

УДК 624.078.4

*ПРОСЯНИКОВ БОРИС ДМИТРИЕВИЧ, ст. преподаватель,  
feinstahl@mail.ru*

*Сибирский государственный университет путей сообщения,  
630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191*

### **БОЛТОВОЕ СОЕДИНЕНИЕ С ВЗАИМНЫМ ПРОДАВЛИВАНИЕМ СОЕДИНЯЕМЫХ ТОНКОСТЕННЫХ ПРОФИЛЕЙ**

Приведены основные известные в настоящее время схемы болтовых соединений с продавливанием. Представлены результаты экспериментальных и численных исследований болтовых соединений с взаимным продавливанием соединяемых тонкостенных профилей с использованием пакетов из шайб, выпускаемых по государственным стандартам. Определены оптимальные составы пакетов шайб для соединения стальных листов толщиной 1,5 и 2,0 мм на болтах М10 и М12. Показано влияние состава пакетов шайб и качества сборки на несущую способность соединений с взаимным продавливанием. Определены направления дальнейших исследований для решения задачи эффективного использования соединений данного типа.

**Ключевые слова:** соединение тонкостенных профилей; соединения, образованные взаимным продавливанием; пакет шайб.

*BORIS D. PROSYANIKOV, Senior Lecturer,  
feinstahl@mail.ru*

*Siberian Transport University,  
191, Koval'chuk Str., 630049, Novosibirsk, Russia*

### **BOLTED JOINT WITH RECIPROCAL PUNCH OF CONNECTED SLENDER SECTIONS**

This paper presents the main bolt connections known today and formed by reciprocal punch. The results of experimental and numerical research are presented for slender section connections by reciprocal punch of connected elements using sets of washers that meet the state standard requirements. The optimum compositions of washer sets are detected for steel sheets 1.5 and 2.0 mm thick using M10 and M12 screw connections. The effect from the set of washers and the quality of connections are shown in this paper. The further research directions are described for the problem of the efficient use of this connection type.

**Keywords:** slender section; connection; reciprocal punch; sets of washers.

Конструкции с применением тонкостенных гнутых оцинкованных профилей (лёгкие стальные тонкостенные конструкции – ЛСТК) в настоящее время получают широкое распространение в строительстве. Такие конструкции обладают малой металлоемкостью, высокой технологичностью, позволяют значительно снизить сроки строительства. Таким образом, применение тонкостенных профилей существенно уменьшает затраты по сравнению с традиционными профилями металлопроката. Тем не менее, использование ЛСТК имеет ограничение в большепролётных конструкциях. Фермы из холодногнутой профилей пролётом более 15 м при шаге более 3 м не находят

широкого применения. Это связано с недостаточной несущей способностью узловых соединений, выполняемых в основном при помощи самонарезающих винтов [1]. В настоящее время в строительстве имеется довольно много способов соединения ЛСТК, среди которых наибольшее применение нашли следующие: при помощи сварки, заклепок и болтов, а также комбинированием вышеуказанных способов. Сравнительный анализ основных видов узловых соединений ЛСТК [2] позволяет сделать вывод, что наибольшей популярностью самонарезающие винты пользуются в силу их низкой стоимости. Недостаточная несущая способность соединений на самонарезающих винтах зачастую связана с невозможностью размещения в узлах нужного количества винтов. Повышение несущей способности узловых соединений ЛСТК возможно за счёт применения фрикционных сдвигоустойчивых соединений и фрикционных соединений с распределительной накладкой [3, 4]. К недостаткам таких соединений можно отнести необходимость предварительной подготовки поверхностей соединяемых элементов.

Одним из перспективных путей повышения несущей способности ЛСТК является применение болтовых соединений тонкостенных профилей с продавливанием. Отличительная черта такого соединения – это изменение плоской формы стенок или полок тонкостенных профилей около болтового отверстия за счёт их продавливания одним элементом крепления в другой (выштамповка). Таким образом предполагается повысить несущую способность за счёт дополнительной передачи усилия в зонегиба, т. е. включением в работу металла соединяемых профилей по периметру продавливания. Такое продавливание осуществляется при помощи элементов крепления, имеющих необходимое для продавливания приёмное углубление. С противоположной стороны элемент крепления имеет утолщение, которое при натяжении болта продавливает тонкий металл внутрь приёмного углубления (рис. 1).

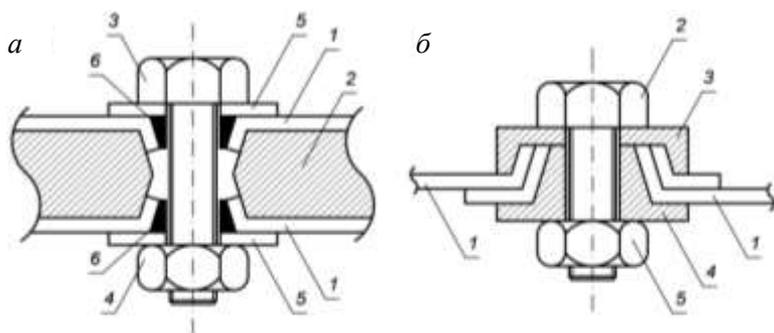


Рис. 1. Схемы болтовых соединений с продавливанием:

а – со встречным продавливанием; б – с взаимным продавливанием

Можно выделить следующие основные схемы продавливания:

1. Элемент крепления устанавливается между соединяемыми тонкостенными профилями. В этом случае он должен иметь приёмные углубления с каждой стороны, т. к. продавливание металла профиля производится с противоположных сторон навстречу друг другу. В качестве такого элемента

крепления может быть использован лист металлопроката с отверстием большого диаметра или с двухсторонней зенковкой отверстия. Толщина листа должна быть достаточной для выполнения приёмных углублений с обеих сторон. Данная схема соединения была предложена сотрудниками Казанской государственной архитектурно-строительной академии (КГАСА, в настоящий момент КГАСУ) для болтового соединения тонкостенных элементов в решётчатых конструкциях, включающих листовые фасонки с нахлестнутыми концами тонкостенных элементов [5]. В состав соединения входят (рис. 1, а): верхние и нижние элементы, нахлестнутые на фасонку 1, фасонка 2, болт 3, гайка 4, шайба 5, кольца с односторонней конусной поверхностью 6.

2. Элемент крепления, имеющий одно приёмное углубление, устанавливается с одной стороны соединяемых тонкостенных профилей. В этом случае металл обоих профилей взаимно продавливается в одном направлении. Такая схема (далее называемая соединением с взаимным продавливанием – СВП) была также предложена сотрудниками КГАСА [6]. В состав соединения входят (рис. 1, б): объединённые внахлест концы соединяемых элементов 1, стяжной болт 2, шайба с коническим углублением 3, шайба с коническим утолщением 4, гайка 5.

Известны другие соединения тонкостенных элементов с продавливанием. Крепёжные элементы могут быть выполнены в виде винтов с увеличивающимся к головке диаметром винтовой нарезки [7]. При установке винта происходит отгибание кромок отверстий соединяемых листов, что приводит к увеличению площади смятия.

Наиболее близким к СВП [6] является соединение, включающее объединённые внахлест соединяемые элементы с установкой стяжного болта и гаек по центру предварительно выполненной выштамповки [8].

По мнению авторов [6], применение схемы СВП позволяет увеличить несущую способность соединения тонкостенных профилей в 1,5–2 раза по сравнению с обычным болтовым соединением. К общим недостаткам как предложенной [6] схемы СВП, так и других вариантов соединений тонкостенных элементов, описанных выше, можно отнести сложность конструкции крепёжных элементов или необходимость предварительного выполнения выштамповки поверхности соединяемых элементов. Также, на настоящий момент, информация о подобного типа соединениях отсутствует в нормативной и технической документации, как отечественной, так и общедоступной зарубежной. Авторами [6] не была предложена методика расчёта СВП, не дано всесторонних рекомендаций по конструированию.

На основе указанных сведений автором настоящей статьи была поставлена цель по поиску эффективного решения соединения с продавливанием и обоснованию методики расчёта и конструирования. Для достижения этой цели была предложена схема СВП с применением стандартных плоских шайб, выпускаемых по государственным стандартам, взамен специальных крепёжных элементов [9]. Плоские шайбы собираются в пакеты с обеих сторон объединённых внахлест тонкостенных элементов соосно отверстию. За счёт различия внутренних и внешних диаметров плоских шайб нормального и увеличенного типа создаются утолщение с одной стороны и приёмное углубление с другой стороны соединения (рис. 2).

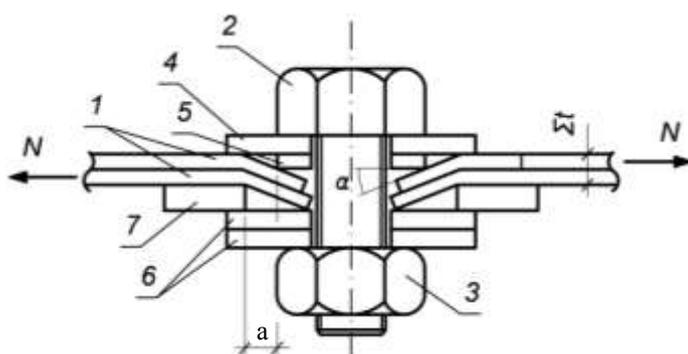


Рис. 2. Болтовое соединение с взаимным продавливанием (СВП) с применением плоских шайб

В состав соединения входят (рис. 2): объединенные внахлест концы соединяемых элементов 1, стяжной болт 2, гайка 3, выравнивающая шайба 4, внутренняя шайба, создающая утолщение 5, силовой пакет шайб 6, наружная шайба, создающая приемное углубление 7. В качестве создающей утолщение внутренней шайбы применяется плоская шайба нормального типа, соответствующая диаметру стяжного болта. В качестве создающей приемное углубление наружной шайбы применяется плоская шайба большого диаметра. Внутренний диаметр наружной шайбы должен быть достаточным для обеспечения зазора между внутренней и наружной шайбами (рис. 2, зазор  $a$ ), который зависит от диаметра применяемого стяжного болта и суммарной толщины соединяемых листов металла (рис. 2,  $\Sigma t$ ). Силовой пакет шайб создает жесткость крепёжного пакета со стороны приемного углубления, тип и количество шайб, входящих в силовой пакет, может варьироваться в зависимости от диаметра наружной шайбы, а также от толщины и жесткостных характеристик соединяемого металла. При натяжении болта происходит выгиб соединяемого тонкого металла внутрь наружной шайбы по внутреннему периметру (рис. 2, угол  $\alpha$ ).

Предложенная схема СВП позволяет увеличить несущую способность болтовых соединений тонкостенных гнутых профилей. Применение плоской шайбы в качестве создающего утолщение элемента крепления также облегчает сборку соединения, т. к., являясь более гибким продавливающим элементом, плоская шайба передает продавливающее усилие не только по кромке, но и, изгибаясь, частично по площади своей поверхности.

В рамках изучения особенностей СВП с применением стандартных плоских шайб авторами настоящего исследования был выделен ряд задач:

1. Определить рациональный состав пакетов шайб.
2. Изучить особенности перехода в предельное состояние одноболтовых СВП.
3. Найти способы и критерии качественной сборки СВП.

Для решения указанных задач были проведены первоначальные экспериментальные исследования [10]. Для экспериментального изучения были собраны образцы одноболтовых соединений из объединенного внахлест стального листового проката толщиной 1,5 и 2 мм. В качестве крепёжных элементов применялись пакеты плоских шайб по ГОСТ 1137–78 (нормального

типа) и ГОСТ 6958–78 (увеличенного типа). Применялись стяжные болты М10 и М12 класса прочности 8.8. Поскольку шайба, создающая утолщение, применялась стандартная (соответственно диаметру стяжного болта), то поиск рационального состава пакетов шайб заключался, главным образом, в подборе создающей приёмное углубление наружной шайбы (рис. 2, зазор а). В соответствии с размерами применяемой наружной шайбы, для каждого соединения подбирался состав силового пакета шайб в зависимости от характеристик соединяемого металла. В качестве наружных применялись шайбы М24 для болтов М10 при толщине соединяемого металла 1,5 мм, М27, М30, М36 для болтов М10 и М12 при толщине соединяемого металла 1,5 и 2 мм. Для экспериментального изучения было собрано 13 вариантов образцов. Шайбы диаметром больше и меньше указанных не рассматривались как несоответствующие по критерию величины зазора «а» [10]. При изготовлении экспериментальных образцов соприкасающиеся поверхности были обработаны твёрдым смазывающим составом. Это позволило исключить влияние сил трения, снижающих точность оценки работы зоны взаимногогиба, которая является основным показателем эффективности соответствующего состава пакетов шайб. Испытания образцов проводились на растяжение (рис. 2, *N*) до полного исчерпания несущей способности соединения. В рамках первоначальных исследований было испытано по три экспериментальных образца для каждого варианта. Для качественного сравнения наравне с соединениями СВП проводились испытания обычных срезных соединений на болтах того же диаметра. За предельное состояние соединений приняты суммарные деформации смятия соединяемых элементов, равные 6 мм (деформации смятия, равные 3 мм, – для каждого из соединяемых элементов), в соответствии с табл. 6 «Рекомендаций по проектированию работающих на сдвиг болтовых соединений стальных строительных конструкций». По результатам экспериментальных исследований строились графики работы соединений (рис. 3). В результате экспериментальных исследований было установлено:

- при применении наружных шайб М24 и М27 в СВП на болтах М10 достигалось увеличение несущей способности в 2–4 раза, в сравнении с обычными срезными соединениями на болтах того же диаметра;
- при применении наружных шайб М30 в СВП на болтах М12 достигалось увеличение несущей способности в 2–3 раза, в сравнении с обычными срезными соединениями на болтах того же диаметра.

В вариантах с наружными шайбами М30 для соединений на болтах М10 и с наружными шайбами М36 наблюдались меньшие значения несущей способности. Это может быть объяснено тем, что при увеличении диаметра наружной шайбы область выштамповки становится более полой (рис. 2, угол  $\alpha$ ), что снижает эффективность передачи усилия в зонегиба соединяемого металла. Характер разрушения экспериментальных образцов выявил несколько зон передачи усилия, в том числе было отмечено сопротивление спрямлению области выштамповки при смещении наружной шайбы. Разрушение образцов происходило по ослабленному сечению в результате смятия тонких кромок отверстий.

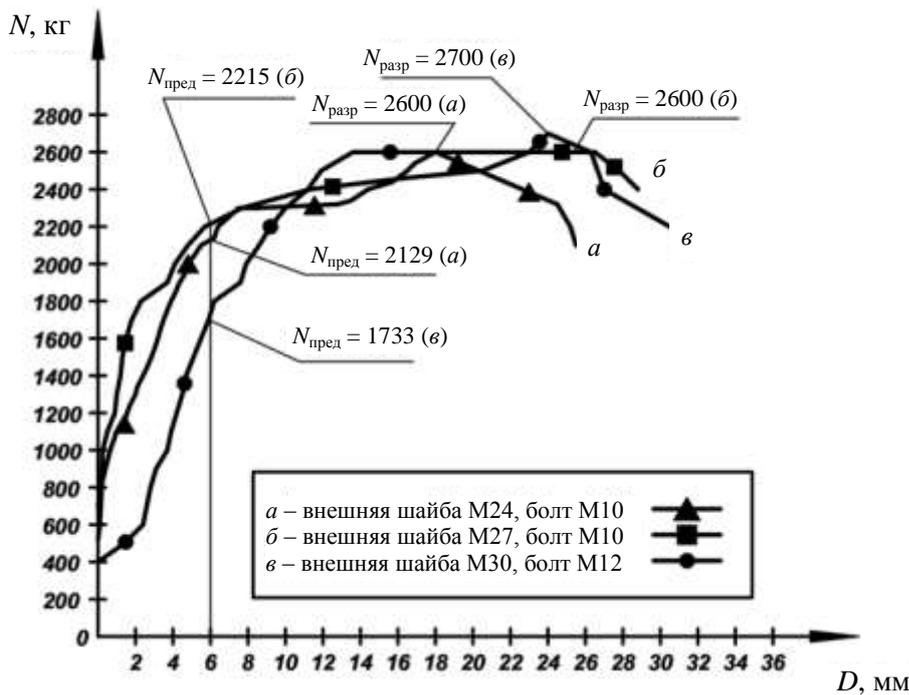


Рис. 3. Диаграмма работы одноболтовых СВП:

$N_{\text{пред}}$  — значение нагрузки, соответствующее наступлению предельного состояния;  $N_{\text{разр}}$  — значение разрушающей нагрузки

Таким образом, было выявлено изначально предполагаемое увеличение несущей способности соединений тонкостенных гнутых профилей при применении болтовых соединений с продавливанием, были определены оптимальные составы пакетов шайб для СВП на болтах M10 и M12 при толщине соединяемого металла 1,5–2 мм.

Уточнение особенностей перехода СВП в предельное состояние проводилось методом численного моделирования, основной целью которого было определение характера включения в работу выявленных зон передачи усилий. Кроме того, методом численного моделирования определялось влияние на работу соединения углагиба соединяемого металла (рис. 2, угол  $\alpha$ ). Был проведён ряд расчётов конечно-элементных моделей соединения в расчётно-программном комплексе ANSYS. Моделирование соединений проводилось с соблюдением параметров элементов соединений экспериментальных образцов, в расчёт вводились фактические характеристики соединяемого металла, полученные экспериментально. Проводилось численное моделирование процесса продавливания соединяемого металла во время сборки соединения, далее моделировалась работа соединения растяжение-усилие. Влияние углагиба соединяемого металла определялось путем уменьшения глубины продавливания без изменения других параметров модели. По результатам численных исследований строились графики работы соединений. По очертанию и значению усилий в экстремумах эти графики близки к графикам, построенным по результатам экспериментальных исследований (расхождение 5–10 %).

Анализируя результаты проведённых численных исследований, можно сделать следующие выводы:

- на построенных по результатам численных исследований графиках работы одноболтовых СВП с применением стандартных плоских шайб можно выделить характерные стадии работы соединения;

- деформированный вид модели соединения показывает, что на первой стадии в работу вступает только соединяемый металл в зонегиба (по внутреннему диаметру наружной шайбы), при этом наблюдается отсутствие существенных деформаций и сдвигов. При дальнейшем увеличении нагрузки наступает стадия совместной работы тонких кромок отверстия на смятие, стержня болта на срез и работы металла в зонегиба;

- при уменьшении глубины продавливания значение максимального усилия, воспринимаемого соединением на первой стадии работы, снижается (при значении углагиба соединяемого металла менее 100 первая стадия работы отсутствует).

Совместный анализ проведённых экспериментальных и численных исследований позволяет сделать следующие выводы:

- работа одноболтовых СВП с применением стандартных плоских шайб может быть описана характерными по зонам передачи усилия стадиями, на продолжительность которых существенное влияние оказывает значение углагиба соединяемого металла;

- значение углагиба соединяемого металла, при прочих неизменных параметрах, определяется преимущественно качеством сборки соединения, а именно равномерным по периметру наружной шайбы продавливанием на фиксированную глубину;

- применение наружных шайб большого диаметра оказывает существенное влияние на повышение несущей способности СВП, происходящее за счёт увеличения периметра включаемого в работу продавливаемого металла. В то же время увеличение при этом радиуса окружности продавливания уменьшает значение углагиба соединяемого металла, что понижает несущую способность.

Для выполнения качественной сборки СВП с применением стандартных плоских шайб необходимо обеспечить соосность установки болта, наружной шайбы и шайб силового пакета. Этим определяется равномерное по периметру продавливание соединяемого металла внутрь наружной шайбы. В противном случае возможен перекокс стержня болта и, как следствие, неполное по периметру продавливание металла. Для обеспечения соосности установки указанных деталей соединения автором настоящей статьи были разработаны варианты насадок для монтажного инструмента, в том числе вариант составной насадки, позволяющей соосно устанавливать различные плоские шайбы в различных комбинациях в количестве до 3 шайб каждого типа. В настоящее время ведутся работы по усовершенствованию конструкции насадок.

На основании проведённых экспериментальных и численных исследований можно сделать вывод о том, что для решения задачи эффективного использования СВП необходимо определить параметры элементов крепления, обеспечивающие значения периметра выштамповки и углагиба соединяемого металла, оптимальные для обеспечения качественной сборки и высокой несущей

способности соединения. В варианте СВП с применением стандартных плоских шайб параметры элементов крепления ограничиваются типоразмерами шайб, следовательно, решение описанной выше задачи сводится к выбору болта и определению рационального состава пакетов шайб для соединяемого металла с заданными характеристиками. Для решения поставленных задач автором настоящей статьи проводятся дальнейшие численные и экспериментальные исследования болтовых соединений тонкостенных профилей с продавливанием.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Семёнов, А.С. Ферма из холодногнутых профилей повышенной жёсткости с болтовыми соединениями : дис. ... канд. техн. наук. – Воронеж, 2009. – С. 3–4.
2. Наземеева, Т.В. Виды узловых соединений в лёгких стальных тонкостенных конструкциях / Т.В. Наземеева, В.Г. Куражова // Инженерно-строительный журнал. – 2011. – № 3. – С. 47–52.
3. Коротких, А.В. Особенности работы одноболтовых фрикционных сдвигоустойчивых соединений тонкостенных оцинкованных профилей / А.В. Коротких, А.Н. Кретинин, И.И. Крылов // Изв. вузов. Строительство. – 2009. – № 10. – С. 117–122.
4. Коротких, А.В. Особенности работы двух- и трёхболтовых фрикционных сдвигоустойчивых соединений тонкостенных оцинкованных профилей / А.В. Коротких, И.И. Крылов, В.Г. Черкасов // Изв. вузов. Строительство. – 2011. – № 2. – С. 3–14.
5. Пат. 2329359 Российская Федерация, МПК Е 04 В 1/38 F 16 В 5/02. Болтовое соединение тонкостенных элементов / Кузнецов И.Л., Вишневский В.А., Тухватуллин А.А. ; заявитель и патентообладатель Казанский гос. архит.-строит. ун-т. – № 2007103672/03 ; заявл. 22.01.07, Бюл. № 20. – 5 с.
6. Пат. 2264507 Российская Федерация, МПК Е 04 В 1/58. Соединение тонкостенных элементов / Кузнецов И.Л., Шмелев Г.Н., Пальмов Г.А., Вахтель Р.Р., Вишневский В.А. ; заявитель и патентообладатель Казанский гос. архит.-строит. ун-т. – № 2004111579/03 ; заявл. 09.04.04, Бюл. № 32. – 5 с.
7. Пат. 2113666 Франция, М. кл. Е 04 В 1/00. Вауд К., Грука М. ; заявлено 08.11.1971. – 13 с. [Brevet d'invention No. 2.113.666. Int. CL. E 04 B 1/00. Cornelius V. Waud, Med J. Grusa. Dépôt 8. 11. 1971; – 13 p.].
8. А.с. 11694088 СССР, М. Кл. Е 04 В 1/58. Соединение строительных элементов / Трикс Г. (Австрия). – 2474803/29-33 ; заявлено 20.04.76 ; опубл. 25.10.79, Бюл. 39. – С. 2.
9. Пат. 11135338 Российская Федерация, МПК Е 04 В 1/38. Соединение стальных тонкостенных элементов / Просяников Б.Д., Коротких А.В., Крылов И.И. ; заявитель и патентообладатель Новосибирский гос. архит.-строит. ун-т. – № 2013106562/03 ; заявл. 14.02.13, Бюл. № 34. – 5 с.
10. Коротких, А.В. Особенности работы болтовых соединений с взаимным продавливанием соединяемых тонкостенных оцинкованных профилей / А.В. Коротких, Б.Д. Просяников, И.И. Крылов // Изв. вузов. Строительство. – 2014. – № 3. – С. 93–102.

## REFERENCES

1. Semenov A.S. Ferma iz kholodnognutnykh profilei povyshennoi zhestkosti s boltovymi soedineniyami : dis. ... kand. tekhn. nauk [Slender section frame with bolted connections. PhD Thesis]. Voronezh, 2009. Pp. 3–4. (rus)
2. Nazemeeva T.V., Kurazhova V.G. Vidy uzlovykh soedineniy v legkikh stal'nykh tonkostennykh konstruktsiyakh [Types of slender section connections]. *Magazine of Civil Engineering*. 2011. No. 3. Pp. 47–52. (rus)
3. Korotkikh A.V., Kretinin A.N., Krylov I.I. Osobennosti raboty odnobltovykh friktsionnykh sdvigoustoychivykh soedineniy tonkostennykh otsinkovannykh profiley [Behavior of one-bolt

- frictional shift-resisted connections of slender sections]. *News of Higher Educational Institutions*. 2009. No. 10. Pp. 117–122. (rus)
4. Korotkikh A.V., Krylov I.I., Cherkasov V.G. Osobennosti raboty dvukh- i trekhboltovykh friktsionnykh sdvigoustoychivyykh soedineniy tonkostennykh otsinkovannykh profiley [Behavior of two- and three-bolt frictional shift-resisted connections of slender sections]. *News of Higher Educational Institutions*. 2012. No. 2. Pp. 3–14. (rus)
  5. Kuznetsov I.L., Vishnevskiy V.A., Tukhvatullin A.A. Boltovoe soedinenie tonkostennykh elementov [Bolted joint of thin-walled elements]. Pat. Rus. Fed. N 2329359. IPS 51 E 04 B 1/38 F 16 B 5/02. Publ. 20.07.2008. Bul. No. 20. 5 p. (rus)
  6. Kuznetsov I.L., Shmelev G.N., Pal'mov G.A., Vakhtel' R.R., Vishnevskiy V.A. Soedinenie tonkostennykh elementov [Connection method for slender sections]. Pat. Rus. Fed. N 2264507. IPS 51 E 04 B 1/58. Publ. 20.11.2005. Bul. No. 32. 5 p. (rus)
  7. Waud C. B., Gruca M. J. Brevet d'invention. No. 2.113.666. Int. CL. E 04 B 1/00. Dépôt 8. 11. 1971. 13 p.
  8. Triksl G. Author's Certificate N 11694088.USSR, IPC E 04 B 1/58. Soedinenie stroitel'nykh elementov [Connection of constructional elements]. 1979. P. 2. (rus)
  9. Prosyanikov B.D., Korotkikh A.V., Krylov I.I. Soedinenie stal'nykh tonkostennykh elementov [Connections of steel slender sections]. Pat. Rus. Fed. N 2264507. IPS 51 E 04 B 1/58. Publ. 20.11.2005. Bul. No. 32. 5 p. (rus)
  10. Korotkikh A.V., Prosyanikov B.D., Krylov I.I. Osobennosti raboty boltovykh soedineniy s vzaimnym prodavlivaniem soedinyaemykh tonkostennykh otsinkovannykh profiley [Behavior of elements with reciprocal punch of slender sections]. *News of Higher Educational Institutions*. 2014. No. 3. Pp. 93–102. (rus)