

УДК 624.27.8.002

С. Ю. Каптелин, Г. Н. Ростовых**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ УСТРОЙСТВА
ФРИКЦИОННЫХ СОЕДИНЕНИЙ**

Дата поступления: 01.07.2015

Решение о публикации: 16.09.2015

Цель: Обеспечить технологичность и надёжность фрикционных соединений. **Методы:** Совершенствование способов контроля усилия при натяжении высокопрочных болтов. В отечественной практике применялись два способа контроля натяжения: закручиванием гайки с обеспечением требуемого крутящего момента (натяжение по крутящему моменту) и поворотом гайки на заданный угол от фиксированного начального положения гайки (натяжение по углу поворота). Второй способ обладает очень низкой точностью и в настоящее время не применяется. Контроль по первому способу предполагает использование динамометрических ключей, требующих регулярной тарировки и работы специально обученного персонала, а использование динамометрических ключей типа ММК, КТР и КМШ с индикатором часового типа ИЧ10 весьма трудоёмко, при этом оценка результата применения субъективна. Трудоёмкость работ по устройству фрикционных соединений в значительной мере снижается при использовании гидравлических динамометрических ключей. Однако при их использовании сохраняется проблема прокручивания болтов при вращении гайки. **Результаты:** Недостатки применяемых в настоящее время технологий устройства фрикционных соединений полностью устраняются при использовании высокопрочных болтов с контролем натяжения по срезу торцевого элемента. **Практическая значимость:** Применение таких болтов стабилизирует усилия в болтовых соединениях, упрощает монтажные операции, делает их более производительными и сокращает сроки монтажа.

Фрикционное соединение, высокопрочный метиз, шероховатость контактной поверхности, профилометр, усилие натяжения высокопрочного болта, динамометрический ключ, динамометрическая установка, коэффициент закручивания, высокопрочный болт с контролируемым напряжением.

***Sergey Yu. Kaptelin**, Cand. Sci. (Eng.), associate professor, laboratory head, kaps1962@yandex.ru (Petersburg State Transport University); **Grigoriy N. Rostovkykh**, senior researcher, _gregg@rambler.ru (Research Institute for Bridges and Defectoscopy) IMPROVING TECHNOLOGIES FOR FRICTION JOINT DEVICES

Objective: To ensure ease of manufacture and reliability of friction joints. **Methods:** Improving methods for force control in stretch of high-strength bolts. In common domestic practice, two stretch control methods were used, by tightening the screw with ensuring required rotational moment (rotational moment stretch) and by turning the screw at a set angle from a specified starting position (turning angle stretch). The latter method is very inaccurate and is no longer in use. The former method requires the use of tension-indicating wrenches that need regular calibration tests and work of specially trained personnel, and using tension-indicating wrenches of MMK, KTR and KMSH types with ICh-10 dial indicator is quite labour-intensive, and evaluation of use result is subjective. Labour intensity of works in friction joint devices is significantly reduced if hydraulic torque wrenches are used but the problem of bolt spinning when screw is being rotated remains. **Results:** Shortcomings of friction joint devices that are in use now are quite eliminated if high-strength bolts with stretch control by end-wall truncation are used. **Practical importance:** The use of such bolts stabilises strain in bolted connections, simplifies assembly operations, makes them more productive, and cuts amount of time required for assembly.

Frictional connection, high-strength hardware, roughness of a contact surface, roughness-measuring instrument, effort of tension of a high-strength bolt, force measurement wrench, force measurement installation, factor of twisting, high-strength bolt with controllable pressure.

Фрикционные соединения на высокопрочных болтах в настоящее время применяются во многих отраслях промышленности, тяжёлого машиностроения, энергетики, строительства зданий и сооружений. Такие соединения надёжны в самых сложных условиях работы конструкции под воздействием различного рода знакопеременных нагрузок: вибрационных, динамических, сейсмических. Высокопрочные болты устанавливаются в конструкциях подъёмных кранов, реакторов, сосудов высокого давления, высокотемпературных резервуаров, насосов, компрессоров, трубопроводов, высотных зданий и мостовых сооружений. Они незаменимы в креплениях подшипников гребных валов судов, корпусов двигателей, ветряных турбин, на подвижном составе железнодорожного транспорта, поэтому в настоящее время интенсивно ведётся поиск новых конструктивных и технологических решений выполнения фрикционных соединений на высокопрочных болтах.

Теоретические основы устройства фрикционных соединений на высокопрочных болтах

Важнейшим достоинством соединений на высокопрочных болтах является их эффективное сопротивление сдвигу соприкасающихся поверхностей соединяемых конструкций. За счёт этого значительно уменьшаются остаточ-

ные перемещения конструкций и увеличивается их несущая способность.

Во фрикционных соединениях, согласно СП 35.13330.2011 [3], расчётное усилие – Q_{bh} , которое может быть воспринято каждой поверхностью трения соединяемых элементов, стянутых одним высокопрочным болтом, т. е. несущая способность одного болтоконтакта зависит от усилия натяжения высокопрочного болта P и коэффициента трения между контактными поверхностями μ :

$$Q_{bh} = P \mu / \gamma_{bh}, \quad (1)$$

где γ_{bh} – коэффициент надёжности, принимаемый по табл. 8.12 СП 35.13330.2011 или по табл. 42 СП 16.13330.2011 в зависимости от величины μ и количества болтов в соединении.

В соответствии с выражением (1) основными параметрами, обеспечивающими надёжность работы соединений на высокопрочных болтах, являются усилие сжатия контактных поверхностей, создаваемое высокопрочным болтом, и качество подготовки фрикционных поверхностей соединяемых элементов, характеризующееся шероховатостью и коэффициентом трения.

Чем больше шероховатость контактных поверхностей, тем больше коэффициент трения и выше несущая способность фрикционного соединения (рис. 1).

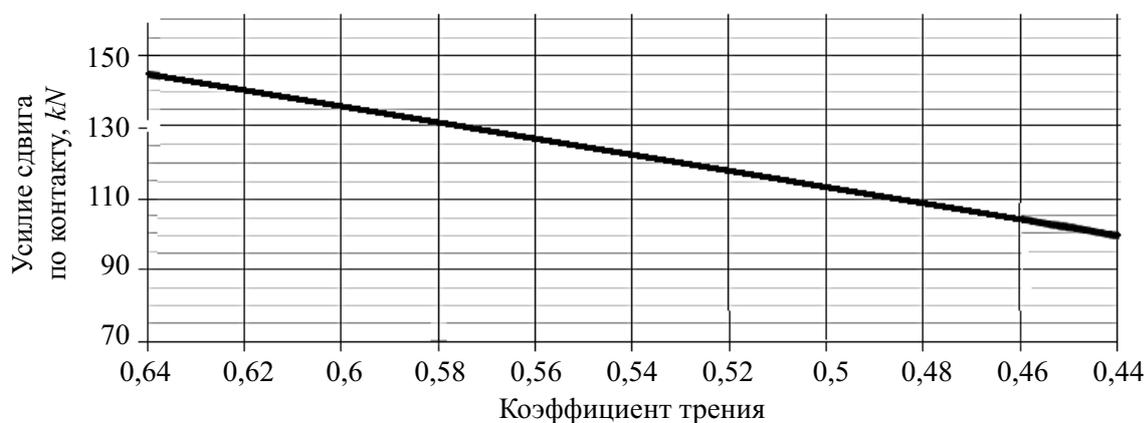


Рис. 1. Зависимость усилия сдвига по контакту от коэффициента трения для фрикционного соединения на болтах диаметром 22 мм

Требуемая шероховатость поверхностей не менее $Rz40$ обеспечивается пескоструйным, дробеструйным, дробеметным и другими способами обработки при изготовлении конструкций.

Шероховатость контролируется механическими, оптическими или цифровыми портативными профилометрами и профилемерами моделей Elcometer 224, TR100, TR200, SurfTest SJ-210, TIME 3220, PosiTector SPG, TQC SP1562, Surtronic 25 и др.

Важнейшей технологической задачей при устройстве фрикционных соединений является обеспечение требуемого усилия сжатия между контактными поверхностями соединяемых элементов конструкции натяжением высокопрочного болта на усилие P , величина которого определяется согласно п. 8.100 СП 35.13330.2011 [3]:

$$P = R_{bh} \cdot A_{bn} \cdot m_{bh}. \quad (2)$$

Расчётное сопротивление высокопрочного болта растяжению R_{bh} зависит от механических свойств, химического состава и способа термообработки стали, используемой для изготовления метизов. Предельно допустимая величина R_{bh} в соответствии с п. 6.7 СП 16.13330.2011 и п. 8.14 СП 35.13330.2011 принимается не более 70% от минимального временного сопротивления высокопрочных болтов разрыву R_{bun} по ГОСТ Р 52627-2006, т. е.

$$R_{bh} = 0,7R_{bun}.$$

Такой уровень предварительного напряжения болтов обеспечивает их надёжную работу на динамические нагрузки, предотвращая возможную потерю выносливости и усталостное разрушение соединений.

Номинальная площадь поперечного сечения болта A_{bn} в формуле (2) зависит от геометрических параметров его резьбовой поверхности и принимается по ГОСТ Р ИСО 898-1-2011.

Коэффициент надёжности m_{bh} в формуле (2) связан со способом контроля натяжения

высокопрочных болтов, принимается равным 0,95 при используемом в настоящее время способе контроля по крутящему моменту.

Значения нормативных усилий натяжения высокопрочных болтов приведены в табл. Е.1 ГОСТ Р 52643-2006. Их необходимо точно соблюдать при сборке фрикционных соединений.

Контроль усилия натяжения высокопрочных болтов при современном строительстве мостов

Наиболее широко распространён метод контроля натяжения болта по крутящему моменту. Для создания проектного усилия натяжения высокопрочного болта P , кН, необходимо приложить крутящий момент, величина которого в Н·м пропорциональна диаметру болта d , мм, и определяется согласно СП 006-97 [4] по эмпирической формуле

$$M_{кр} = kPd.$$

Коэффициент k , называемый коэффициентом закручивания, отражает влияние многочисленных технологических факторов.

На соотношение между крутящим моментом и усилием в болте влияют несколько основных факторов. Во-первых, шероховатость резьбовых поверхностей гайки и болта, определяющая величину сил трения в резьбе при закручивании. Во-вторых, геометрические параметры резьбы, её шаг и угол профиля. В-третьих, чистота соприкасающихся поверхностей шайбы и головки болта или гайки в зависимости от того, какой элемент вращается при натяжении соединения.

Схема расположения контактных поверхностей, влияющих на величину коэффициента закручивания, приведена на рис. 2.

Существенное значение имеют механические свойства и химический состав стали, из которой изготовлены болты, гайки и шайбы, наличие антикоррозионного покрытия, а также

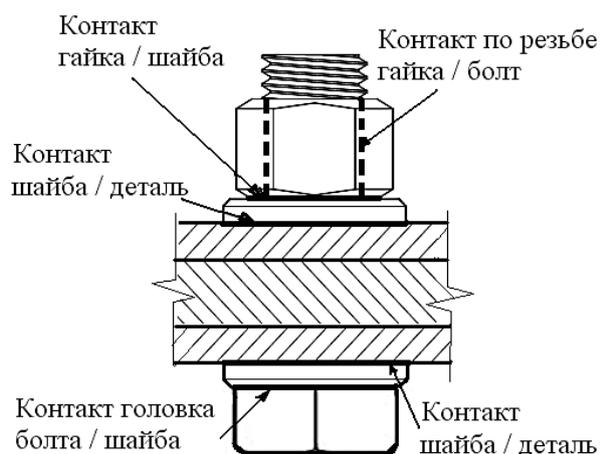


Рис. 2. Схема расположения контактных поверхностей, влияющих на величину коэффициента закручивания

вид смазки резьбовых и контактных поверхностей.

На коэффициент закручивания влияет и то, вращением какого элемента натягивается болт-контакт. СТП 006-97 установлено, что при закручивании соединения вращением болта значение крутящего момента должно приниматься на 5% больше, чем при натяжении вращением гайки [4].

Воздействие этих многочисленных факторов невозможно определить теоретически, и общей оценочной характеристикой их влияния является устанавливаемый экспериментально коэффициент закручивания.

Для высокопрочных болтов, выпускаемых Воронежским, Улан-Удэнским и Курганским мостовыми заводами по ГОСТ Р 52643... 52646-2006 значения P и $M_{кр}$ для болтов различного диаметра приведены в табл. 2 СТП 006-97 [4]. При этом коэффициент закручивания k принят равным 0,175.

В настоящее время для фрикционных соединений применяются метизы, изготовленные в разных странах, на разных заводах, по разным технологиям и стандартам. Допущены к использованию высокопрочные метизы с антикоррозионным покрытием: кадмированием, цинкованием, омеднением и другим. В этих условиях фактическое значение коэффициента закручивания может существенно отличаться

от нормативных значений, и его необходимо контролировать для каждой партии комплектующих высокопрочных метизов при входном контроле на строительной площадке по методике, приведенной в приложении Е ГОСТ Р 52643 и в приложении А СТП 006-97. Допустимые значения коэффициента закручивания в соответствии с требованиями п. 3.11 ГОСТ Р 52643 должны быть в пределах 0,14–0,2 для метизов без защитного покрытия и 0,11–0,2 – для метизов с покрытием. Погрешность оценки коэффициента закручивания не должна превышать 0,01.

Для определения коэффициента закручивания используют испытательное оборудование, позволяющее одновременно измерять приложенный к гайке крутящий момент и возникающее в теле болта усилие натяжения с погрешностью, не превышающей 1%. При этом применяются измерительные приборы, основанные на различных принципах регистрации контролируемых характеристик. В качестве такого оборудования в настоящее время используют динамометрические установки типа ДКП-1, УТБ-40, GVK-14m и другие.

Для натяжения болтов на проектное усилие СТП 006-97 рекомендует использовать гидравлические динамометрические ключи типа КЛЦ, автоматически обеспечивающие требуемый крутящий момент с погрешностью, не превышающей 4%, посредством цепной передачи, приводимой в движение гидроцилиндром.

Однако в настоящее время при строительстве транспортных инженерных сооружений для натяжения высокопрочных болтов, как правило, применяют ручные динамометрические ключи рычажного типа КТР Курганского завода ММК с индикатором часового типа ИЧ 10. Их использование приводит к значительным трудозатратам и физическим перегрузкам рабочих в связи с необходимостью приложения силы от 500 до 800 Н к рукоятке ключа при создании проектной величины крутящего момента в процессе сборки фрикционных соединений на болтах диаметром 16–27 мм. Кроме того, процесс установки

высокопрочных болтов ключами КТР значительно удлиняется из-за необходимости постоянно каждые 4 ч непрерывной работы и не менее двух раз за смену контролировать исправность ключей их тарировкой способом подвески контрольного груза.

Тарирование ключей КЛЦ проводится реже: непосредственно перед их первым применением, после натяжения 1000 и 2000 болтов и затем каждый раз после натяжения 5000 болтов либо в случае замены таких составных элементов ключа, как гидроцилиндр или цепной барабан.

При использовании гидравлических ключей упрощается контроль величины крутящего момента, который осуществляется по манометрам, а специальный механизм в конструкции ключа или насосной станции предотвращает чрезмерное натяжение болта.

Стоит отметить, что затяжка болтов должна происходить плавно, без рывков. Это практически невозможно обеспечить, используя ручные динамометрические ключи с длинной рукояткой, осложняющей затяжку болтов при сборке металлоконструкций в стеснённых условиях. Гидравлические ключи типа КЛЦ обеспечивают плавную затяжку высокопрочных болтов в ограниченном пространстве благодаря меньшим размерам и противомоментным упорам.

В настоящее время в мире разработаны различные модификации гидравлических динамометрических ключей: серии SDW (2 SDW), SDU (05SDU, 10SDU, 20SDU), TS (TS-07, TS-1), TWH-N (TWH27N) и других (рис. 3).

Все модели имеют малогабаритное исполнение, предназначены для работы в труднодоступных местах с ограниченным доступом и обеспечивают снижение трудоёмкости работ по устройству фрикционных соединений.

Для обеспечения требуемой точности измерений необходимо выполнять тарировку оборудования.

Тарировку силоизмерительных устройств контроля натяжения болта в динамометрических установках выполняют на разрывной испытательной машине с построением тарировочного графика в координатах: усилие натяжения болта в кН (тс) – показание динамометра.

Тарировку механических динамометрических ключей типа КМШ-1400 и КПТР-150 производят с помощью грузов, подвешиваемых на свободном конце рукоятки горизонтально закреплённого ключа. По результатам тарировки строится тарировочный график в координатах: крутящий момент в Нм – показания регистрирующего измерительного прибора ключа.

Тарировать гидравлические динамометрические ключи типа КЛЦ-110, КЛЦ-160 и других можно с использованием тарировочного устройства типа УТ-1, конструкция и принцип работы которого описаны в СТП 006-97, приложение К [4].

При использовании динамометрических ключей возникает проблема прокручивания болтов при затяжке гаек, особенно обостряющаяся при применении высокопрочного крепежа, изготовленного по ГОСТ Р 52643–52646.



Рис. 3. Гидравлические динамометрические ключи

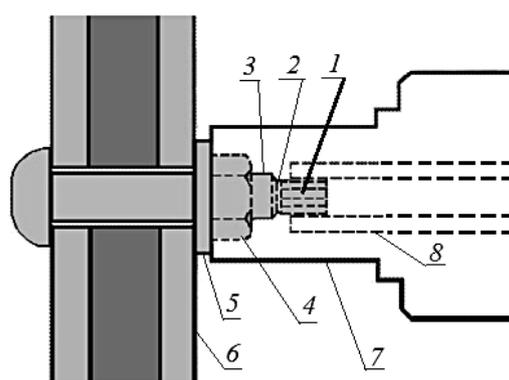
По данным «НИИ Мостов и дефектоскопии» установлено, что закрученные гайковёртом болты при дотягивании их динамометрическими ключами до расчётного усилия прокручиваются в 50% случаев [2]. Причина прокручивания заключается в недостаточной шероховатости контактных поверхностей головки болта и шайбы, подкладываемой под неё.

Новая технология контроля натяжения высокопрочных болтов при устройстве фрикционных соединений

Инновационным решением проблемы контроля крутящего момента для обеспечения нормативного усилия натяжения болтоконтакта является новая конструкция высокопрочного болта с торцевым срезаемым элементом (рис. 4). Геометрическая форма таких болтов отличается наличием полукруглой головки и



Рис. 4. Комплект метизов с контролем натяжения по срезу торцевого элемента



торцевого элемента с зубчатой поверхностью, сопряжённого со стержнем болта кольцевой выточкой, глубина которой калибрует площадь среза. Диаметр дна выточки составляет 70% номинального диаметра резьбы.

Высокопрочные болты с контролируемым напряжением Tension Control Bolts (TCB) широко применяются в мире. Их производят в соответствии с техническими требованиями EN 14399-1, с полем допуска резьбы для болтов 6g и для гаек 6H по стандартам ISO 261, ISO 965-2, с классом прочности 10.9 и механическими свойствами по стандарту EN ISO 898-1 и с предельными отклонениями размеров по стандарту EN 14399-10.

В нашей стране в ЦНИИПСК им. Мельникова пока разработаны только ТУ 1282-162-02494680-2007 [1, 5]. Метизы новой конструкции не производятся и не применяются.

Конструкция болта с гарантированным моментом затяжки резьбовых соединений основана на связи механических свойств стали при растяжении и срезе. Расчётное сопротивление стали при срезе составляет 58% от расчётного сопротивления при растяжении, определённого по пределу текучести.

При вращении болта за торцевой элемент муфтой внутреннего захвата ключа происходит закручивание гайки, удерживаемой муфтой наружного захвата ключа. В момент

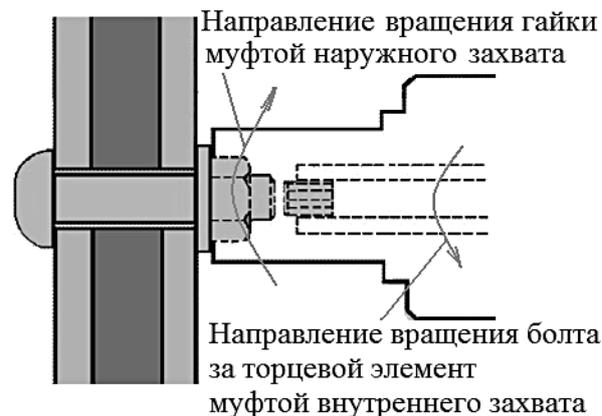


Рис. 5. Схема натяжения болта до и после среза торцевого элемента:
1 – срезаемый торцевой элемент с зубчатой поверхностью; 2 – кольцевая выточка расчетного диаметра; 3 – резьба; 4 – гайка; 5 – шайба; 6 – элемент соединения; 7 – муфта наружного захвата; 8 – муфта внутреннего захвата



GH241EZ
for M16 · M20 · M22 · M24
5/8" · 3/4" · 7/8" · 1"



GHC241EZ
for M16 · M20 · M22 · M24
5/8" · 3/4" · 7/8" · 1"



GM221EZ
for M16 · M20 · M22
5/8" · 3/4" · 7/8"

Рис. 6. Ключи для сборки фрикционных соединений на высокопрочных метизах с контролем натяжения по срезу торцевого элемента

достижения необходимого усилия натяжения болта торцевой элемент срезается по сечению, имеющему строго определённый расчёт диаметра (рис. 5).

Для сборки фрикционных соединений на высокопрочных метизах с контролем натяжения по срезу торцевого элемента применяют ключи специальной конструкции (рис. 6).

Заключение

Применение болтов с контролируемым натяжением срезом торцевого элемента значи-

тельно увеличит производительность работ по сборке фрикционных соединений.

Устойчивая связь между прочностью стали на срез и на растяжение $R_s = 0,58R_y$ позволяет сделать вывод о надёжности такого способа натяжения высокопрочных болтов.

Такая технология натяжения болтов может исключить трудоёмкую и непроизводительную операцию тарировки динамометрических ключей, необходимость в которой вообще исчезает.

Конструкция ключей для установки болтов с контролем натяжения по срезу торцевого элемента не создаёт внешнего крутящего

момента в процессе натяжения. В результате ключи не требуют упоров и имеют небольшие размеры.

Механизм ключей обеспечивает плавное закручивание вращением болта до момента среза концевой части, соответствующего достижению проектного усилия натяжения болта. При этом сборку фрикционных соединений можно производить с одной стороны конструкции.

Головку болта можно делать не шестигранной, а округлой, что упростит форму штампов для ее формирования в процессе изготовления болтов и устранил различие во внешнем виде болтового и заклепочного соединения.

Применение болтов новой конструкции значительно снизит трудоёмкость операции устройства фрикционных соединений, делает её технологичной и высокопроизводительной.

Библиографический список

1. Гладштейн Л. И. Высокопрочные болты для строительных стальных конструкций с контролем натяжения по срезу торцевой части / Л. И. Гладштейн, В. М. Бабушкин, Б. Ф. Какулия, Р. В. Гафуров // Тр. ЦНИИПСК им. Мельникова. Промышленное и гражданское строительство. – 2008. – № 5. – С. 11–13.

2. Ростовых Г. Н. И все-таки они крутятся! / Г. Н. Ростовых // Крепеж, клеи, инструмент и... – 2014. – № 3. – С. 41–45.

3. СП 35.13330.2011. Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03-84*.

4. СТП 006-97. Устройство соединений на высокопрочных болтах в стальных конструкциях мостов.

5. ТУ 1282-162-02494680-2007. Болты высокопрочные с гарантированным моментом затяжки резьбовых соединений для строительных стальных конструкций / ЦНИИПСК им. Мельникова.

References

1. Gladshcheyn L. I., Babushkin V. M., Kakuliya B. F. & Gafurov R. V. *Trudy TsNIIPSK im. Melnikova. Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitelstvo – Proc. of the Melnikov Construction Metal Structures Institute. Industrial and Civil Construction*, 2008, no. 5, pp. 11-13.

2. Rostovykh G. N. *Krepezh, klei, instrument i... – Bolting, Glue, Tools and...* 2014, no. 3, pp. 41-45.

3. Mosty i truby [Bridges and Pipes]. SP 35.13330. 2011. Updated version of SNiP 2.05.03-84*.

4. Ustroystvo soyedineniy na vysokoprochnykh boltakh v stalnykh konstruktsiyakh mostov [Setting up High-Strength Bolt Connections in Steel Constructions of Bridges]. STP 006-97.

5. Bolty vysokoprochnyye s garantirovannym momentom zatyazhki rezbovykh soyedineniy dlya stroitelnykh stalnykh konstruktsiy [High-Strength Bolts with Guaranteed Fixing Torque of Screw Joints for Construction Steel Structures]. TU 1282-162-02494680-2007. Melnikov Construction Metal Structures Institute.

*КАПТЕЛИН Сергей Юрьевич – канд. техн. наук, доцент, заведующий лабораторией, kaps1962@yandex.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I); РОСТОВЫХ Григорий Николаевич – старший научный сотрудник, _gregg@rambler.ru (НИИ Мостов и дефектоскопии).