Напряженно-деформированное состояние фрикционных соединений с лазерной обработкой контактных поверхностей

Г.В. Мартынов, Д.Е. Монастырева, А.И. Макаров, Е.А. Морина

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ),
195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29

АННОТАЦИЯ

Введение. Исследованы возможности применения лазерной очистки в качестве альтернативного способа. Лазерные установки зарекомендовали себя во многих сферах и представляют собой высокотехнологичное и эффективное решение для многих строительных задач. Несмотря на это в настоящее время распространенным методом обработки контактных поверхностей высокопрочных болтовых соединений остается пескоструйная обработка — устаревшая технология, с высоким износом оборудования, опасная для здоровья людей.

Материалы и методы. Образцы, обработанные пескоструйным и лазерным методами, испытывали на сдвиг. Перед испытаниями проверены шероховатость контактных поверхностей и усилие натяжения высокопрочных метизов. В ходе испытаний снимались показания силоизмерителя и датчика часового типа. Эксперименты проводились на прессе гидравлическом ИПС-500, образцы были предоставлены в обработанном виде.

Результаты. По полученным данным построены графики деформации и вычислены усилия сдвига образцов. Вычисленные усилия сравнивались с нормативными значениями. Результаты показали соответствие образцов требованиям СП 35.13330.2016 «Мосты и трубы» по прочностным характеристикам. Образцы с лазерной очисткой поверхности имели значение запаса прочности, аналогичное образцам с пескоструйной обработкой.

Выводы. Сопоставление прочностных характеристик доказывает возможность применения лазерной очистки контактных поверхностей фрикционных соединений. После перехода от устаревших технологий процесс подготовки поверхностей можно будет сделать экономичным и экологичным. Полученные значения и данные возможно внести в ряд нормативных документов, в том числе СП 35.13330.2016 «Мосты и трубы», для проведения будущих исследований и повсеместного применения метода.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: фрикционные соединения, высокопрочные болты, контактные поверхности, лазерная обработка, усилие сдвига, запас прочности, пескоструйная обработка

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: 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

Stress-strain state of friction joints with laser treatment of contact surfaces

Gleb V. Martynov, Daria E. Monastireva, Aleksey I. Makarov, Elena A. Morina

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU),
29 Polytechnicheskaya st., St. Petersburg, 195251, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Researched is conducted to determine the possibility of using an alternative method — laser cleaning. Laser systems have proven themselves in many areas and are a high-tech and effective solution for many construction problems. Despite this nowadays sandblasting is the most common method of processing contact surfaces of high-strength bolted joints — an outdated technology, with high equipment wear and even dangerous to people's health.

Materials and methods. Sandblast and laser-treated specimens were tested for shear. Before testing, the roughness of the contact surfaces and the tension force of high-strength bolts were tested. During the test, the readings of the meter and dial-indicator were taken. The experiments were carried out on a hydraulic press IPS-500, the samples were provided in a processed form.

Results. According to the data obtained, strain graphs were plotted and the shear forces of the samples were calculated. Calculated efforts were compared with standard values. The results show the compliance of samples with the requirements of SP 35.13330.2016 "Bridges and pipes" in terms of strength characteristics. Samples with laser surface cleaning have a safety margin value similar to sandblasted samples.

Conclusions. Comparison of the strength characteristics proves the possibility of using laser cleaning of the contact surfaces of friction joints. After the transition from outdated technologies, the process of surface preparation can be made economical and environmentally friendly. The obtained values and data can be entered into a number of regulatory documents, including SP 35.13330.2016 "Bridges and pipes" for future research and the widespread application of the method.

KEYWORDS: friction joints, high strength bolts, contact surfaces, laser treatment, shearing force, safety factor, sandblasting

FOR CITATION: Martynov G.V., Monastireva D.E., Makarov A.I., Morina E.A. Stress-strain state of friction joints with laser treatment of contact surfaces. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2019; 14:1:72-82. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.1.72-82 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Первые лазеры, разработанные советскими учеными в середине прошлого века, поражали умы современников и порождали многочисленные фантастические сюжеты о высокотехнологичном будущем. Всего за несколько десятилетий данная технология изменила облик мира и заняла место во всех сферах жизнедеятельности человека — от медицины до повседневного быта [1–5]. В строительной отрасли лазеры нашли применение при возведении зданий и сооружений. Высокоточные измерительные и геодезические приборы значительно ускоряют строительные операции, но это не предел использования лазерных технологий [6, 7]. Широко распространенная методика лазерной очистки поверхностей может эффективно использоваться фактически на любой строительной площадке с металлическими конструкциями. Применение новейших технологий особенно оправдано на таких объектах, как промышленные и гражданские мосты — конструкции, от надежности которых зависят жизни людей.

Фрикционные соединения на высокопрочных болтах — наиболее ответственный тип соединения в металлических конструкциях мостов. Особенность данного вида соединений заключается в том, что передача усилий осуществляется только силами трения, возникающими по контактным поверхностям соединяемых деталей вследствие натяжения болтов [8–12]. Для получения надежных сдвигоустойчивых болтовых соединений все работы на монтаже конструкций должны вестись так, чтобы болты имели проектное осевое натяжение P , а состояние соприкасающихся поверхностей (поверхностей трения) имело предусмотренный проектом коэффициент трения μ . Если поверхности деталей будут обработаны небрежно, с отступлениями от условий, обеспечивающих требуемое качество, величина коэффициента μ может снизиться, прочность болтовых соединений будет отличаться от проектной и все сооружение получится малонадежным [13–16]. Поэтому все работы по подготовке соприкасающихся поверхностей необходимо выполнять тщательно. Чтобы обеспечить должное трение между соприкасающимися деталями, их поверхности в пределах узлов и соединений не только тщательно очищают от масла и грязи, но соответствующим образом обрабатывают для удаления окалины и получения шероховатости, коэффициент трения которой соответствовал бы значению, заложенному в проекте.

В настоящее время, наиболее распространенным способом обработки контактных поверхностей является пескоструйная обработка. Данная технология обеспечивает высокие и, что важно, стабильные значения коэффициента трения, в силу чего этот способ считается лучшим и им следует пользоваться

всегда, когда это возможно. Однако пескоструйная обработка имеет ряд недостатков — она вредна для работающих, так как выделяющаяся пыль, содержащая частицы кремния, может привести к серьезным заболеваниям. Также особые требования предъявляются к пескоструйным аппаратам, как к сосудам, работающим под высоким давлением. Песок для обработки должен обладать определенными свойствами по крупности и влажности. Быстрый износ рабочей части — сопла, как ответственной части пескоструйной установки, а также специальные требования к сжатому воздуху требуют поиска новых альтернативных способов обработки контактных поверхностей [17–20].

Лазер представляет собой устройство преобразования энергии в узконаправленный поток излучения. Механизм лазерной очистки поверхностей заключается в импульсном воздействии излучения на вещества загрязняющие поверхность. В результате фотомеханической реакции с большим количеством энергии образуется плазма — ионизированный газ. Следующая стадия, ионная «бомбардировка», сопровождается расширением плазмы и уничтожением загрязняющих частиц ударной волной. Природа лазерного излучения гарантирует целостность основного слоя металла и позволяет контролировать степень разрушения определенных материалов в зависимости от частоты и времени воздействия. Опытным путем выяснив допустимый диапазон неразрушающих, но эффективных частот становится возможным использование технологии при обработке металлических поверхностей [21–24].

В данный момент на рынке уже существуют мобильные устройства, позволяющие проводить лазерную очистку. Они обладают достаточной точностью для обработки труднодоступных участков благодаря узконаправленному лазерному пучку. Важнейшим достоинством является безопасность для оператора и окружающих лиц обусловленная механизмом процесса. При работе лазерного оборудования не образуется кремниевой пыли и других вредных отходов, наносящих вред дыхательной системе человека, а отсутствие необходимости непосредственного контакта с обрабатываемой поверхностью снижает риск травматизма. Следует отметить экономическую эффективность применения устройств по причине невысокой цены и износоустойчивости оборудования, низкого расхода материалов. Таким образом, технология лазерной обработки обладает значительными преимуществами по сравнению с традиционными способами и может найти применение при установке фрикционных болтовых соединений. Для подтверждения данной гипотезы необходимо провести натурные испытания образцов и проверить полученные результаты на соответствие нормативным документам.

Общие аспекты использования лазеров рассмотрены в статье авторской группы во главе с М. Вол-

ковым. Работа «Лазерная очистка и лазерный наклеп — технологии улучшения свойств поверхности» посвящена влиянию лазерной обработки на такие характеристики материалов, как износостойкость, коррозионная стойкость и шероховатость. При проведении опытов с применением аппаратов, разработанных российскими инженерами, были получены многочисленные опытные образцы. В итоге на основе полученных данных были сделаны выводы об исключительно положительном влиянии технологии на производственный процесс и эффективности применения лазеров в очистке поверхностей из разных материалов [25].

Физико-технологический аспект лазерной очистки в своей работе изучали С. Сиано и В.А. Парфенов. В контексте рассмотрения методик реставрации объектов исторического наследия, объектов культуры и искусства на основе экспериментальных данных были отмечены важные с практической точки зрения особенности и нюансы проведения лазерной обработки. Так было выяснено, что для каждого обрабатываемого объекта необходимо подбирать свой индивидуальный режим работы. А по предварительно проведенным опытам можно установить лишь допустимые границы значений частоты и длительность воздействия, в пределах которых необходимые процессы возымеют эффект, но не повредят конструкцию. Несмотря на многочисленные позитивные стороны применения лазеров, авторы отмечают необходимость их совмещения с классическими (химическими и механическими) методами очистки поверхности [26].

Вопрос обработки контактных поверхностей фрикционных соединений хорошо изучен, в то время как лазерной очистке металлических поверхностей посвящено сравнительно небольшое количество научных работ.

Цель данного исследования — практическое обоснование эффективности применения лазерной обработки контактных поверхностей фрикционных соединений как альтернативы классическим методам.

Решаемые задачи:

- проведение испытаний на сдвиг соединений на высокопрочных болтах при пескоструйной обработке контактных поверхностей;
- проведение испытаний на сдвиг соединений на высокопрочных болтах при лазерной обработке контактных поверхностей с круговым и квадратным типами обработки;
- сопоставление фактических усилий сдвига и запаса при лазерной и пескоструйной обработке контактных поверхностей.

МЕТОДИКА

Испытываемые образцы были предоставлены ООО «Лазерный центр». Для обеспечения расчетного коэффициента трения μ применялась пескоструйная обработка без последующей консервации.

Шероховатость поверхности металла после обработки составляла $\geq R_{\text{a}40}$, что соответствует требованиям [4]. Оценка шероховатости поверхности производилась портативным измерителем шероховатости TR200.

Для конструкций использовались болты 1.2 М22, 10.9ХЛ ГОСТ Р 52644-2006, гайки М22.10 ГОСТ Р 52645-2006 и шайбы 2-22 ГОСТ Р 52646-2006. Заготовки для изготовления образцов представлены на рис. 1.

Перед установкой в конструкцию производили подготовку высокопрочных метизов. Натяжение высокопрочных болтов на расчетное усилие производили закручиванием гайки с обеспечением требуемого крутящего момента динамометрическими ключами.

Рис. 1. Заготовки из листов 16 мм для изготовления образцов

Fig. 1. Blanks from 16 mm sheets for making samples

Рис. 2. Собранный образец, установленный на станине пресса

Fig. 2. Assembled sample mounted on the press frame

При тарировании разброс по крайним значениям крутящего момента, развиваемого ключом, не превышал $\pm 5\%$. После постановки высокопрочных болтов в узел проводили контрольную проверку соответствия усилий натяжения болтов расчетным значениям. Болты, закрученные на расчетное уси-

лие, герметизировали. Собранный образец, установленный на станине пресса, представлен на рис. 2.

Лазерная обработка поверхностей была произведена ООО «Лазерный центр». Усилие сдвига образца определяли по силоизмерителю испытательной машины и цифровым датчикам часового типа.

a

b

Рис. 3. a — образец № 1 перед сборкой: тип обработки — круг внешним диаметром 80 мм; b — образец № 1 во время проведения испытаний: тип обработки — круг внешним диаметром 80 мм

Fig. 3. a — sample No. 1 before assembly: type of processing — a circle with an outer diameter of 80 mm; b — sample No. 1 during the tests: type of processing — a circle with an outer diameter of 80 mm

a

b

Рис. 4. *a* — образец № 2 перед сборкой: тип обработки — квадрат со сторонами 50 × 50 мм; *b* — образец № 2 во время проведения испытаний: тип обработки — квадрат со сторонами 50 × 50 мм

Fig. 4. *a* — sample No. 2 before assembly: type of processing — square with sides 50 × 50 mm; *b* — sample No. 2 during the tests: type of processing — square with sides 50 × 50 mm

На рис. 3 и 4 показаны образцы перед сборкой и во время проведения испытаний.

Образцы испытывали по методике испытаний приведенной в ВСН 144-76 на прессе гидравлическом ИПС-500 № 24 в лаборатории НИИ мостов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты испытаний болтовых соединений на сдвиг после пескоструйной обработки приведены в табл. 1.

Результаты испытаний на сдвиг соединений на высокопрочных болтах 1.2 М22, 10.9ХЛ с гайкой М22.10 соответствуют требованиям ВСН 144-76, запас усилия составил 16–31 %.

Образец № 1: тип обработки — круг внешним диаметром 80 мм. Образец № 2: тип обработки — квадрат со сторонами 50 × 50 мм. Внутренний диаметр отверстий — 25 мм.

Расчетное сопротивление высокопрочных болтов по ГОСТ Р 52643 и ГОСТ Р 52644 по растяжению R_{bh} следует определять по формуле:

$$R_{bh} = 0,7 \cdot R_{bun}, \quad (1)$$

где R_{bun} — наименьшее временное сопротивление высокопрочных болтов разрыву.

В фрикционных и комбинированных фрикционно-сварных соединениях расчетное усилие Q_{bh} , которое может быть воспринято каждой поверхностью трения соединяемых элементов, стянутых одним высокопрочным болтом (одним болтоконтактом), следует определять по формуле:

$$Q_{bh} = \frac{P\mu}{\gamma_{bh}}, \quad (2)$$

где P — усилие натяжения высокопрочного болта; μ — коэффициент трения, принимаемый по таблице 8.12 СП 35.13330.2011; γ_{bh} — коэффициент надежности, принимаемый по таблице 8.12 СП 35.13330.2011.

Усилие натяжения P высокопрочного болта следует определять по формуле:

$$P = R_{bh} A_{bn} m_{bh}, \quad (3)$$

где R_{bh} — расчетное сопротивление высокопрочного болта растяжению, определяемое по формуле (1); A_{bn} — площадь сечения болта нетто по резьбе согласно ГОСТ Р 52643; m_{bh} — коэффициент условий работы высокопрочных болтов при контроле натяжения по крутящему моменту, равный 0,95.

Число n высокопрочных болтов в соединении при действии продольной силы N , проходящей че-

Табл. 1. Сводные результаты испытаний болтовых соединений на сдвиг (пескоструйная обработка)

Table 1. Summary of shear bolt joint test results (sandblasting)

Маркировка образца / Marking sample	Размеры пластин / Dimensions of plates	Количество борткомплектов в образце, шт. / Amount bolt sets in the sample, pc	Нормативное усилие сдвига, т / Normative an effort shear, t	Фактическое усилие сдвига, т / Actual an effort shear, t	Запас усилия, % / Stock efforts, %
1	250 × 260 × 16	9	148,5	172,5	16
2	250 × 260 × 16	9	148,5	195,0	31

рез центр тяжести соединения, следует определять по формуле:

$$n \geq \frac{N}{mQ_{bh}n_s}, \quad (4)$$

где m — коэффициент условий работы, принимаемый по таблице 8.15 СП 35.13330.2011; Q_{bh} — рас-

четное усилие на один болтоконтакт, определяемое по формуле (2); n_s — число контактов в соединении.

Результаты испытаний болтовых соединений на сдвиг после лазерной обработки сведены в табл. 2–4.

Результаты испытаний на сдвиг соединений на высокопрочных болтах 1.2 М22, 10.9ХЛ с гайкой

Табл. 2. Образец № 1 (тип обработки — круг)

Table 2. Sample No. 1 (type of treatment — circle)

Нагрузка, тс / Load, tnf	Деформация, мм / Deformation, mm	Нагрузка, тс / Load, tnf	Деформация, мм / Deformation, mm	Нагрузка, тс / Load, tnf	Деформация, мм / Deformation, mm
0	0,000	65	0,205	130	0,330
5	0,120	70	0,220	135	0,330
10	0,155	75	0,230	140	0,330
15	0,180	80	0,245	145	0,330
20	0,200	85	0,255	150	0,330
25	0,223	90	0,270	155	0,345
30	0,243	95	0,280	160	0,415
35	0,263	100	0,290	165	0,550
40	0,285	105	0,300	170	0,795
45	0,301	110	0,305	175	1,055
50	0,318	115	0,320	179	1,335
55	0,335	120	0,325		
60	0,352	125	0,335		

Табл. 3. Образец № 2 (тип обработки — квадрат)

Table 3. Sample No. 2 (type of treatment — square)

Нагрузка, тс / Load, tnf	Деформация — ИЧТ № 1 / Deformation — dial indicator No. 1	Деформация — ИЧТ № 2 / Deformation — dial indicator No. 2	Среднее значение по ИЧТ № 1 и 2, мм / The average value of DI No. 1 and 2, mm	Нагрузка, тс / Load, tnf	Деформация — ИЧТ № 1 / Deformation — dial indicator No. 1	Деформация — ИЧТ № 1 / Deforma- tion — dial indicator No. 2	Среднее значение по ИЧТ № 1 и 2, мм / The aver- age value of DI No. 1 and 2, mm
0	0,000	0,000	0,000	95	0,470	0,415	0,443
5	0,120	0,065	0,093	100	0,487	0,435	0,461
10	0,155	0,115	0,135	105	0,507	0,455	0,481
15	0,180	0,140	0,160	110	0,527	0,465	0,496
20	0,200	0,175	0,188	115	0,546	0,480	0,513
25	0,223	0,190	0,207	120	0,561	0,495	0,528
30	0,243	0,210	0,227	125	0,581	0,510	0,546
35	0,263	0,230	0,247	130	0,605	0,520	0,563
40	0,285	0,245	0,265	135	0,624	0,535	0,580
45	0,301	0,265	0,283	140	0,647	0,550	0,599
50	0,318	0,280	0,299	145	0,674	0,565	0,620
55	0,335	0,300	0,318	150	0,700	0,580	0,640
60	0,352	0,315	0,334	155	0,727	0,595	0,661
65	0,369	0,330	0,350	160	0,763	0,610	0,687
70	0,386	0,340	0,363	165	0,800	0,625	0,713
75	0,402	0,355	0,379	170	0,859	0,635	0,747
80	0,419	0,370	0,395	175	0,915	0,650	0,783
85	0,434	0,385	0,410	178	0,980	0,672	0,826
90	0,450	0,400	0,425				

Табл. 4. Сводные результаты испытаний болтовых соединений на сдвиг (лазерная обработка)

Table 4. Summary of bolt shear test results (laser treatment)

Номер образца / Sample number	Размеры обрабатываемой поверхности / Dimensions of the surface to be treated	Количество болто-комплектов в образце, шт. / Number of bolts in the sample, pc	Нормативное усилие сдвига, т / Normative effort shear, t	Фактическое усилие сдвига, т / Actual effort shear, t	Запас усилия, % / Stock efforts, %
1: тип обработки — круг / type of pro- cessing — circle	Внешний диаметр 80 мм / Outer diameter 80 mm	9	148,5	179	17
2: тип обработки — квадрат / type of processing — square	Стороны квадрата 50 × 50 мм / Sides of the square 50 × 50 mm	9	148,5	178	16,6

Рис. 5. График деформации двухсрезных девятиболтовых образцов под действием статического нагружения

Fig. 5. Diagram of deformation of two-section nine-bolt specimens under static loading

Табл. 5. Сравнительная таблица результатов испытаний

Table 5. Comparison of bolt shear test results

Тип обработки / Type of processing	Пескоструйная / Sandblasting	Пескоструйная / Sandblasting	Лазер / Laser	Лазер / Laser
Образец / Sample	1	2	Тип обработки — круг / Type of treat- ment — circle	Тип обработки — квадрат / Type of treatment — square
Усилие сдвига / Shearing force	172,5	195	179	178
Запас / Stock	16 %	31%	17 %	16,6 %

М 22.10 соответствуют требованиям ВСН 144-76, запас усилия составил 16,6–17,7 %.

Для выявления наиболее эффективного способа обработки контактных поверхностей составим сравнительную табл. 5.

Как видно из полученных значений, лазерная обработка поверхностей дает сопоставимый с классическим методом обработки запас прочности. Таким образом, соединения с лазерной подготовкой поверхности не уступают в прочностных характеристиках пескоструйной обработке и соответственно отвечают требованиям нормативных документов, в т.ч. СП 35.13330.2016 «Мосты и трубы».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведение сравнительных испытаний образцов с поверхностями, обработанными пескоструй-

ной обработкой, лазером и анализ графиков (рис. 5) дают основания сделать следующие выводы:

1. Поверхность стали после специальной обработки лазером принципиально может быть допущена для создания фрикционных соединений с использованием высокопрочных болтов при условии соблюдения режимов обработки, обеспечивающих шероховатость не ниже 20 мкм. Данный способ обработки может быть внесен в ряд нормативных документов для проектирования высокопрочных болтовых соединений.

2. Лазерный способ обработки обеспечивает необходимое усилие сдвига с достаточным запасом, при этом он обладает экологичностью, экономической эффективностью, простотой в использовании по сравнению с традиционным методом пескоструйной обработки контактных поверхностей, а главное — безопасностью для жизни и здоровья рабочих.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вейко В.П., Смирнов В.Н., Чирков А.М., Шахно Е.А. Лазерная очистка в машиностроении и приборостроении. СПб.: НИУ ИТМО, 2013. С. 33–53.
2. Ягольник О.Н., Богомолов Р.А., Гордин Ю.А. Опыт применения лазерной очистки поверхности при реставрации художественных изделий из металла // Технология художественной обработки материалов. 2015. С. 175–178.
3. Дуганов В.Я., Корнюшина А.Г. Обработка поверхностей лазером в машиностроении // Научные технологии и инновации: сб. докл. Междунар. науч.-практ. конф. (6–7 октября 2016 года, Белгород). Белгород, 2016. С. 46–49.
4. Zakalukina L., Trusov V., Yurkov N. Using laser treatment in modern manufacturing // Information innovative technologies. 2017. No. 1. Pp. 129–132.
5. Iakovlev A., Ruzankina J., Kascheev S., Vasilyev O., Parfenov V., Grishkanich A. Laser anti-corrosion treatment of metal surfaces // High-Power Laser Materi-

- als Processing: Applications, Diagnostics, and Systems VI. 2017. Pp. 97–103. DOI: 10.1117/12.2249953
6. Каплунов И.А., Роголин В.Е., Филин С.А. Исследование возможности лазерно-химической очистки металлических поверхностей // Цветные металлы. 2014. № 7 (859). С. 72–75.
7. Ульман К. Диодные лазеры высокой мощности для промышленной обработки материалов // Фотоника. 2016. № 3. С. 58–63.
8. Семенов А.А., Мажаренко А.А., Порываев И.А., Сафиуллин М.Н. Напряженно-деформированное состояние высокопрочных болтов фланцевых соединений в укрупнительных стыках стропильных ферм // Инженерно-строительный журнал. 2014. № 5 (49). С. 54–62. DOI: 10.5862/MCE.49.6
9. Бондарев А.Б., Югов А.М. Методика расчета точности большепролетных шарнирно-стержневых металлических покрытий // Инженерно-строительный журнал. 2016. № 1 (61). С. 60–73. DOI: 10.5862/MCE.61.6

10. Бирюков А.С., Деменко О.Г., Михаленко Н.А. Влияние жесткости соединительной связи на передачу продольной ударной нагрузки через болтовое соединение тел // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2017. № 1 (35). С. 53–63.
11. Солодов Н.В. Прочность и деформативность при смятии в болтовом соединении // Вестник Белгородского технологического университета им. В.Г. Шухова. 2017. № 1 (2). С. 82–87. DOI: 10.12737/23889
12. Балеев Б.Ф. Расчет группового болтового соединения // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2017. № 2. С. 88–93.
13. Lipińska M., Ura-bińczyk E., Olejnik I., Rosochowski A., Lewandowska M. Microstructure and corrosion behavior of the friction stir welded joints made from ultrafine grained aluminum // Advanced Engineering Materials. 2017. Vol. 19. Issue 7. P. 1600807. DOI: 10.1002/adem.201600807
14. Eliseev A.A., Fortuna S.V., Kalashnikova T.A., Chumaevskii A.V., Kolubaev E.A. Structural phase evolution in ultrasonic-assisted friction stir welded 2195 aluminum alloy joints // Russian physics journal. 2017. Vol. 60. Issue 6. Pp. 1022–1026. DOI: 10.1007/s11182-017-1172-x
15. Reshetnikova E.S., Usatij D.U., Usataya T.V. Bolts Manufacturing technology // Solid state phenomena. 2017. Vol. 265. Pp. 79–85. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.265.79
16. Baiburin A.K., Semenov K.O. Contribution of clearance holes to semi-rigid effects of bolted joints // IOP conference series: materials science and engineering. 2017. Vol. 262. P. 012073. DOI: 10.1088/1757-899X/262/1/012073
17. Filippov A.A., Pachurin G.V., Naumov V.I., Kuz'min N.A. Low-cost treatment of rolled products used to make long high-strength bolts // Metallurgist. 2016. Vol. 59. Issue 9–10. Pp. 810–817. DOI: 10.1007/s11015-016-0177-y
18. Hsia S.Y., Chou Y.T., Chao J.C. A study of high-strength bolts after dephosphoring // Advances in Mechanical Engineering. 2016. Vol. 8. Issue 3. P. 168781401663731. DOI: 10.1177/1687814016637317
19. Hui W., Zhang Y., Zhao X., Shao C., Wang K., Sun W. et al. Influence of cold deformation and annealing on hydrogen embrittlement of cold hardening bainitic steel for high strength bolts // Materials Science and Engineering: A. 2016. Vol. 662. Pp. 528–536. DOI: 10.1016/j.msea.2016.03.104
20. Santos T.F.A., Torres E.A., Lippold J.C., Ramirez A.J. Detailed microstructural characterization and restoration mechanisms of duplex and superduplex stainless steel friction-stir-welded joints // Journal of Materials Engineering and Performance. 2016. Vol. 25. Issue 12. Pp. 5173–5188. DOI: 10.1007/s11665-016-2357-0
21. Пегасина А.В., Шенелев А.Е. Экспериментальное исследование эффективности обработки конструкционной стали 20 импульсным излучением волоконного лазера // XXII Туполевские чтения (школа молодых ученых) : Междунар. мол. науч. конф. 2017. С. 548–553.
22. Yatsko D.S., Polonik M.V., Dudko O.V. Optimization of the fiber laser parameters for local high-temperature impact on metal // Asia-Pacific conference on fundamental problems of opto- and microelectronics. 2016. DOI: 10.1117/12.2268241
23. Ruzankina J.S., Vasiliev O.S. Study on possibility for the improvement of corrosion resistance of metals using laser-formed oxide surface structure // Journal of Physics: Conference Series. 2016. Vol. 735. P. 012050. DOI: 10.1088/1742-6596/735/1/012050
24. Gurin A.M., Kovalev O.B., Smirnova E.M. Termocapillary and thermoconcentration instability of a melt during laser treatment of metal surface // XIX International conference on the methods of aerophysical research. 2018. Pp. 111–116.
25. Волков М., Кишалов А., Орлов Н., Серебряков В., Смирнов В., Филатов А. Лазерная очистка и лазерный наклеп — технологии улучшения свойств поверхности // Фотоника. 2014. № 3 (45). С. 34–44.
26. Сиано С., Парфенов В.А. Физико-технологические аспекты лазерной очистки позолоченной меди и бронзы // Материалы семинара проблемы реставрации и обеспечения сохранности памятников культуры и истории. 2011. № 2009–2010. С. 19–33.

Поступила в редакцию 25 октября 2018 г.

Принята в доработанном виде 11 ноября 2018 г.

Одобрена для публикации 25 декабря 2018 г.

ОБ АВТОРАХ: Мартынов Глеб Вадимович — студент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ), 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, martynovgleb@rambler.ru;

Монастырева Дарья Евгеньевна — студентка, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ), 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, 02dm12@rambler.ru;

Макаров Алексей Игоревич — студент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ), 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, almak17@yandex.ru;

Морина Елена Андреевна — студентка, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ), 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, lenusik_ya_ne@mail.ru.

REFERENCES

1. Veyko V.P., Smirnov V.N., Chirkov A.M., Shakhno Ye.A. *Laser cleaning in mechanical engineering and instrument making*. St. Petersburg, ITMO University, 2013; 33-53. (rus.).
2. Yagolnik O.N., Bogomolov R.A., Gordin Yu.A. Experience in the use of laser surface cleaning during the restoration of art metal products. *Technology artistic processing of materials*. 2015; 175-178. (rus.).
3. Duganov V.Ya., Korniyushina A.G. Surface treatment by laser in mechanical engineering. *High technology and innovation : collection of reports of the International Scientific and Practical Conference (October 6–7, 2016, Belgorod)*. Belgorod, 2016; 46-49. (rus.).
4. Zakalukina L., Trusov V., Yurkov N. Using laser treatment in modern manufacturing. *Information innovative technologies*. 2017; 1:129-132.
5. Iakovlev A., Ruzankina J., Kascheev S., Vasilyev O., Parfenov V., Grishkanich A. Laser anti-corrosion treatment of metal surfaces. *High-Power Laser Materials Processing: Applications, Diagnostics, and Systems VI*. 2017; 97-103. DOI: 10.1117/12.2249953
6. Kaplunov I.A., Rogalin V.Ye., Filin S.A. Research of possibility of laser-chemical purification of metallic surfaces. *Nonferrous metals*. 2014; 7(859):72-75. (rus.).
7. Ulman K. High-power diode lasers for industrial materials processing. *Fotonika*. 2016; 3:58-63. (rus.).
8. Semenov A.A., Malyarenko A.A., Porivaev I.A., Safiullin M.N. Stress-strain behavior investigation of friction grip bolts in flange joints of trusses. *Magazine of Civil Engineering*. 2014; 5(49):54-62. DOI: 10.5862/MCE.49.6 (rus.).
9. Bondarev A.B., Yugov A.M. The method of calculation accuracy large-span metal rod systems. *Magazine of Civil Engineering*. 2016; 1(61):60-73. DOI: 10.5862/MCE.61.6 (rus.).
10. Birukov A.S., Demenko O.G., Mikhaleiko N.A. Influence of connecting rigidity on longitudinal shock load transfer through bolted assembly. *Bulletin of NPO S.A. Lavochkin*. 2017; 1(35):53-63. (rus.).
11. Solodov N.V. Strength and deformability in crumpled into the bolted connection. *Bulletin of the Belgorod State Technological University named V.G. Shukhov*. 2017; 1(2):82-87. DOI: 10.12737/23889 (rus.).
12. Balejev B.F. Calculation of group bolting. *Proceedings of the NSTU R.E. Alekseeva*. 2017; 2:88-93. (rus.).
13. Lipińska M., Ura-bińczyk E., Olejnik I., Rosochowski A., Lewandowska M. Microstructure and corrosion behavior of the friction stir welded joints made from ultrafine grained aluminum. *Advanced Engineering Materials*. 2017; 19(7):1600807. DOI: 10.1002/adem.201600807
14. Eliseev A.A., Fortuna S.V., Kalashnikova T.A., Chumaevskii A.V., Kolubaev E.A. Structural phase evolution in ultrasonic-assisted friction stir welded 2195 aluminum alloy joints. *Russian physics journal*. 2017; 60(6):1022-1026. DOI: 10.1007/s11182-017-1172-x
15. Reshetnikova E.S., Usatiy D.U., Usataya T.V. Bolts Manufacturing technology. *Solid state phenomena*. 2017; 265:79-85. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.265.79
16. Baiburin A.K., Semenov K.O. Contribution of clearance holes to semi-rigid effects of bolted joints. *IOP conference series: materials science and engineering*. 2017; 262:012073. DOI: 10.1088/1757-899X/262/1/012073
17. Filippov A.A., Pachurin G.V., Naumov V.I., Kuz'min N.A. Low-cost treatment of rolled products used to make long high-strength bolts. *Metallurgist*. 2016; 59(9-10):810-817. DOI: 10.1007/s11015-016-0177-y
18. Hsia S.Y., Chou Y.T., Chao J.C. A study of high-strength bolts after dephosphoring. *Advances in Mechanical Engineering*. 2016; 8(3):168781401663731. DOI: 10.1177/1687814016637317
19. Hui W., Zhang Y., Zhao X., Shao C., Wang K., Sun W. et al. Influence of cold deformation and annealing on hydrogen embrittlement of cold hardening bainitic steel for high strength bolts. *Materials Science and Engineering: A*. 2016; 662:528-536. DOI: 10.1016/j.msea.2016.03.104
20. Santos T.F.A., Torres E.A., Lippold J.C., Ramirez A.J. Detailed microstructural characterization and restoration mechanisms of duplex and superduplex stainless steel friction-stir-welded joints. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2016; 25(12):5173-5188. DOI: 10.1007/s11665-016-2357-0
21. Pegasina A.V., Shepelev A.Ye. Experimental study of the efficiency of the processing of structural steel 20 pulsed radiation from a fiber laser. *International youth scientific conference "XXII Tupolev readings (school of young scientists)"*. 2017; 548-553. (rus.).
22. Yatsko D.S., Polonik M.V., Dudko O.V. Optimization of the fiber laser parameters for local high-temperature impact on metal. *Asia-pacific conference on fundamental problems of opto- and microelectronics*. 2016. DOI: 10.1117/12.2268241
23. Ruzankina J.S., Vasiliev O.S. Study on possibility for the improvement of corrosion resistance of metals using laser-formed oxide surface structure. *Journal of physics: conference series*. 2016; 735:012050. DOI: 10.1088/1742-6596/735/1/012050
24. Gurin A.M., Kovalev O.B., Smirnova E.M. Termocapillary and thermoconcentration instability of a melt during laser treatment of metal surface. *XIX In-*

ternational conference on the methods of aerophysical research. 2018; 111-116.

25. Volkov M., Kishalov A., Orlov N., Serebryakov V., Smirnov V., Filatov A. Laser cleaning and laser shot peening. technologies for surface properties improvement. *Fotonika*. 2014; 3(45):34-44. (rus.).

26. Siano S., Parfenov V.A. Physical and technological aspects of laser cleaning of gilded copper and bronze. *Workshop materials on the problem of restoration and preservation of cultural and historical monuments*. 2011; 2009-2010:19-33. (rus.).

Received October 25, 2018.

Adopted in a modified form on November 11, 2018.

Approved for publication December 25, 2018.

ABOUT THE AUTHORS: **Gleb V. Martynov** — undergraduate student, **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**, 29 Polytechnicheskaya st., St. Petersburg, 195251, Russian Federation, martynovgleb@rambler.ru;

Daria E. Monastireva — undergraduate student, **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**, 29 Polytechnicheskaya st., St. Petersburg, 195251, Russian Federation, 02dm12@rambler.ru;

Aleksey I. Makarov — undergraduate student, **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**, 29 Polytechnicheskaya st., St. Petersburg, 195251, Russian Federation, almak17@yandex.ru;

Elena A. Morina — undergraduate student, **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**, 29 Polytechnicheskaya st., St. Petersburg, 195251, Russian Federation, lenusik_ya_ne@mail.ru.