. One of the modes creates the highest average roughness value.

Conclusions. Conclusions are drawn about the correlation between the processing mode and the surface roughness. The results obtained were compared with other traditional constructive methods of processing contact surfaces.

KEYWORDS: slip resistance, surface treatment, sandblasting, slip-critical bolted connections, surface roughness

Acknowledgments. The authors express their gratitude to the Main Regional Center for Collective Use of Scientific Equipment and Installations of Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU); the Laboratory for Testing Building Materials, Products and Structures of the Research Institute of Experimental Mechanics, and the Department of Metrology and Interchangeability of Bauman Moscow State Technical University.

FOR CITATION: Vasil'kin A.A., Vasilkin I.A. The influence of sandblasting mode on the surface roughness of friction joints. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(4):516-528. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.4.516-528 (rus.).

Corresponding author: Andrey A. Vasil'kin, vasilkinaa@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Болты с контролируемым усилием натяжения, или болты с предварительным натяжением, были впервые применены после Второй мировой войны в качестве замены старых заклепок, которые использовались как крепеж на мостах в Соединенных Штатах Америки. Вскоре они стали использоваться в болтовых соединениях строительных и мостовых конструкций, подверженных динамическим нагрузкам [1].

Одним из главных преимуществ болтовых соединений с предварительным натяжением является их жесткость на сдвиг. В отличие от болтовых соединений со сдвигом, где несущая способность соединения обеспечивается после незначительного проскальзывания в соединении, болты с предварительным натяжением не проскальзывают до тех пор, пока не будет преодолено сопротивление трению. Это служит основной причиной их хорошей работы при динамическом нагружении [2].

Основы проектирования фрикционных соединений и расчета их несущей способности совпадают по физическому принципу в европейских¹, американских², канадских³, австралийских⁴, китайских⁵ и отечественных нормах⁶.

¹ CEN — EN 1993-1-8: Eurocode 3: Design of steel structures — Part 1-8: Design of joints, European Committee for Standardization, Brussels, 2005.

² AISC. Specification for structural steel buildings. ANSI/AISC 360-10: An American National Standard, American Institute of Steel Construction, INC., Chicago, USA, 2010.

³ CAN/CSA — S6-06. Canadian highway bridge design code. Canadian Standards Association, Mississauga, 2006.

⁴ AS/NZS 1252.1:2016. High-Strength Steel Fastener Assemblies for Structural Engineering — Bolts, Nuts and Washers — Part 1: Technical Requirements. Standards Australia, Sydney, Australia, 2016.

⁵ GB 50017–2017. Standard for Design of Steel Structures. China National Standardization Administration Committee: Beijing, China, 2011.

⁶ СП 16.13330.2017. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23–81*. Редакция 6.

Работа болтов с контролируемым натяжением или соединений с предварительным натяжением болтов в терминологии европейских норм активно исследуется во всем мире. Учитывая, что наибольшее значение коэффициента трения поверхностей без покрытия получается после пескоструйной обработки, значительное количество исследований направлено на экспериментальное определение коэффициента трения для разных сталей и различных способов обработки контактных поверхностей.

В отечественных нормах для пескоструйной обработки указан коэффициент трения, равный 0,58, в Еврокоде EN 1993-1-8 указано значение $\mu \geq 0,50$. В Руководстве 1 по проектированию соединений Австралийского института стали [3] сообщается, что струйная очистка обрабатываемой поверхности увеличивает коэффициент трения по сравнению с необработанной поверхностью, очищенной от окалин, и средний коэффициент трения составляет 0,51 (при стандартном отклонении 0,09) на основании 186 испытаний сталей по ASTM A7, A36 и стали Fe37.

В англоязычной литературе при описании работы фрикционного соединения используется термин slip coefficient, что переводится как коэффициент скольжения. По сути, это аналог нашего понятия коэффициента трения.

Wang и соавт. [4] измерили коэффициент трения пластин из аустенитной нержавеющей стали марки 316 с обработкой поверхностей пескоструйным способом и установили, что коэффициент трения при этом был ниже 0,21.

Stranghöner и соавт. [5, 6] провели исследования по определению коэффициента трения различных марок нержавеющей стали и сравнили четыре вида обработки поверхности (необработанная, пескоструйная обработка, дробеструйная обработка и пескоструйная обработка поверхности с металлизированным покрытием из алюминиевого напыления). Полученный коэффициент трения аустенитной нержавеющей стали с шероховатостью $R_z > 45$ составляет $\mu \geq 0,4–0,5$, что в два раза выше, чем из ссылки [4].

В статье Zhang и соавт. [7] при исследовании метода обработки двух контактных поверхностей, когда одна поверхность обрабатывается присадочным покрытием (HVOF-покрытие порошком из нержавеющей стали), а вторая поверхность обрабатывается абразивными частицами (пескоструйная обработка) установлен коэффициент трения при пескоструйной обработке обеих поверхностей, который составил $\mu = 0,26$ при шероховатости R_a , равной 5,93.

Cruz и соавт. [8] и Heistermann и соавт. [9] сообщают, что коэффициент трения для мягкой стали S275, аналог отечественной С275, составляет 0,47 и 0,50 в зависимости от типа песка, используемого при пескоструйной обработке.

В работе Cruz [8] рассматривается шесть видов обработки поверхности мягкой стали S 275. В первых двух сериях эксперимента контактные поверхности подвергались струйной очистке песком (тип А), дробью или абразивом (тип В) без последующего нанесения покрытия; в следующих четырех сериях (типы С, D, Е и F) поверхности пластин подвергались струйной очистке дробью или абразивом и покрывались поверхностными обработками. Коэффициенты скольжения со значениями 0,50 получены только для поверхностей, подвергнутых струйной обработке, без какой-либо дополнительной обработки поверхности (типы А и В). На поверхностях, подвергнутых струйной обработке, металлизированных цинком методом распыления (тип С) или оцинкованных методом горячего погружения (тип D), коэффициент скольжения достигает значения 0,40. Для поверхностей, подвергнутых струйной обработке, с нанесением покрытия из этилсиликата цинка (тип Е), получено значение 0,40. Для поверхностей, подвергнутых струйной обработке, с нанесением цинкоэпоксидного покрытия (тип F) получены самые низкие значения коэффициента скольжения (не выше 0,30).

В образцах стали S 275 и высокопрочной стали S 690 с эквивалентной пескоструйной обработкой поверхности были получены схожие значения коэффициента трения. На основании представленных результатов можно сделать вывод, что коэффициент скольжения сильно зависит от обработки поверхности, снижается при нанесении металлического покрытия после пескоструйной обработки и слабо зависит от марки стали.

Annap и соавт. [10] определили, что средний коэффициент скольжения для поверхностей, очищенных пескоструйной обработкой, из стали CAN/CSA G40.21 350, аналог из стали 3, составляет 0,53.

В работе [11] сообщается о результатах лабораторных испытаний, касающихся оценки коэффициента скольжения поверхностей с пескоструйной обработкой с полученным средним значением $\mu = 0,454$. В качестве наиболее значимых параметров, влияющих на коэффициент скольжения, указаны усилие натяжения болта и шероховатость поверхности.

Пескоструйная или дробеструйная обработка — это процесс, при котором металлические или керамические частицы угловатой формы переносятся потоком сжатого воздуха и выбрасываются на поверхность обрабатываемого материала с целью устранения загрязненных слоев и изменения шероховатости поверхности. Данная процедура выполняется перед нанесением на материал термического напыления, подготовкой поверхности перед нанесением покрытия методом погружения и подготовкой поверхности для соединения на болтах с контролируемым натяжением.

Полученная шероховатость зависит от параметров пескоструйной обработки, например давления струи, угла, расстояния от сопла, размера и типа частиц и т.д.

Влияние параметров процесса пескоструйной обработки на шероховатость поверхности обсуждалось в литературе [12–18].

Пескоструйная обработка также может влиять на кристаллическую структуру [19, 20], микроструктуру [21], прочность [19, 20] и микроструктуру вблизи поверхности [22].

Пескоструйная обработка используется в качестве поверхностной механической обработки для различных материалов, таких как сталь [22, 23], алюминиевые и титановые сплавы [24, 21], керамика [19, 20, 24], полимеры и композиты [25].

Эффект пескоструйной обработки зависит от природы обрабатываемого материала, его жесткости и свойств поверхности [26]. Применение одного и того же метода пескоструйной обработки к двум разным материалам не приведет к получению одинаковой шероховатости или геометрического профиля [22]. Материалы с более низкой прочностью имеют низкую пластичность поверхности, поэтому они более восприимчивы к повреждению поверхности.

Такие параметры обработки, как угол пескоструйной обработки [24], давление [17, 18], расстояние [16, 21], продолжительность [21], природа песка [16, 18] и гранулометрия [16] широко изучаются исследователями для определения химических и физических свойств материалов.

В качестве абразивного материала при пескоструйной обработке может применяться алюминиевый песок [18, 20] и обычный кварцевый песок (glace sand) [16, 27, 28].

Сравнительный анализ двух средних значений для больших выборок результатов исследования [29] показал, что изменение гранулометрии кварцевого песка повлияло на 92 % средней шероховатости R_a обработанных образцов. Образцы, обработанные с самой высокой гранулометрией (G200/300), показали самую высокую R_a , в то время как образцы, обработанные с самой низкой гранулометрией (G90/150 и G70/110), показали самую низкую R_a . Образцы, обработанные гранулометрией глазурированного песка G90/150 и G70/110, имели разные значения R_a , не-

смотря на их сходимость в значениях. После обработки глазурированным песком G200/300 поверхность оцинкованной стали становилась более шероховатой, чем у необработанных образцов. Противоположные результаты наблюдались с двумя другими гранулометриями (G90/150, G70/110), где R_a уменьшалась с $1,2 \pm 0,26$ мкм для необработанных образцов до минимума $0,94 \pm 0,074$ мкм в случае обработанных образцов G90/150.A90.P5.

Отмечено, что шероховатость увеличивается с ростом давления дробеструйной обработки и уменьшается с повышением расстояния отступа [29]. Однако ниже критического расстояния отступа шероховатость поверхности низкая. Шероховатость поверхности увеличивается с углом дробеструйной обработки до тех пор, пока угол не составит около 75° . В то же время имеются исследования, согласно которым изменение угла пескоструйной обработки не влияет на шероховатость поверхности [30].

Удаление материала при дробеструйной обработке происходит в результате процесса эрозии, где активны такие механизмы, как микрорезание, пропахивание и экструзия [31]. При дробеструйной обработке поверхность подвергается упрочнению, и на верхнем слое, типичная толщина которого составляет несколько мкм, образуется область нанозерен.

В отечественных нормативных указаниях при пескоструйной обработке⁷ устанавливается давление воздуха пескоструйного аппарата в диапазоне 0,35–0,50 МПа, расстояние от сопла до обрабатываемой поверхности 10–15 см, угол распыления 50 – 75° .

При применении пескоструйной обработки в условиях строительной площадки в силу различных причин возможны отступления от нормативных требований. Поэтому более глубокое понимание влияния различных режимов пескоструйной обработки на шероховатость соединяемых поверхностей важно для обеспечения требуемой несущей способности стыка элементов.

В данной работе изучается влияние давления и расстояния от сопла при пескоструйной обработке на шероховатость стальной поверхности с целью

повышения коэффициента трения и определения оптимальных параметров пескоструйной обработки для получения более высокой несущей способности фрикционных соединений на болтах.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Пескоструйная обработка или дробеструйная обработка дробью использует абразивные частицы неправильной или сферической формы для придания поверхности стали определенной шероховатости. Давление аппарата, расстояние от сопла, угол распыления, а также состав и фракция песка являются основными факторами, оказывающими непосредственное влияние на шероховатость поверхности и, как следствие, несущую способность фрикционного соединения. Чтобы исследовать влияние двух из вышеуказанных параметров, пластины подвергли пескоструйной обработке сжатым воздухом давлением от 3 до 6 атм, углом распыления 60° , расстоянием распыления от 150 до 400 мм и размером абразивных частиц от 0,5 до 2,0 мм.

Образцы для исследования были сконструированы в соответствии с требованиями, приведенными в документах^{8,9}. Образец состоит из трех пластин и соединен одним высокопрочным болтом M14 класса прочности 10.9 по немецкому стандарту DIN 931 и высокопрочными шайбой и гайкой из стали по немецкому стандарту DIN 934 (рис. 1). Наружные пластины (тип 1) и внутренние пластины (тип 2) имеют размер 100×100 мм и толщину 6 мм. Пластины изготовлены из низколегированной стали марки 09Г2С. Диаметр отверстия для болта 17 мм выполнен лазерной резкой.

В этой статье использовано пять различных способов пескоструйной обработки поверхности пластин фрикционных соединений. Исследованы три значения давления подачи песка и два варианта расстояния от сопла до поверхности обработки. В общей сложности было обработано 15 образцов (табл. 1).

⁸ СТО НОСТРОЙ 2.10.76–2012. Болтовые соединения. Правила и контроль монтажа, требования к результатам работ. М. : ЦНИИПСК им. Мельникова, 2013. 57 с.

⁹ ГОСТ Р 70132–2022. Сборка болтовых соединений строительных металлических конструкций. Правила и контроль выполнения работ. 2022.

⁷ СТП 006–97. Устройство соединений на высокопрочных болтах в стальных конструкциях мостов : введен 01.01. 1998. М. : Трансстрой, 1998.



а

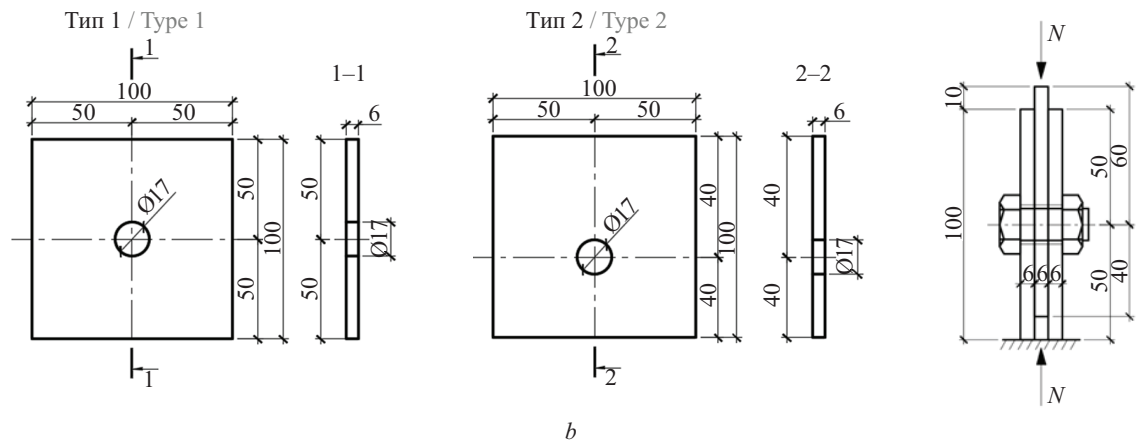


Рис. 1. Образцы для испытаний: а — фото; б — чертёж
Fig. 1. Test specimens: a — photo; b — schematic drawing

Табл. 1. Описание образцов для определения шероховатости поверхности
Table 1. Description of specimens for determining the roughness of the friction surface

Виды обработки Types of processing	Идентификатор образца Specimen number	Давление подачи песка, атм Sand supply pressure, atm	Расстояние сопла от поверхности, см Distance from the surface, cm	Угол распыления Spray angle
1-й вид 1 type	1–1	3	15	60°
	1–2			
	1–3			
2-й вид 2 type	2–1	5	15	
	2–2			
	2–3			
3-й вид 3 type	3–1	5	40	
	3–2			
	3–3			
4-й вид 4 type	4–1	6	15	
	4–2			
	4–3			
5-й вид 5 type	5–1	6	40	
	5–2			
	5–3			

Обозначение образцов принято от 1–1 до 5–3. Подготовленные образцы обработаны кварцевым песком фракцией 0,5–2,0 мм (рис. 2). Сопло удерживается в положении путем жесткого элемента регулируемой длины, с помощью которого можно установить расстояние отступа между пластиной и соплом. После того как угол и расстояние отступа зафиксированы, пескоструйная обработка образца выполняется за счет перемещения сопла по обрабатываемой поверхности.

Виды обработки образцов выбирались исходя из требований нормативного документа⁷. Сопло пескоструйного аппарата должно располагаться на расстоянии 10–15 см под углом 60° к очищаемой поверхности. Угол распыления не менялся.

Для исследования подготовлено 15 комплектов пластин, каждый комплект состоит их трех пластин.

С целью нивелирования влияния посторонних факторов на обработку поверхности для каждого способа обработки подготовлено по три образца. За рубежом чаще всего используют по 5 образцов, считается, что такое количество является достаточным с использованием статистической обработки [8, 9]. Максимально используемое количество образцов в количестве 20 для каждого способа обработки поверхности соединяемых пластин было применено при проведении европейского исследовательского проекта «Выполнение и надежность противоскользящих соединений для стальных конструкций с использованием CS и SS» (Execution and reliability of slip-



Рис. 2. Шаблон для обеспечения угла распыления и расстояния до поверхности элемента

Fig. 2. A template to ensure the angle of inclination and distance to the surface of the element

resistant connections for steel structures using CS and SS) Европейского сообщества (RFSR-CT-2014-00024) по определению коэффициентов трения для различных марок нержавеющей стали с различной обработкой поверхности в рамках подготовки новой редакции Еврокода EN 1090-2 [5].

После пескоструйной обработки были отобраны по 2 пластины каждого вида обработки для измерения шероховатости.

Шероховатость поверхности пластин определялась с помощью контурографа-профилометра М. ERA Platinum D1 на кафедре метрологии и взаимозаменяемости МГТУ им. Н.Э. Баумана (рис. 3).

Работа устройства заключается в сканировании поверхностных неровностей с помощью консоли с алмазным наконечником. Механические колебания щупа преобразуются в напряжения, которые соответствуют этим колебаниям. Затем сигналы усиливаются и обрабатываются микропроцессом. Информация

о шероховатости и геометрических характеристиках поверхности выводится на экран монитора системы управления в форме графических профилей и числовых показателей.

Технические характеристики измерительного прибора Platinum D1 приведены в табл. 2.

Фракция песка, используемого для пескоструйной очистки, составляет от 0,5 до 2 мм, что предположительно дает шероховатость R_z в диапазоне от 20 до 45 мкм. Исходя из этого, по ГОСТ¹⁰ принимаем базовую длину $l = 2,5$ мм для R_z от 20 до 45 мкм.

Поскольку фактическая шероховатость поверхности пластины распределена неравномерно, за шероховатость поверхности R_a было принято среднее значение из трех контрольных точек на каждой пластине. При определении шероховатости исследовано по 4 плоскости трения каждого вида обработки. После этого устанавливалось среднее значение шероховатости для данного способа обработки.

Результаты проведенных исследований шероховатости приведены в табл. 3. В отчете об измерении шероховатости выведен профиль поверхности и ряд параметров шероховатости (рис. 4).

В результате исследования установлено, что средняя шероховатость поверхности R_a составляет 8,5–10,8 мкм. Наибольшая высота неровностей находится в пределах от 52,9 до 67,2 мкм. Количество неровностей на 1 пог. мм поверхности составляет 4–5.

На рис. 5 приведен график распределения средних значений R_z (сумма средних значений высот пяти наибольших выступов профиля и глубин пяти наибольших впадин профиля в пределах базовой длины l , мкм) для каждого вида обработки с результирую-

¹⁰ ГОСТ 2789–73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики : введ. 01.01.1975. М. : Стандартинформ, 2018.

Табл. 2. Технические характеристики профилометра

Table 2. Technical characteristics of the profilometer

Контурограф-профилометр Contourograph profilometer	Platinum D1	
Диапазон измерений Measuring range	Ось X (горизонтальная) X-axis (horizontal)	150 мм / mm
	Ось Y (колонна) Y-axis (column)	420 мм / mm
	Ось Z1 (щуп) Z1 axis (probe)	Контур: 50 (±25) мм Surface: 50 (±25) mm Шероховатость: ±420 мкм Roughness: ±420 μm
Погрешность (шероховатость) Accuracy (roughness)	Линейная Linear	≤ ±(7 нм / nm + 3,5 %)
	Шумы Inaccuracy	≤ 0,025 мкм / μm
Пределы допускаемой относительной погрешности измерений параметра шероховатости Limits of the permissible relative measurement error of the roughness parameter	R_a , %	±3,0, но не менее 5 нм ±3.0, but not less than 5 nm

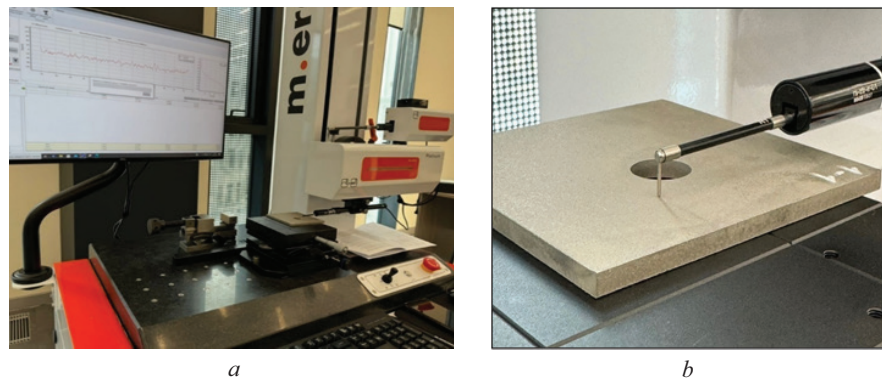


Рис. 3. Установка для измерения профиля поверхности: а — контурограф-профилометр; б — образец для испытания
Fig. 3. A template to ensure the angle of inclination and distance to the surface of the element: а — contourograph-profilometer; б — test specimens

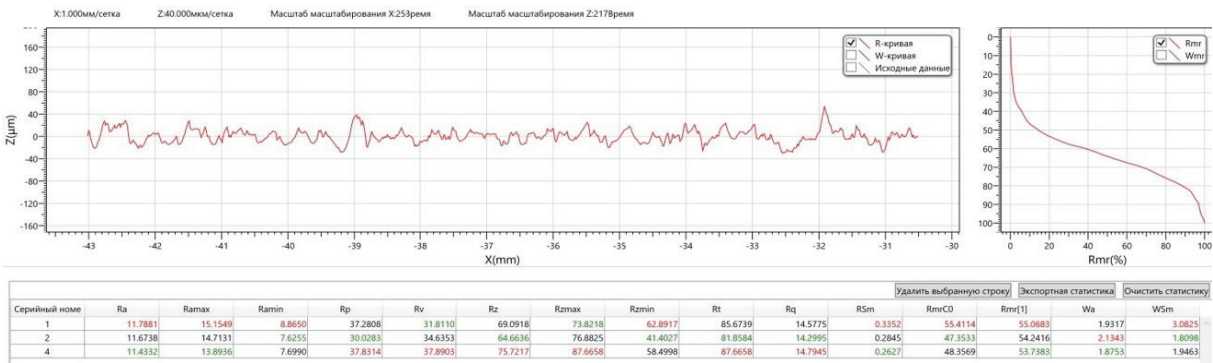


Рис. 4. Профиль поверхности образца
Fig. 4. Specimen surface profile

Табл. 3. Результаты измерения шероховатости в пределах базовой длины L
Table 3. Roughness measurement results within the base length L

Номер образца Number models	Среднее арифметическое отклонение профиля R_a , мкм The arithmetic mean deviation of the profile R_a , μm	Наибольшая высота профиля R_z , мкм The highest profile height R_z , μm	Полная высота профиля R_{max} , мкм Full profile height R_{max} , μm	Средний шаг неровностей профиля R_{Sm} , мм The average pitch of the profile irregularities R_{Sm} , mm	Количество неровностей на 1 пог. мм Number of irregularities per 1 mm
Вид 1 (давление — 3 атм, расстояние — 15 см, угол — 60°) Type 1 (pressure — 3 atm, distance — 15 cm, angle — 60°)					
1–1	7,4	45,4	56,0	0,2	5
1–1 реверс 1–1 Another	9,7	59,2	80,1	0,2	4
1–2	7,2	44,4	55,2	0,2	5
1–2 реверс 1–2 Another	9,7	62,5	90,0	0,2	5
Среднее The average value	8,5	52,9	70,3	0,2	5
Вид 2 (давление — 5 атм, расстояние — 15 см, угол — 60°) Type 2 (pressure — 5 atm, distance — 15 cm, angle — 60°)					
2–1	11,6	69,8	85,1	0,3	3
2–1 реверс 2–1 Another	10,0	66,3	97,6	0,2	4

Окончание табл. 3 / End of the Table 3

Номер образца Number models	Среднее арифметическое отклонение профиля R_a , мкм The arithmetic mean deviation of the profile R_a , μm	Наибольшая высота профиля R_z , мкм The highest profile height R_z , μm	Полная высота профиля R_{max} , мкм Full profile height R_{max} , μm	Средний шаг неровностей профиля R_{Sm} , мм The average pitch of the profile irregularities R_{Sm} , mm	Количество неровностей на 1 пог. мм Number of irregularities per 1 mm
2–2	10,8	65,0	88,5	0,3	4
2–2 реверс 2–2 Another	10,9	67,5	91,2	0,3	4
Среднее The average value	10,8	67,2	90,6	0,3	4
Вид 3 (давление — 5 атм, расстояние — 40 см, угол — 60°) Type 3 (pressure — 5 atm, distance — 40 cm, angle — 60°)					
3–1	8,6	51,6	64,8	0,2	5
3–1 реверс 3–1 Another	10,0	61,8	85,8	0,2	4
3–2	8,9	57,8	73,3	0,2	5
3–2 реверс 3–2 Another	8,5	56,8	83,7	0,2	5
Среднее The average value	9,0	57,0	76,9	0,2	5
Вид 4 (давление — 6 атм, расстояние — 15 см, угол — 60°) Type 4 (pressure — 6 atm, distance — 15 cm, angle — 60°)					
4–1	8,3	52,4	66,3	0,2	5
4–1 реверс 4–1 Another	10,8	66,2	88,9	0,3	4
4–2	10,0	57,6	73,9	0,2	5
4–2 реверс 4–2 Another	9,4	56,2	70,7	0,2	5
Среднее The average value	9,6	58,1	75,0	0,2	5
Вид 5 (давление — 6 атм, расстояние — 40 см, угол — 60°) Type 5 (pressure — 6 atm, distance — 40 cm, angle — 60°)					
5–1	10,8	71,1	89,8	0,2	5
5–1 реверс 5–1 Another	7,6	52,7	64,5	0,2	6
5–2	10,4	62,1	91,0	0,2	5
5–2 реверс 5–2 Another	6,7	46,3	55,9	0,1	7
Среднее The average value	8,9	58,1	75,3	0,2	5

щей кривой. По оси абсцисс расположены различные виды обработки поверхности трения согласно табл. 1. Из представленных данных следует, что второй способ обработки показывает наибольшие значения шероховатости R_z со средним значением 67,2 мкм, также для данного способа обработки шероховатость четырех поверхностей имеет минимальное среднее квадратичное отклонение.

Среднее значение шероховатости поверхности при втором виде пескоструйной обработки на 27 % больше, чем при втором способе обработки, и на 17 % больше, чем при третьем, четвертом и пятом способе обработки.

В табл. 4 приведено сравнение шероховатости поверхности при обработке, предложенной технологии с результатами других авторов [7]. В представленном

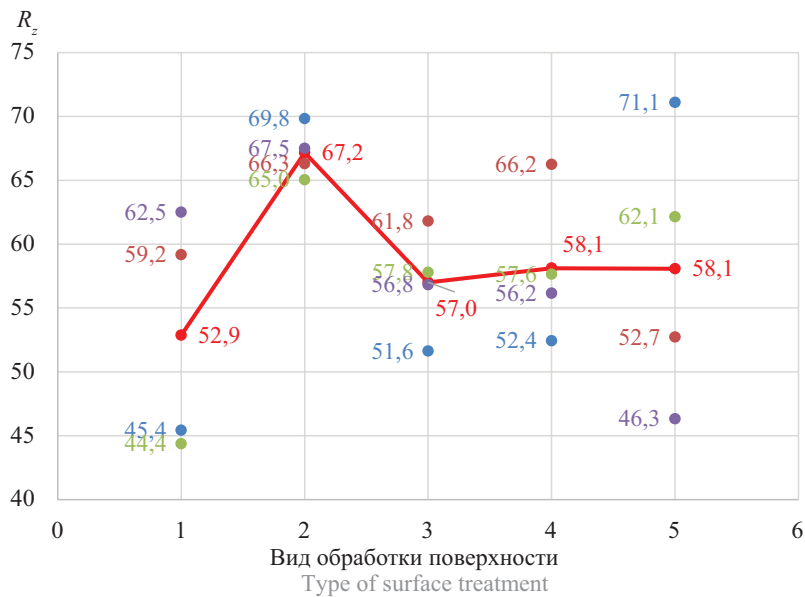


Рис. 5. Взаимосвязь между способом обработки и шероховатостью

Fig. 5. Relationship between processing method and roughness

Табл. 4. Результаты теста на шероховатость

Table 4. Roughness test results

Обработка поверхности Surface treatment	Шероховатость R_a , мкм Roughness R_a , μm
Полирование [1] Polishing [1]	0,19
Притирка [1] Lapping [1]	0,28
Фрезерование [1] Milling [1]	3,84
Полирование [1] Polishing [1]	1,10
Очистка щеткой [7] Brushing [7]	5,22
Пескоструйная обработка [7] Sandblasting [7]	5,93
Дробеструйная обработка [7] Shot blasting [7]	4,46
Пескоструйная обработка — покрытие распыленным металлом [7] Sandblasting — HVOF coating [7]	8,75
Пескоструйная обработка (давление — 3 атм, расстояние — 15 см) Sandblasting (pressure — 3 atm, distance — 15 cm)	8,5
Пескоструйная обработка (давление — 5 атм, расстояние — 15 см) Sandblasting (pressure — 5 atm, distance — 15 cm)	10,8
Пескоструйная обработка (давление — 5 атм, расстояние — 40 см) Sandblasting (pressure — 5 atm, distance — 40 cm)	9,0
Пескоструйная обработка (давление — 6 атм, расстояние — 15 см) Sandblasting (pressure — 6 atm, distance — 15 cm)	9,6
Пескоструйная обработка (давление — 6 атм, расстояние — 40 см) Sandblasting (pressure — 6 atm, distance — 40 cm)	8,9

исследовании использована низколегированная сталь 09Г2С с нормативным пределом текучести 345 МПа и временным сопротивлением 490 МПа, относительное удлинение 20 %. В работе [7] авторы испытывали пластины из аустенитной нержавеющей стали S31608 с условным пределом текучести 205 МПа и пределом прочности 515 МПа, данная сталь обладает значительной пластичностью с относительным удлинением $\delta = 40\%$ ¹¹, т.е. более пластичной стали. Режим пескоструйной обработки [7] был следующий: давление сжатого воздуха от 0,6 до 0,8 МПа, угол распыления от 15 до 30°, расстояние распыления от 10 до 30 см. Получается, что при более остром угле распыления (30° в [7] и 60° в настоящем исследовании) получается меньшая шероховатость, несмотря на сопоставимое давление (6–8 и 6 атм) и расстояние от сопла (10–30 и 15 см) соответственно. Интересно было бы исследовать, как меняется шероховатость поверхности при изменении угла распыления от 30 до 90°.

Различные значения шероховатости, указанные в табл. 4 для одного вида обработки (полирование), для исследований, выполненных Ivkovic и соавт. [1] и Zhang и соавт. [7], можно объяснить тем, что поверхности одного класса шероховатости, но с различными способами обработки могут иметь различную шероховатость.

Подобные отечественные исследования влияния пескоструйной обработки на шероховатость поверхности проводились А.С. Чесноковым в Институте инженеров геодезии и аэрофотосъемки в начале 70-х гг. прошлого века [32]. А.С. Чесноков по-

лучил, что средняя высота неровностей составляет $R_z = 85$ мкм и количество неровностей 7–8 на 1 пог. мм для образцов из кипящей малоуглеродистой стали марки СтЗкп. При этом точность измерения составляла 0,01–0,03 мм. В настоящем исследовании использованное современное оборудование с точностью $0,7 \cdot 10^{-5}$ мм показало R_z в диапазоне 52–67 мм с количеством неровностей на 1 пог. мм, равным 4–5.

Можно отметить, что, несмотря на имеющееся в распоряжении А.С. Чеснокова оборудование, которое уступает точности современных приборов на 4 порядка, полученные им данные сопоставимы с результатами настоящей работы, что свидетельствует о высоком уровне отечественных экспериментальных исследований, положенных в основу нормативных документов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Шероховатость контактной поверхности оказывает непосредственное влияние на коэффициент статического трения. В данном исследовании рассмотрено 5 вариантов пескоструйной обработки контактных поверхностей фрикционных соединений, отличающихся давлением и расстоянием от сопла. Была измерена шероховатость 15 поверхностей стальных пластин из стали 09Г2С с построением профиля поверхности. Обнаружено, что в одном из вариантов обработки при расстоянии 15 см и давлении 5 атм, шероховатость поверхности на 17 и 27 % превышает шероховатость при остальных способах обработки. В настоящей работе также сравнивались шероховатости поверхности, полученные в исследованиях зарубежных авторов.

¹¹ URL: http://www.ccsteels.com/Stainless_steel/1692.html

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ivkovic B., Durdjanovic M., Stamenkovic D. The Influence of the contact surface roughness on the static friction coefficient // *Tribology in industry*. 2000. Vol. 22. Issue 3–4. Pp. 41–44.
2. Туснин А.Р., Тихонов С.М., Алехин В.Н., Беляева З.В., Кудрявцев С.В., Рыбаков В.А. и др. Проектирование металлических конструкций. Часть 1. Металлические конструкции. Материалы и основы проектирования : учебник для вузов. М. : Издательство «Перо», 2020. 468 с. EDN BQNCPS.
3. Hogan T.J., Munter S.A. Design Guide 1: Bolt- ing in Structural Steel Connections. Australia : Australian Steel Institute, 2007.
4. Wang Y., Guan J., Zhang Y., Yang L. Experimental Research on Slip Factor in Bolted Connection with Stainless Steel // *Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science)*. 2013. Vol. 29. Issue 5. Pp. 769–774.
5. Stranghöner N., Afzali N., de Vries P., Schedin E., Pilhagen J. Slip factors for slip-resistant connections made of stainless steel // *Journal of Constructional*

- Steel Research. 2019. Vol. 152. Pp. 235–245. DOI: 10.1016/j.jcsr.2018.07.005
6. Stranghöner N., Afzali N., de Vries P., Schedin E., Pilhagen J., Cardwell S. Slip-resistant bolted connections of stainless steel // *Steel Construction*. 2017. Vol. 10. Issue 4. Pp. 333–343. DOI: 10.1002/stco.201710044
7. Zhang T., Bu Y., Wang Y., Chen Z., He W. Experimental Study on the Slip Behaviour of Stainless Steel High-Strength Bolted Connections with a New Surface Treatment // *Materials*. 2022. Vol. 15. Issue 16. P. 5672. DOI: 10.3390/ma15165672
8. Cruz A., Simões R., Alves R. Slip factor in slip resistant joints with high strength steel // *Journal of Constructional Steel Research*. 2012. Vol. 70. Pp. 280–288. DOI: 10.1016/j.jcsr.2011.11.001
9. Heistermann C., Veljkovic M., Simões R., Rebelo C., da Silva L.S. Design of slip resistant lap joints with long open slotted holes // *Journal of Constructional Steel Research*. 2013. Vol. 82. Pp. 223–233. DOI: 10.1016/j.jcsr.2012.11.012

10. Annan C.-D., Chiza A. Slip resistance of metalized-galvanized faying surfaces in steel bridge construction // *Journal of Constructional Steel Research*. 2014. Vol. 95. Pp. 211–219. DOI: 10.1016/j.jcsr.2013.12.008
11. Maiorana E., Zampieri P., Pellegrino C. Experimental tests on slip factor in friction joints: comparison between European and American Standards // *Frattura ed Integrità Strutturale*. 2017. Vol. 12. Issue 43. Pp. 205–217. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.43.16
12. Chander K.P., Vashista M., Sabiruddin K., Paul S., Bandyopadhyay P.P. Effects of grit blasting on surface properties of steel substrates // *Materials & Design*. 2009. Vol. 30. Issue 8. Pp. 2895–2902. DOI: 10.1016/j.matdes.2009.01.014
13. Day J., Huang X., Richards N. Examination of a grit-blasting process for thermal spraying using statistical methods // *Journal of Thermal Spray Technology*. 2005. Vol. 14. Issue 4. Pp. 471–479. DOI: 10.1361/105996305x76469
14. Varacalle D.J., Guillen D.P., Deason D.M., Rhodaberger W., Sampson E. Effect of grit-blasting on substrate roughness and coating adhesion // *Journal of Thermal Spray Technology*. 2006. Vol. 15. Issue 3. Pp. 348–355. DOI: 10.1361/105996306x124347
15. Mohammadi Z., Ziaei-Moayyed A., Sheikh-Mehdi Mesgar A. Grit blasting of Ti–6Al–4V alloy: optimization and its effect on adhesion strength of plasma-sprayed hydroxyapatite coatings // *Journal of Materials Processing Technology*. 2007. Vol. 194. Issue 1–3. Pp. 15–23. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.03.119
16. Rudawska A., Danczak I., Maller M., Valasek P. The effect of sandblasting on surface properties for adhesion // *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2016. Vol. 70. Pp. 176–190. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2016.06.010
17. Khan A.A., Al Kheraif A.A., Alhijji S.M., Matinlinna J.P. Effect of grit-blasting air pressure on adhesion strength of resin to titanium // *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2016. Vol. 65. Pp. 41–46. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2015.11.003
18. Li J., Li Y., Huang M., Xiang Y., Liao Y. Improvement of aluminum lithium alloy adhesion performance based on sandblasting techniques // *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2018. Vol. 84. Pp. 307–316. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2018.04.007
19. Caravaca C., Flamant Q., Anglada M., Gremillard L., Chevalier J. Impact of sandblasting on the mechanical properties and aging resistance of alumina and zirconia based ceramics // *Journal of the European Ceramic Society*. 2018. Vol. 38. Issue 3. Pp. 915–925. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2017.10.050
20. Okada M., Taketa H., Torii Y., Irie M., Matsumoto T. Optimal sandblasting conditions for conventional-type yttria-stabilized tetragonal zirconia polycrystals // *Dental Materials*. 2019. Vol. 35. Issue 1. Pp. 169–175. DOI: 10.1016/j.dental.2018.11.009
21. Wang H., Zhu R., Lu Y., Xiao G., He K., Yuan Y. *et al.* Effect of sandblasting intensity on microstructures and properties of pure titanium micro-arc oxidation coatings in an optimized composite technique // *Applied Surface Science*. 2014. Vol. 292. Pp. 204–212. DOI: 10.1016/j.apsusc.2013.11.115
22. Multigner M., Frutos E., Gonzalez-Carrasco J., Jimenez J., Marn P., Ibanez J. Influence of the sandblasting on the subsurface microstructure of 316LVM stainless steel: implications on the magnetic and mechanical properties // *Materials Science and Engineering: C*. 2009. Vol. 29. Issue 4. Pp. 1357–1360. DOI: 10.1016/j.msec.2008.11.002
23. Li X., Ye J., Zhang H., Feng T., Chen J., Hu X. Sandblasting induced stress release and enhanced adhesion strength of diamond films deposited on austenite stainless steel // *Applied Surface Science*. 2017. Vol. 412. Pp. 366–373. DOI: 10.1016/j.apsusc.2017.03.214
24. Ho B., Tsoi J., Liu D., Lung C.Y. K., Wong H., Matinlinna J.P. Effects of sandblasting distance and angles on resin cement bonding to zirconia and titanium // *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2015. Vol. 62. Pp. 25–31. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2015.06.009
25. Sorrentino L., Polini W., Bellini C., Parodo G. Surface treatment of CFRP: influence on single lap joint performances // *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2018. Vol. 85. Pp. 225–233. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2018.06.008
26. Watanabe I., Kurtz K., Kabcenell J., Okabe T. Effect of sandblasting and silicoating on bond strength of polymer-glass composite to cast titanium // *The Journal of Prosthetic Dentistry*. 1999. Vol. 82. Issue 4. Pp. 462–467. DOI: 10.1016/s0022-3913(99)70035-1
27. 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*. 2021. Vol. 389. P. 01080. DOI: 10.1051/e3sconf/202338901080
28. 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. № 1. С. 61–72. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.1.4. EDN NAXLLQ.
29. Poorna Chander K., Vashista M., Sabiruddin K., Paul S., Bandyopadhyay P.P. Effects of grit blasting on surface properties of steel substrates // *Materials & Design*. 2009. Vol. 30. Issue 8. Pp. 2895–2902. DOI: 10.1016/j.matdes.2009.01.014
30. Bechikh A., Klinkova O., Maalej Y., Tawfiq I., Nasri R. Sandblasting parameter variation effect on galvanized steel surface chemical composition, roughness and free energy // *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2020. Vol. 102. P. 102653. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2020.102653
31. Momber A.W., Wong Y.C., Budidharm E. Hydrodynamic profiling and grit blasting of low-carbon steel surfaces // *Tribology International*. 2002. Vol. 35. Issue 4. Pp. 271–281. DOI: 10.1016/s0301-679x(02)00009-9
32. Чесноков А.С. Сдвигоустойчивые соединения на высокопрочных болтах. М. : Стройиздат, 1974. 120 с.

Поступила в редакцию 19 декабря 2024 г.

Принята в доработанном виде 31 декабря 2024 г.

Одобрена для публикации 6 февраля 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: **Андрей Александрович Василькин** — кандидат технических наук, доцент кафедры металлических и деревянных конструкций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 636406, Scopus: 57192557109, ORCID: 0000-0003-0962-527X; vasilkinaa@mgsu.ru;

Илья Андреевич Василькин — студент; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; editorfarnsworth@gmail.com.

Вклад авторов:

Василькин А.А. — научное руководство, концепция исследования, научное редактирование текста статьи.

Василькин И.А. — подготовка моделей, проведение эксперимента, обработка результатов эксперимента.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Ivkovic B., Durdjanovic M., Stamenkovic D. The Influence of the contact surface roughness on the static friction coefficient. *Tribology in Industry*. 2000; 22(3-4):41-44.
2. Tusnin A.R., Tikhonov S.M., Alekhine V.N., Belyaeva Z.V., Kudryavtsev S.V., Rybakov V.A. et al. Design of metal structures. Part 1. Metal structures. *Materials and design principles: textbook for universities*. Moscow, Pero Publishing House, 2020; 468. EDN BQNCPS. (rus.).
3. Hogan T.J., Munter S.A. *Design Guide 1: Bolt-ing in Structural Steel Connections*. Australia, Australian Steel Institute, 2007.
4. Wang Y., Guan J., Zhang Y., Yang L. Experimental Research on Slip Factor in Bolted Connection with Stainless Steel. *Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science)*. 2013; 29(5):769-774.
5. Stranghöner N., Afzali N., de Vries P., Schedin E., Pilhagen J. Slip factors for slip-resistant connections made of stainless steel. *Journal of Constructional Steel Research*. 2019; 152:235-245. DOI: 10.1016/j.jcsr.2018.07.005
6. Stranghöner N., Afzali N., de Vries P., Schedin E., Pilhagen J., Cardwell S. Slip-resistant bolted connections of stainless steel. *Steel Construction*. 2017; 10(4):333-343. DOI: 10.1002/stco.201710044
7. Zhang T., Bu Y., Wang Y., Chen Z., He W. Experimental Study on the Slip Behaviour of Stainless Steel High-Strength Bolted Connections with a New Surface Treatment. *Materials*. 2022; 15(16):5672. DOI: 10.3390/ma15165672
8. Cruz A., Simões R., Alves R. Slip factor in slip resistant joints with high strength steel. *Journal of Constructional Steel Research*. 2012; 70:280-288. DOI: 10.1016/j.jcsr.2011.11.001
9. Heistermann C., Veljkovic M., Simões R., Rebelo C., da Silva L.S. Design of slip resistant lap joints with long open slotted holes. *Journal of Constructional Steel Research*. 2013; 82:223-233. DOI: 10.1016/j.jcsr.2012.11.012
10. Annan C.-D., Chiza A. Slip resistance of metalized-galvanized faying surfaces in steel bridge construction. *Journal of Constructional Steel Research*. 2014; 95:211-219. DOI: 10.1016/j.jcsr.2013.12.008
11. Maiorana E., Zampieri P., Pellegrino C. Experimental tests on slip factor in friction joints: comparison between European and American Standards. *Frattura ed Integrità Strutturale*. 2017; 12(43):205-217. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.43.16
12. Chander K.P., Vashista M., Sabiruddin K., Paul S., Bandyopadhyay P.P. Effects of grit blasting on surface properties of steel substrates. *Materials & Design*. 2009; 30(8):2895-2902. DOI: 10.1016/j.matdes.2009.01.014
13. Day J., Huang X., Richards N. Examination of a grit-blasting process for thermal spraying using statistical methods. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2005; 14(4):471-479. DOI: 10.1361/105996305x76469
14. Varacalle D.J., Guillen D.P., Deason D.M., Rhodaberger W., Sampson E. Effect of grit-blasting on substrate roughness and coating adhesion. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2006; 15(3):348-355. DOI: 10.1361/105996306x124347
15. Mohammadi Z., Ziaei-Moayyed A., Sheikh-Mehdi Mesgar A. Grit blasting of Ti-6Al-4V alloy: optimization and its effect on adhesion strength of plasma-sprayed hydroxyapatite coatings. *Journal of Materials Processing Technology*. 2007; 194(1-3):15-23. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.03.119
16. Rudawska A., Danczak I., Maller M., Valasek P. The effect of sandblasting on surface properties for adhesion. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2016; 70:176-190. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2016.06.010

17. Khan A.A., Al Kheraif A.A., Alhijji S.M., Matinlinna J.P. Effect of grit-blasting air pressure on adhesion strength of resin to titanium. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2016; 65:41-46. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2015.11.003
18. Li J., Li Y., Huang M., Xiang Y., Liao Y. Improvement of aluminum lithium alloy adhesion performance based on sandblasting techniques. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2018; 84:307-316. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2018.04.007
19. Caravaca C., Flamant Q., Anglada M., Gremillard L., Chevalier J. Impact of sandblasting on the mechanical properties and aging resistance of alumina and zirconia based ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*. 2018; 38(3):915-925. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2017.10.050
20. Okada M., Taketa H., Torii Y., Irie M., Matsumoto T. Optimal sandblasting conditions for conventional-type yttria-stabilized tetragonal zirconia polycrystals. *Dental Materials*. 2019; 35(1):169-175. DOI: 10.1016/j.dental.2018.11.009
21. Wang H., Zhu R., Lu Y., Xiao G., He K., Yuan Y. et al. Effect of sandblasting intensity on microstructures and properties of pure titanium micro-arc oxidation coatings in an optimized composite technique. *Applied Surface Science*. 2014; 292:204-212. DOI: 10.1016/j.apsusc.2013.11.115
22. Multigner M., Frutos E., Gonzalez-Carrasco J., Jimenez J., Marn P., Ibanez J. Influence of the sandblasting on the subsurface microstructure of 316LVM stainless steel: implications on the magnetic and mechanical properties. *Materials Science and Engineering: C*. 2009; 29(4):1357-1360. DOI: 10.1016/j.msec.2008.11.002
23. Li X., Ye J., Zhang H., Feng T., Chen J., Hu X. Sandblasting induced stress release and enhanced adhesion strength of diamond films deposited on austenite stainless steel. *Applied Surface Science*. 2017; 412:366-373. DOI: 10.1016/j.apsusc.2017.03.214
24. Ho B., Tsoi J., Liu D., Lung C.Y. K., Wong H., Matinlinna J.P. Effects of sandblasting distance and angles on resin cement bonding to zirconia and titanium. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2015; 62:25-31. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2015.06.009
25. Sorrentino L., Polini W., Bellini C., Parodo G. Surface treatment of CFRP: influence on single lap joint performances. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2018; 85:225-233. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2018.06.008
26. Watanabe I., Kurtz K., Kabcenell J., Okabe T. Effect of sandblasting and silicoating on bond strength of polymer-glass composite to cast titanium. *The Journal of Prosthetic Dentistry*. 1999; 82(4):462-467. DOI: 10.1016/s0022-3913(99)70035-1
27. 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*. 2021; 389:01080. DOI: 10.1051/e3sconf/202338901080
28. Vasilkin A.A., Zubkov G.V., Prokaev S.A., Vasilkin I.A. Friction area size of the friction bolted connection. *Construction: Science and Education*. 2024; 14(1):61-72. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.1.4. EDN NAXLLQ. (rus.).
29. Poorna Chander K., Vashista M., Sabiruddin K., Paul S., Bandyopadhyay P.P. Effects of grit blasting on surface properties of steel substrates. *Materials & Design*. 2009; 30(8):2895-2902. DOI: 10.1016/j.matdes.2009.01.014
30. Bechikh A., Klinkova O., Maalej Y., Tawfiq I., Nasri R. Sandblasting parameter variation effect on galvanized steel surface chemical composition, roughness and free energy. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2020; 102:102653. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2020.102653
31. Momber A.W., Wong Y.C., Budidharm E. Hydrodynamic profiling and grit blasting of low-carbon steel surfaces. *Tribology International*. 2002; 35(4):271-281. DOI: 10.1016/s0301-679x(02)00009-9
32. Chesnokov A.S., Knyazhev A.F. *Shear-resistant joints with high-strength bolts*. Moscow, Stroyizdat, 1974; 120. (rus.).

Received December 19, 2024.

Adopted in revised form on December 31, 2024.

Approved for publication on February 6, 2025.

B I O N O T E S: **Andrey A. Vasil'kin** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor 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; ID RSCI: 636406, Scopus: 57192557109, ORCID: 0000-0003-0962-527X; vasilkinaa@mgsu.ru;

Ilya A. Vasilkin — student; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; editorfarnsworth@gmail.com.

Contribution of the authors:

Andrey A. Vasil'kin — scientific guidance, scientific editing of the text of the article.

Ilya A. Vasilkin — preparation of models, conducting an experiment, processing the results of the experiment.

The authors declare that there is no conflict of interest.