

Экспериментальные исследования дюбельных соединений
элементов стальных конструкций

Александр Романович Туснин

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет
(НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Соединения элементов стальных конструкций выполняются с использованием заклепок, болтов и сварки. Для крепления тонколистовых стальных оболочек мембран, особенно оцинкованных, в качестве элемента соединения могут применяться высокопрочные дюбели, устанавливаемые при помощи пороховых зарядов или запрессовывания в предварительно сделанные отверстия в соединяемых элементах.

Материалы и методы. Экспериментальные исследования проведены с использованием образцов трех типов. Образцы состояли из стальных оцинкованных листов толщиной 0,5 и 0,7 мм, которые крепились к стальной пластине толщиной 3 мм при помощи высокопрочных дюбелей 3 мм. Рассмотрена возможность использования этих дюбелей при толщине стальных пластин 6 и 10 мм, в том числе в предварительно просверленные отверстия диаметром 2 мм.

Результаты. Дюбели диаметром 3 мм пробивали стальную пластину толщиной 3 мм и прочно крепили оцинкованный лист толщиной 0,5 и 0,7 мм. Установлен характер разрушения образцов в зависимости от числа и расположения дюбелей. При двух дюбелях наблюдалось разрушение стального оцинкованного листа в районе дюбелей. При четырех дюбелях оцинковка разрушалась вне дюбельного соединения в виде разрыва стального листа. Определено, что в пластины толщиной 6 и 10 мм дюбели диаметром 3 мм на всю длину не входят. При устройстве в этих пластинах отверстий диаметром 2; 2,5 и 3 мм дюбели удается установить на всю длину.

Выводы. Экспериментальные исследования дюбельных соединений тонколистовой оцинкованной стали показали, что даже бытовые дюбели обладают высокой прочностью и стабильностью параметров и могут использоваться для соединения несущих элементов стальных конструкций.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: стальные конструкции, пороховой дюбель, прочность соединения, оцинкованный лист, испытания конструкций

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Туснин А.Р. Экспериментальные исследования дюбельных соединений элементов стальных конструкций // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 10. С. 1522–1533. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.10.1522-1533

Автор, ответственный за переписку: Александр Романович Туснин, tusninar@mgsu.ru.

Experimental studies of dowel connections
of steel structural elements

Aleksandr R. Tusnin

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Connections of steel construction elements are made using rivets, bolts and welding. To fasten thin sheet steel membrane sheathing, especially galvanized, high-strength dowels can be used as a connection element, installed by means of gunpowder charges or pressing into pre-made holes in the elements to be connected.

Materials and methods. Experimental studies were carried out using three types of specimens. The specimens consisted of 0.5 and 0.7 mm thick galvanized steel sheets, which were fixed to a 3 mm thick steel plate using 3 mm high-strength dowels. The possibility of using these dowels with 6 and 10 mm thick steel plates was considered, including into pre-drilled holes with a diameter of 2 mm.

Results. Dowels with a diameter of 3 mm pierced a steel plate with a thickness of 3 mm and firmly fixed a galvanized sheet with a thickness of 0.5 and 0.7 mm. The failure pattern of the specimens depending on the number and location of the dowels was determined. With two dowels, the steel galvanized sheet was observed to fail in the area of the dowels. At four dowels the galvanized steel sheet was destroyed outside the dowel joint in the form of steel plate rupture. It was found that the full length of 3 mm diameter dowels did not fit into the 6 and 10 mm thick plates. When holes with diameters of 2, 2.5 and 3 mm are made in these plates, the full length of the dowels can be installed.

Conclusions. Experimental studies of dowel joints of thin-sheet galvanized steel have shown that even household dowels have high strength and stability of parameters and can be used to connect load-bearing elements of steel structures.

KEYWORDS: steel structures, powder dowel, joint strength, galvanized sheet, structural testing

FOR CITATION: Tusnin A.R. Experimental studies of dowel connections of steel structural elements. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(10):1522-1533. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.10.1522-1533 (rus.).

Corresponding author: Aleksandr R. Tusnin, tusninar@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Заводские или монтажные соединения современных стальных конструкций чаще всего осуществляются с использованием сварки или болтов [1–3]. Ранее достаточно успешно, в том числе для самых ответственных конструкций, применялись заклепочные соединения [4]. Заклепочные соединения успешно используются в авиастроении [5]. Крепление облицовок и отделочных слоев может выполняться с помощью вытяжных заклепок [6]. Проведены исследования по применению вытяжных заклепок в несущих конструкциях [7, 8]. В композитных (стале-железобетонных) конструкциях для объединения стальной балки с бетонной плитой используют анкерные упоры, выполняемые часто в виде цилиндрических стад-болтов, приваренных к верхней полке балки. Стад-болты в этом случае работают как дюбели, взаимодействующие с бетоном за счет трения [9]. Крепление различных облицовок к несущим конструкциям может проводиться с использованием дюбелей, фиксируемых в несущей конструкции путем сил трения [10, 11]. Дюбели находят применения для соединения элементов стальных конструкций, в том числе для крепления тонких металлических листов к прокатным или сварным профилям. Дюбели могут устанавливаться в предварительно произведенные в соединяемых деталях отверстия [12]. В дюбельных соединениях высокопрочный стальной дюбель под действием пороховых газов пробивает тонкий стальной лист, входит в более толстый профиль и обеспечивает прочность соединения. Дюбельные соединения обычно используются для дискретного крепления обшивки к несущим конструкциям. В тонколистовой обшивке усилия невелики, поэтому проблем с обеспечением прочности дюбельного соединения в таких конструкциях не возникает.

В покрытиях зданий и сооружений применяются мембранные конструкции, в которых пролетную часть выполняют из тонкой стальной оболочки (мембраны) толщиной 0,5–6 мм и крепят к прокатному или сварному стальному опорному контуру [13–16]. Мембрану доставляют на строительную площадку в виде рулонов. Заводские соединения в рулонах осуществляются при помощи автоматической сварки, качество и прочность таких швов гарантированы. Несмотря на большую протяженность заводских сварных соединений, использование автоматизированной сварки обеспечивает высокую производительность при изготовлении рулонов на заводе. При монтаже конструкций необходимо выполнять крепление мембраны к опорному контуру и рулонов мембраны друг к другу. Для сварки протяженных сварных соединений при использовании тонких стальных листов требуется применение автоматической или полуавтоматической сварки в среде защитных газов [17]. Развитие технологии сварки привело к использованию лазеров, что обеспечивает вы-

полнение качественных сварных соединений [18, 19]. Длина монтажных соединений по контуру равна его периметру, а в пролете — числу монтажных стыков на пролет конструкции. Необходимость создания протяженных монтажных швов тонких стальных листов друг с другом и с опорным контуром затрудняет процесс сборки конструкции на строительной площадке. При этом надо обеспечить равнопрочность сварного соединения и мембраны. Использование вместо сварки протяженных болтовых соединений значительно увеличивает трудоемкость соединения.

Мембрана может выполняться из оцинкованных стальных листов толщиной 0,5–0,9 мм [20]. При монтажной сварке в этом случае возникают дополнительные сложности, обусловленные трудностями формирования сварного соединения тонких оцинкованных листов. Для крепления оцинкованных листов к опорному контуру и присоединения листов друг к другу могут использоваться дюбельные соединения. В отличие от облицовки напряжения в мембране могут достигать предела текучести, что ведет к действию на дюбельное соединение больших усилий. Требуется при проектировании такого соединения установить количество дюбелей, обеспечивающих прочность соединения до достижения предела текучести в стальном листе.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В НИУ МГСУ проведены экспериментальные исследования прочности дюбельных соединений оцинкованной стали толщиной 0,5 и 0,7 мм. Испытано шесть образцов трех типов. Листы оцинкованной стали крепились при помощи дюбелей к стальным листам толщиной 3 мм. Оцинкованные листы и листы толщиной 3 мм имели ширину 51 мм. Для соединения использовались дюбели диаметром 3 мм китайского производства, установка дюбеля осуществлялась монтажным пистолетом TUOSEN (рис. 1).

В образцах первого типа соединение выполнено при помощи двух дюбелей, расположенных вдоль оси оцинкованного листа. Дюбели в этих образцах установлены с шагом 25 мм, первый дюбель



Рис. 1. Дюбель (a) и пистолет для забивки дюбелей (b)

Fig. 1. Dowel (a) and dowel hammer gun (b)

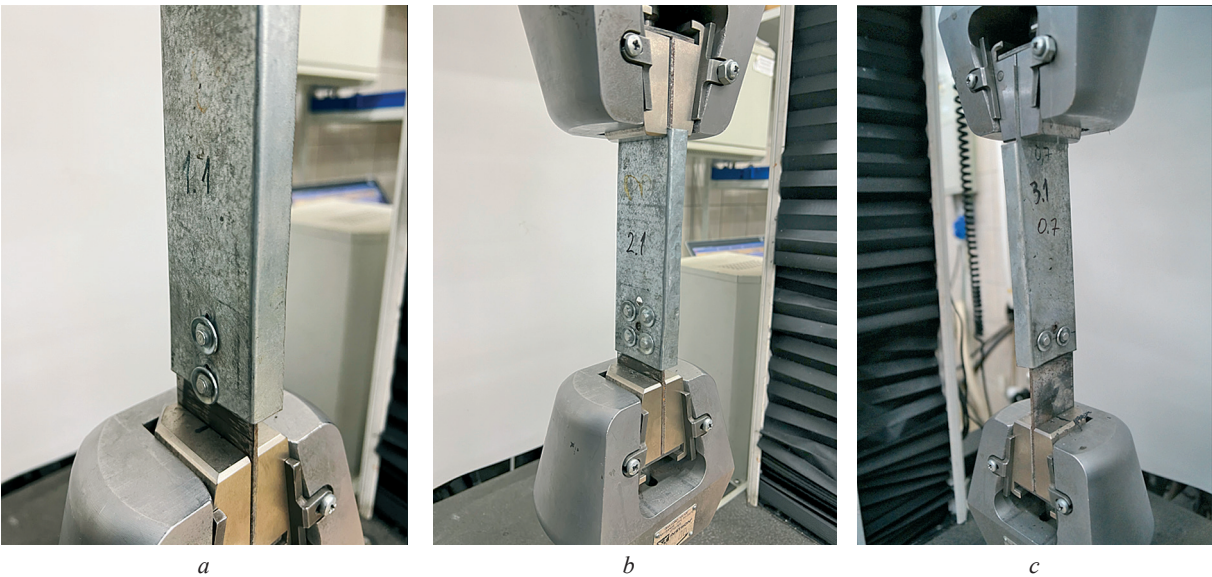


Рис. 2. Образцы первого типа (а); второго типа (b) и третьего типа (с), установленные в зажимы для испытания на растяжение

Fig. 2. Specimens of the first type (a); the second type (b) and the third type (c) installed in clamps for tensile testing

установлен на расстоянии 10 мм от края оцинкованного листа. Во втором типе соединения использовано четыре дюбеля, установленных с шагом по длине и ширине соединения 20 мм, расстояние от края листа до первого ряда дюбелей 12 мм. В третьем типе соединения использовано два дюбеля, расположенных в ряд перпендикулярно продольной оси образца на расстоянии 15 мм от края оцинкованного листа с шагом 20 мм. На рис. 2 представлены образцы первого, второго и третьего типов.

Кроме числа дюбелей варьировалась и толщина оцинкованной стали. В табл. 1 представлены основные параметры испытанных образцов.

Дюбельное соединение выполнялось в следующей последовательности. Соприкасающиеся поверхности металлических деталей очищались от пыли, грязи и ржавчины. Стальной лист толщиной 3 мм укладывался на деревянный брус толщиной 30 мм, что позволило при установке дюбелей исключить неплотное прилегание деталей друг к другу. Деталь из оцинкованной стали с разметкой мест для установки дюбелей накладывалась на стальной лист и временно фиксировалась. Затем к ней подводился и позиционировался в место установки дюбель, установленный в монтажный пистолет. После выверки положения дюбеля осуществлялся нажим на ручку пистолета, что вело к воспламенению порохового заряда, дюбель пробивал соединяемые детали и прочно фиксировал их друг относительно друга. Принятая технология изготовления образцов позволила получить соединение без зазоров между оцинковкой и стальной пластиной, дюбели пробили соединяемые детали на всю толщину, плотно прижали оцинкованный лист к стальной пластине. Необходимо отметить, что в пластине толщиной 3 мм дюбели фиксировались без люфтов.

Кроме крепления оцинкованной стали к стальным пластинам толщиной 3 мм изучена возможность использования дюбельного соединения с более толстыми стальными листами. Для этого была проведена пристрелка дюбелей к стальным листам из стали С345 толщиной 6 и 10 мм. Пристрелка осуществлена непосредственно к листам указанной толщины без прикрепляемой оцинкованной стали.

Для облегчения дюбельного соединения с листами толщиной 6 и 10 мм рассмотрена возможность установки дюбелей в отверстия, предварительно выполненные в стальных листах. С учетом диаметра дюбеля (3 мм) отверстия в стальных ли-

Табл. 1. Параметры испытанных образцов

Table 1. Parameters of the tested specimens

Тип образца Parameters of the tested specimens	Марка образца Specimen brand	Толщина оцинкованной стали, мм Thickness of galvanized steel, mm	Толщина стальной пластины, мм Thickness of the steel plate, mm	Число дюбелей Number of dowels
1-й тип Type 1	1,1	0,7	3	2
	1,2	0,5	3	2
	1,3	0,5	3	2
2-й тип Type 2	2,1	0,5	3	4
	2,2	0,7	3	4
	2,3	0,5	3	4
3-й тип Type 3	3,1	0,7	3	2
	3,2	0,5	3	2
	3,3	0,7	3	2
	3,4	0,5	3	2

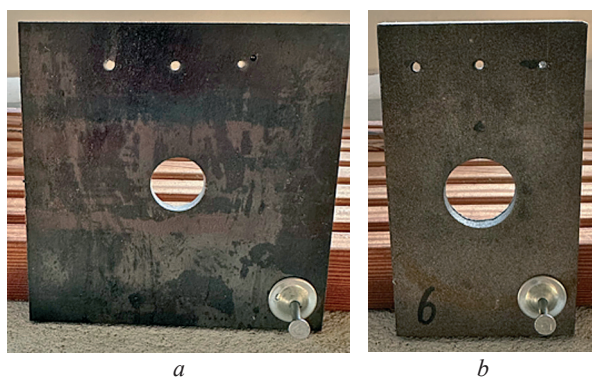


Рис. 3. Пластины с отверстиями слева направо диаметром 3; 2,5 и 2 мм при толщине 6 мм (а) и 10 мм (b)

Fig. 3. Plates with holes from left to right with diameters of 3, 2.5 and 2 mm with a thickness of 6 mm (a) and 10 mm (b)

стах осуществлялись диаметром 2; 2,5 и 3 мм. После выполнения отверстий в них производилась установка дюбелей. На рис. 3 показаны стальные пластины с отверстиями.

С целью определения несущей способности дюбельного соединения, обусловленной прочностью дюбеля на срез, изготовлен образец, в котором пластина толщиной 3 мм крепилась одним дюбелем к пластине толщиной 6 мм. Дюбель устанавливался с предварительным формированием в соединяемых деталях отверстий. В пластине толщиной 3 мм диаметр отверстия был 3 мм, в пластине толщиной 6 мм диаметр отверстия — 2,5 мм. Наличие отверстий обеспечило проникновение дюбеля в соединение на всю глубину и надежную фиксацию дюбеля в пластине толщиной 6 мм. На рис. 4 представлен образец однодюбельного соединения пластин 3 и 6 мм.

Испытания проводились в Центре коллективного пользования НИУ МГСУ с участием специа-

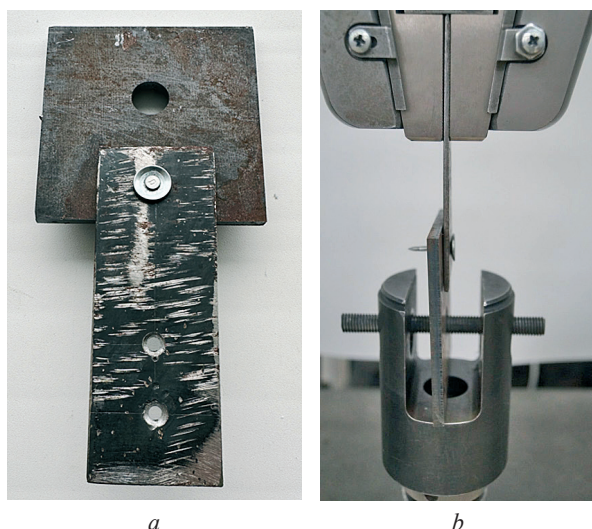


Рис. 4. Однодюбельное соединение пластин толщиной 3 и 6 мм: общий вид (а); образец в зажимах испытательной машины (b)

Fig. 4. Single-tube connection of plates 3 and 6 mm thick: general view (a); the specimen in the clamps of the testing machine (b)

листов Научно-исследовательского института экспериментальной механики. При испытаниях образцы устанавливались в зажимы для испытания на растяжение. При растяжении дюбельное соединение работало на сдвиг. Испытание образцов из оцинкованной стали позволило получить экспериментальные данные о возможности передачи на стальной профиль усилий, сопоставимых с прочностью оцинкованной стали. Испытание однодюбельного соединения пластин толщиной 3 и 6 мм дало возможность определить предельную нагрузку, передаваемую дюбелем в соединении при работе на срез. Испытания проводились на разрывной машине Instron 3382.

В процессе испытаний нагрузка изменялась от нуля до максимального значения. При нагружении фиксировались перемещения зажимов и соответствующий уровень нагрузки. Нагружение велось до разрушения образца.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В результате проведенных испытаний установлен характер разрушения образцов и предельные нагрузки, воспринимаемые при этом.

Все образцы первого типа потеряли несущую способность из-за разрушения оцинкованного листа как при толщине 0,5 мм, так и при 0,7 мм. Расположение дюбелей по одной линии вдоль действующего усилия привело к последовательному вырыву полосы материала из тонкого листа шириной примерно 3 мм. После того как отдельные области поврежденного металла объединялись, наступало полное исчерпание прочности соединения. На рис. 5 показаны характерные повреждения для образцов первого типа.

После разрушения у всех образцов 1-го типа зафиксировано наличие под шайбами дюбелей фрагментов оцинковки. Все дюбели сохранили свое положение и остались прочно закрепленными в листах толщиной 3 мм. Испытания образцов 1-го типа позволили установить зависимость прочности соединения от толщины оцинкованных листов. На рис. 6 представлены зависимости «перемещение — нагрузка» для испытанных образцов 1-го типа.

Максимальная прочность соединения была зафиксирована для образца 1.1 с толщиной оцинковки 0,7 мм. Эта нагрузка составила 8,57 кН при перемещении 3,19 мм. Два других образца разрушились при нагрузке, существенно меньшей: образец 1.2 при нагрузке 5,57 кН и перемещении 2,5 мм, образец 1.3 при нагрузке 6,63 кН и перемещении 3,87 мм. Для образцов 1.1. и 1.2 после достижения предельной нагрузки и образования областей повреждения металла наблюдалось непрерывное снижение нагрузки, воспринимаемой образцом, сопровождаемое перемещениями 5,08 мм (образец 1.1) и 5,84 мм (образец 1.2). У образца 1.3 после достижения максимальной нагрузки происходило снижение нагрузки, воспринимаемой образцом до 6,37 кН, а затем она



Рис. 5. Характерные повреждения оцинкованного листа в образцах 1-го типа

Fig. 5. Characteristic damages of galvanized sheet in specimens of type 1

начала снова расти из-за образования зон скомканного, но не разрушенного металла оцинковки. Смятие металла сопровождалось ростом нагрузки до 7,9 кН и перемещениями 6,74 мм, после чего при перемещениях происходило полное разрушение образца.

Дюбельное соединение во всех образцах второго типа сохранило свою несущую способность до достижения максимальной нагрузки. Все образ-

цы данного типа разрушились в результате разрыва оцинкованной стали перед или непосредственно в зажимах. На рис. 7 показаны характерные повреждения образца 2-го типа.

После разрыва оцинковки не было зафиксировано сдвигов оцинкованной стали в дюбельном соединении. Это свидетельствовало о более высокой прочности дюбельного соединения при использовании 4 дюбелей по сравнению с прочностью оцинкованной стали. На рис. 8 приведены зависимости «перемещение – нагрузка» для испытанных образцов 2-го типа.

Образцы 2.1 и 2.3, выполненные с применением оцинковки толщиной 0,5 мм, имели почти одинаковую несущую способность, равную примерно 10 кН при перемещениях в районе 3,5 мм. Образец 2.2 показал более высокую несущую способность 12,67 кН. Графики «перемещение – нагрузка» имеют характерную форму. На первом этапе перемещения нарастают, затем наблюдается участок с небольшим изменением нагрузки и значительными перемещениями, после достижения максимальной нагрузки происходил разрыв оцинкованной стали и полное исчерпание несущей способности.

Образцы третьего типа при толщине оцинкованного листа 0,5 и 0,7 мм потеряли несущую способность из-за разрушения оцинкованного листа в зоне контакта с дюбелями. Разрушение соединения произошло из-за вырыва полосы материала из тонкого оцинкованного листа. Ширина повреждения оцинковки, как и в первом случае, составила около 3 мм. После того как отдельные области поврежденного листа доходили до его края, наступало полное исчерпание прочности соединения. На рис. 9 представлены характерные повреждения для образцов третьего типа.

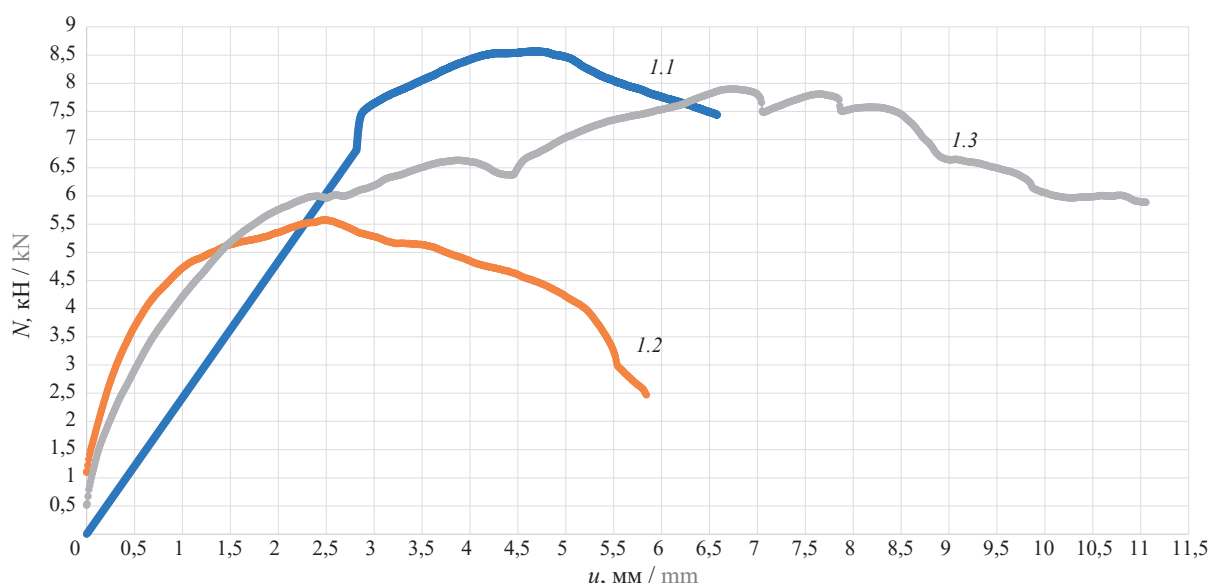


Рис. 6. Графики «перемещение – нагрузка» для образцов 1-го типа

Fig. 6. Displacement – load graphs for type 1 specimens



Рис. 7. Характерные повреждения оцинкованного листа в образцах 2-го типа

Fig. 7. Characteristic damages of galvanized sheet in specimens of type 2

Характер разрушения оцинкованных листов в образцах третьего типа похож на ранее выявленный характер разрушения образцов первого типа. На рис. 10 показаны зависимости «перемещение – нагрузка» для испытанных образцов 3-го типа.

Как и ожидалось, большей прочностью обладали образцы, выполненные из оцинкованной стали толщиной 0,7 мм. Прочность соединения для образцов из оцинкованной стали толщиной 0,7 мм составила от 8,76 до 8,9 кН. При толщине 0,5 мм отмечалась прочность от 6,52 до 7,46 кН. При толщине оцинковки 0,7 мм до перемещений 1,5 мм, а при толщине 0,5 мм до перемещений 1 мм образцы работали без видимых повреждений соединения. После этого в соединении развивались повреждения и наблюдался более быстрый рост перемещений по сравнению с ростом нагрузки. Полное исчерпание прочности наблюдалось в образцах толщиной

0,7 мм при перемещениях 5,85–6,48 мм, а в образцах толщиной 0,5 мм при перемещениях 4,04–4,51 мм.

В табл. 2 представлены результаты испытаний образцов дюбельных соединений.

Для всех испытанных образцов выявлена ожидаемая зависимость величины несущей способности от толщины оцинкованного металла. Именно разрушение оцинковки определяло несущую способность образцов. В образцах первого и третьего типов оцинковка разрушалась непосредственно в зоне соединения, в образцах второго типа прочность дюбельного соединения превосходила прочность оцинкованной стали. При этом увеличение толщины оцинкованной стали более существенно сказалось на прочности образцов первого и второго типов, чем на прочности образцов второго типа. Это обусловлено меньшей прочностью стали, из которой изготовлена оцинковка толщиной 0,7 мм. При двух дюбелях несущая способность не зависела от того, как расположены дюбели — по линии вдоль действия силы или по линии перпендикулярной ей.

Отдельных испытаний на прочность листов оцинкованной стали и стальных пластин толщиной 3 мм не проводилось. О прочностных свойствах оцинкованной стали можно судить по результатам испытаний образцов второго типа, которые разрушились по металлу оцинковки. Установлено отсутствие стадии самоупрочнения при растяжении оцинкованной стали и малое отличие предела текучести от временного сопротивления. Анализ графиков «перемещение – нагрузка» показал, что предел текучести составляет примерно 0,8–0,9 от временного сопротивления, что характерно для сталей повышенной прочности. Испытания стальных пластин

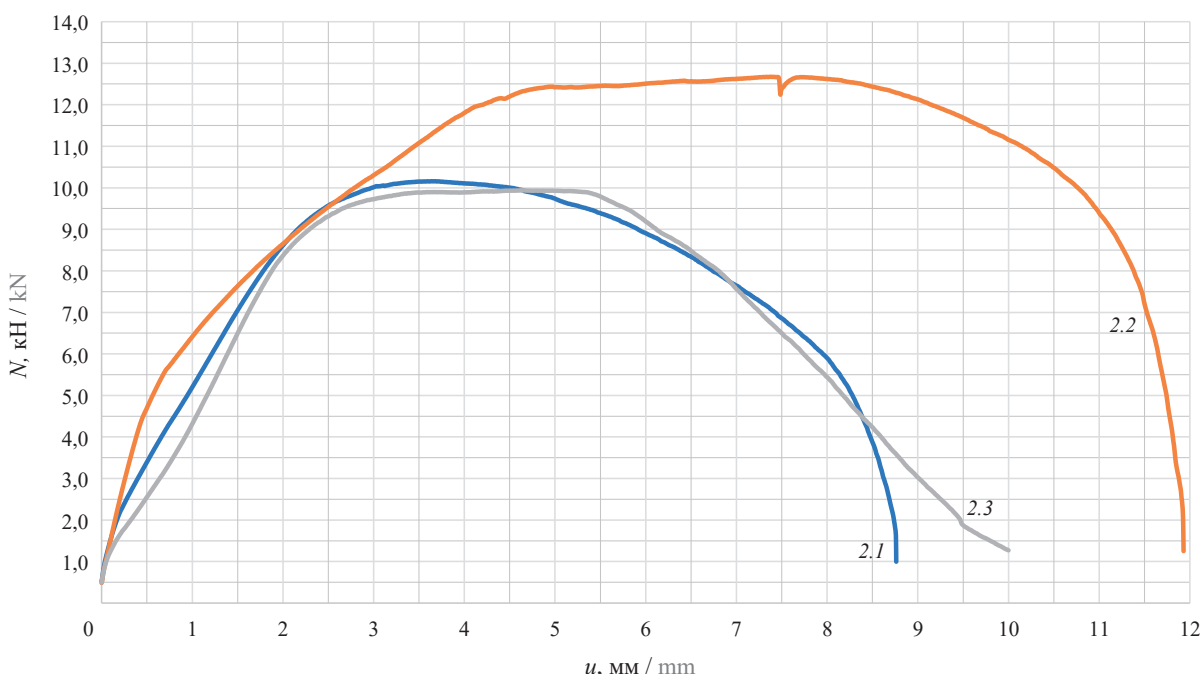


Рис. 8. Графики «перемещение – нагрузка» для образцов 2-го типа

Fig. 8. Displacement – load graphs for type 2 specimens



Рис. 9. Характерные повреждения оцинкованного листа в образцах 3-го типа

Fig. 9. Characteristic damages of galvanized sheet in specimens of type 3

толщиной 3 мм не понадобилось в связи с избыточной прочностью этих элементов по сравнению с прочностью дюбельного соединения или листов оцинкованной стали.

Рассмотрена возможность использования дюбельного соединения для крепления тонких стальных листов к стальным прокатным или сварным профилям, выполненным из более толстых листов. Выявлено, что используемые дюбели не смогли пробить листы из стали С345 толщиной 6 и 10 мм. На рис. 11 показаны стальные пластины с внедренными в них дюбелями, которые не пробili пластины толщиной 6 и 10 мм.

Дюбели, использованные в испытанных соединениях, стальные листы толщиной 6 и 10 мм из стали С345 пробить на всю толщину не смогли. В листы толщиной 6 и 10 мм дюбели входили на одинаковую глубину 5,8 мм. Недостаточная пробивная способность выбранных дюбелей не позволяет использовать их для крепления тонколистовой стали к профилям, применяемым в строительстве.

Изучена возможность установки дюбелей в предварительно просверленные в пластинах толщиной 6 и 10 мм отверстия диаметром 2; 2,5 и 3 мм, предварительно выполненные в стальных листах. После устройства отверстий дюбель позиционировался в отверстие и производилась установка дюбеля.

При установке дюбеля в отверстие диаметром 3 мм из-за большой скорости дюбеля, вылетающего из монтажного пистолета под действием пороховых газов, наблюдается отрыв головки дюбеля от его ствола после контакта головки с пластиной толщиной 6 и 10 мм. Это происходит из-за отсутствия со-

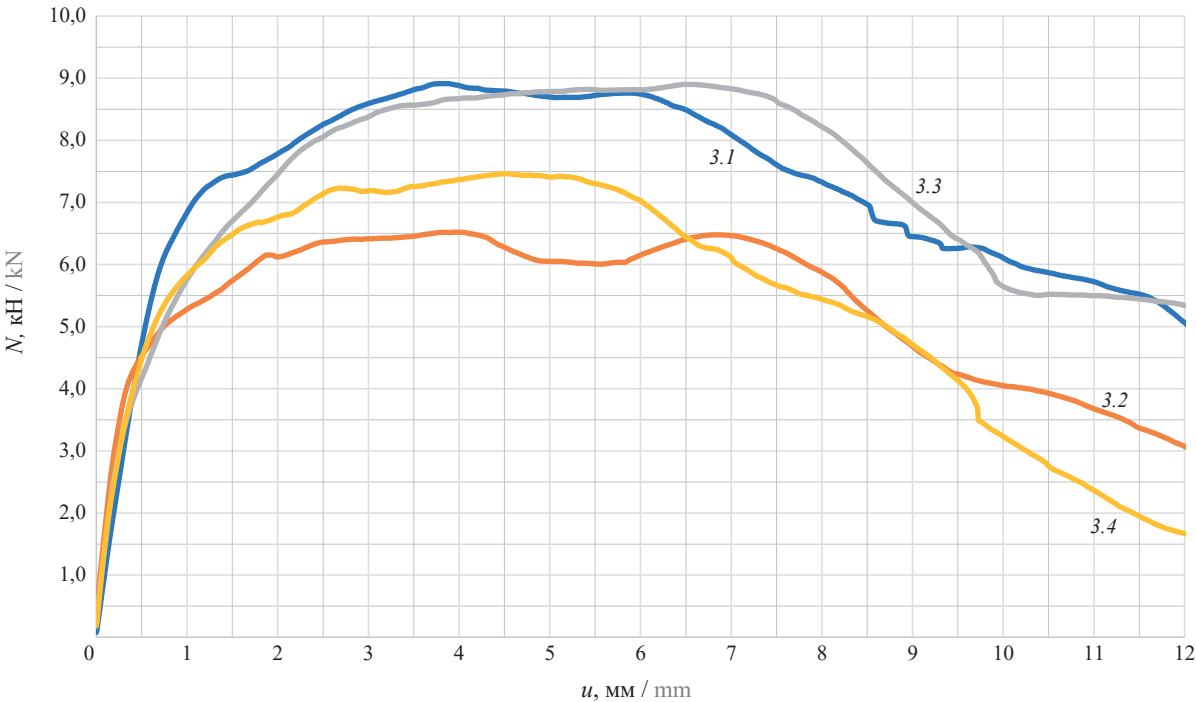


Рис. 10. Графики «перемещение – нагрузка» для образцов 3-го типа

Fig. 10. Displacement – load graphs for 3 types of specimens

Табл. 2. Параметры испытанных образцов

Table 2. Parameters of the tested specimens

Марка образца Specimen brand	Толщина оцинкованной стали, мм Thickness of galvanized steel, mm	Перемещения при максимальной нагрузке, мм Displacement at maximum load, mm	Предельная нагрузка, кН Maximum load, kN	Предельные нормальные напряжения, МПа Maximum normal Stress, MPa
1.1	0,7	3,19	8,57	245
1.2	0,5	2,50	5,57	223
1.3	0,5	3,87	6,63	265
2.1	0,5	3,63	10,16	406
2.2	0,7	7,38	12,67	362
2.3	0,5	4,63	9,94	398
3.1	0,7	5,85	8,76	250
3.2	0,5	4,04	6,52	261
3.3	0,7	6,48	8,90	254
3.4	0,5	4,51	7,46	298

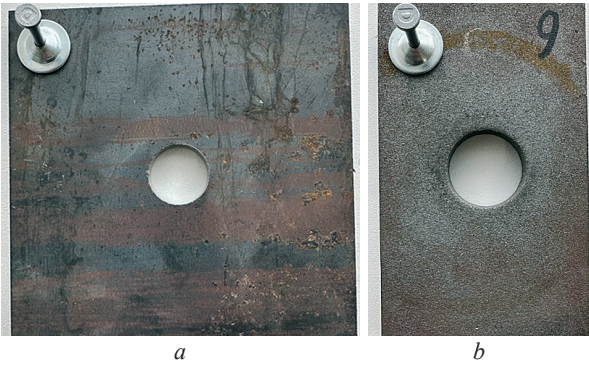


Рис. 11. Вид стальных пластин толщиной 6 мм (а) и 10 мм (b) с дюбелями, установленными без предварительно просверленных отверстий

Fig. 11. View of 6 mm (a) and 10 mm (b) thick steel plates with dowels installed without pre-drilled holes



Рис. 12. Оторванные головки дюбелей после их установки в отверстия диаметром 3 мм

Fig. 12. Detached dowel heads after their installation in holes with a diameter of 3 mm

противления стали в отверстия и не позволяет при диаметре отверстия 3 мм использовать дюбельное соединение с дюбелями диаметром 3 мм. На рис. 12 показаны головки, оторванные от ствола дюбеля, при установке дюбеля в отверстие диаметром 3 мм.

На рис. 13 представлены стальные пластины с отверстиями после установки дюбелей.

На рис. 13, кроме дюбелей, установленных в отверстия диаметром 2 и 2,5 мм, видны отверстия диаметром 3 мм, в которых произошло разрушение дюбелей при установке. Также видны дюбели, не пробившие пластины без отверстий. В пластине толщиной 6 мм дюбели в отверстия диаметром 2 и 2,5 мм удалось установить на полную длину. В пластину толщиной 10 мм на полную длину дюбель вошел в отверстие диаметром 2,5 мм, а в отверстие диа-

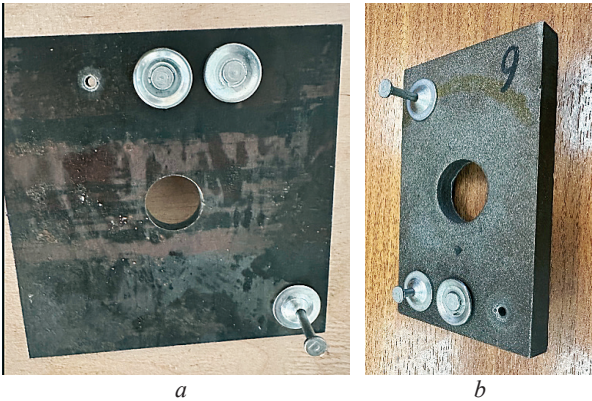


Рис. 13. Вид стальных пластин толщиной 6 мм (а) и 10 мм (b) с дюбелями, установленными в отверстия диаметром 2 и 2,5 мм

Fig. 13. View of steel plates with a thickness of 6 mm (a) and 10 mm (b) with dowels installed in holes with a diameter of 2 and 2.5 mm



Рис. 14. Вид стальных пластин и дюбеля после разрушения однодюбельного соединения

Fig. 14. View of the steel plates and dowels after the destruction of the single-tube connection

метром 2 мм дюбель вошел примерно на половину длины.

Испытание однодюбельного соединения пластин толщиной 3 и 6 мм подтвердило работоспособность такого узла. Разрушение соединения произошло в результате среза дюбеля. На рис. 14 показан разрушенный образец однодюбельного соединения пластин толщиной 6 и 10 мм.

Предельная нагрузка на образец однодюбельного соединения составила 9,73 кН. Разрушение произошло из-за среза дюбеля. Поверхность среза получилась гладкой. Заметно деформирование стенок отверстия в пластине толщиной 3 мм (рис. 14). Характер повреждений деталей в однодюбельном соединении соответствует теоретическим представлениям о работе таких соединений.

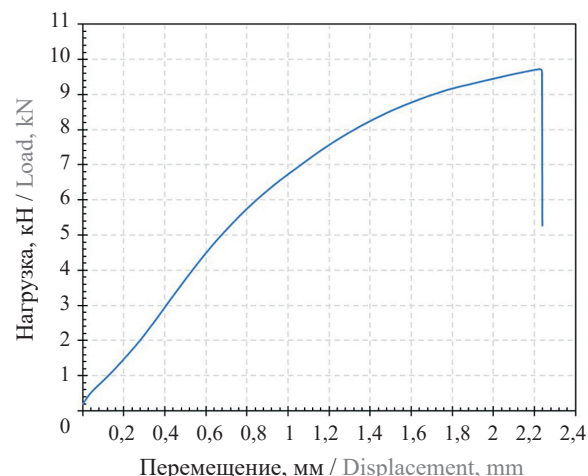


Рис. 15. Зависимость «перемещение – нагрузка» для однодюбельного соединения

Fig. 15. The dependence of “displacement – load” for a single-line connection

На рис. 15 представлена зависимость «перемещение – нагрузка» для однодюбельного соединения.

До нагрузки 5 кН зависимость перемещений от нагрузки близка к линейной. Затем перемещения нарастают быстрее. Более быстрый рост перемещений происходит из-за развития сдвигающих деформаций в дюбеле и смятия стенок отверстия в пластине толщиной 3 мм. При нагрузке 9,73 кН отмечается срез дюбеля и соединение разрушается.

Касательные напряжения в сечении среза при разрушении составили: $9730 \cdot 4 / (3,14 \cdot 3^2) = 1377$ МПа. Высокие разрушающие напряжения в сечении дюбеля обусловлены высокой прочностью стали дюбеля, что необходимо для уверенного пробития стальных листов. Высокая прочность дюбеля подтверждается тем, что при установке после проникновения в стальные пластины дюбель во всех случаях сохранял свою форму, на нем не замечены следы деформации, острие не затупилось, не согнулось.

Напряжения смятия в стенках отверстия стальной пластины толщиной 3 мм составили: $9730 / (0,5 \times 3,14 \cdot 3 \cdot 3) = 689$ МПа, что несколько меньше прочности на смятие для болтов класса А с плотным примыканием болта к стенкам отверстия (735 МПа для стали С345).

В целом проведенные испытания подтвердили работоспособность однодюбельного соединения и возможность применения дюбельных соединений в несущих конструкциях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментальные исследования дюбельных соединений тонколистовой оцинкованной стали дали возможность установить следующее.

Даже бытовые дюбели обладают высокой прочностью и стабильностью параметров, что позволяет

с успехом их использовать для соединения несущих элементов стальных конструкций.

Дюбельное соединение с применением двух дюбелей не позволяет нагружать тонколистовую оцинкованную сталь до исчерпания ее прочности. При использовании четырех дюбелей несущая способность соединения превышает прочность тонколистовой оцинкованной стали толщиной 0,5 и 0,7 мм.

Определена возможность с использованием дюбелей выполнять монтажные соединения тонколистовых (мембранных) оболочек, поставляемых на строительную площадку в рулонах, с контуром и отдельных рулонов между собой.

Выявлена невозможность пристрелки дюбеля в пластины из стали С345 толщиной 6 и 10 мм на полную длину из-за недостаточной пробивной способности рассматриваемых дюбелей.

При установке дюбелей в предварительно выполненные отверстия диаметром 3 мм происходит отрыв головки дюбеля и невозможность фиксации приклепываемых деталей.

В отверстия диаметром 2 и 2,5 мм при толщине пластины 6 мм дюбели входят на всю длину и надежно фиксируются.

При толщине пластины 10 мм на полную длину дюбели устанавливаются в отверстия диаметром 2,5 мм, в отверстия диаметром 2 мм дюбели входят только наполовину длины.

Дюбели можно использовать для соединения пластин толщиной 3 и 6 мм. Перед установкой дюбеля в пластину толщиной 3 мм выполнялось отвер-

стие диаметром 3 мм, а в пластине толщиной 6 мм отверстие диаметром 2,5 мм. Испытания однодюбельного соединения показали высокую несущую способность, что позволяет применять дюбели в соединениях несущих конструкций.

Дюбельные соединения в виде вводимых в предварительно просверленные отверстия в деталях высокопрочных сердечников, пластически деформирующих стенки отверстия, могут служить альтернативой фрикционным соединениям на высокопрочных болтах.

К преимуществам дюбельных соединений можно отнести простоту подготовки поверхностей соединяемых деталей, быстроту установки дюбеля (пороховым зарядом или монтажным прессом), отсутствие необходимости контроля за предельным моментом или углом закручивания, невозможность сдвигов до исчерпания прочности дюбеля на срез или соединяемых деталей на смятие.

Простота выполнения дюбельных соединений, возможность применения более мощных пороховых зарядов и дюбелей большего диаметра позволяют рассматривать такие соединения как одно из перспективных направлений по совершенствованию узлов металлических конструкций.

Продолжение исследований дюбельных соединений, разработка требований к высокопрочным дюбелям, технологии и оснастки для выполнения дюбельных соединений являются перспективными и представляют значительный научный и практический интерес.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Kyvelou P., Huang C., Li J., Gardner L. Residual stresses in steel I-sections strengthened by wire arc additive manufacturing // Structures. 2024. Vol. 60. P. 105828. DOI: 10.1016/j.istruc.2023.105828
2. Guo X., Kyvelou P., Ye J., Teh L.H., Gardner L. Experimental study of DED-arc additively manufactured steel double-lap shear bolted connections // Engineering Structures. 2023. Vol. 281. P. 115736. DOI: 10.1016/j.engstruct.2023.115736
3. Vatin N., Gubaydulin R., Tingaev A. Flange connections with high-strength bolts with technological heredity of bolts // Magazine of Civil Engineering. 2020. No. 7 (99). DOI: 10.18720/MCE.99.12. EDN QFVYPO.
4. Протасов К.Г., Теплицкий А.В., Крамарев С.Я., Никитин М.К. Металлические мосты : учебное пособие. М. : Транспорт, 1973. 352 с.
5. Белов В.К., Калюта А.А., Рудзей Г.Ф. Обеспечение усталостной долговечности авиационных конструкций технологическими методами : монография. Новосибирск : НГТУ, 2012. 404 с. EDN RPSAKJ.
6. Козлов И.Е. Применение соединений ЛСТК на вытяжных заклепках // Научному прогрессу — творчество молодых. 2017. № 4. С. 30–32. EDN ZVHCPI.
7. Туснина О.А. Соединения кровельных сэндвич-панелей с тонкостенными гнутыми прогонами, выполняемые на вытяжных заклепках // Промышленное и гражданское строительство. 2013. № 3. С. 14–16. EDN OHWQRL.
8. Мысак В.В., Туснина О.А., Данилов А.И., Туснин А.Р. Особенности работы соединений металлических элементов на заклепках различных типов // Вестник МГСУ. 2014. № 3. С. 82–91. EDN RYXTNN.
9. Lacki P., Kasza P., Adamus K. Optimization of composite dowels shape in steel-concrete composite floor // Composite Structures. 2019. Vol. 222. P. 110902. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.110902
10. Куцев И.Е., Петров М.А. Составные дюбели для анкеров в слабонесущих ограждающих конструкциях // Экономика строительства. 2023. № 10. С. 132–135. EDN VOGFOQ.

11. Гукова М.И., Попелянский Ю.Л., Марков Е.С. Оценка прочности соединений металлических элементов строительных конструкций на дюбелях // Промышленное строительство. 1978. № 6. С. 23–25. EDN ZIFFQZ.

12. Larsson G., Serrano E., Gustafsson P.J., Danielsson H. Dowel design of the shear plate dowel joint // Engineering Structures. 2020. Vol. 209. P. 110296. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110296

13. Еремеев П.Г. Тонколистовые мембраны — новый вид легких металлических конструкций (ЛМК) покрытий // Монтажные и специальные работы в строительстве. 1992. № 7. С. 14–16. EDN YZHETB.

14. Еремеев П.Г. Тонколистовые металлические мембранные конструкции покрытий: исследования, строительство // Вестник НИЦ Строительство. 2017. № 3 (14). С. 43–57. EDN ZCDGZN.

15. Фарфель М.И. Покрытия из стальных мембран — эффективный тип висячих конструкций // Строительная механика и расчет сооружений. 2024. № 4 (315). С. 58–67. DOI: 10.37538/0039-2383.2024.4.58.67. EDN ZOTSNM.

16. Tushin A. Experimental research of a membrane roof with the membrane eccentrically fixed

on a thin-walled open-profile supporting contour // Journal of Building Engineering. 2021. Vol. 39. P. 102256. DOI: 10.1016/j.jobe.2021.102256

17. Shehab A.A., Nawi S.A., Al-Rubaiy A., Hammoudi Z., Hafedh S.A., Abass M.H. et al. CO₂ laser spot welding of thin sheets AISI 321 austenitic stainless steel // Archives of Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 2. Issue 106. Pp. 68–77. DOI: 10.5604/01.3001.0014.6974

18. Xie J., Kar A. Laser welding of thin sheet steel with surface oxidation // Welding Research Supplement. 1999. Vol. 78. Issue 10. Pp. 343–348.

19. Artinov A., Karkhin V., Meng X., Bachmann M., Rethmeier M. A General Analytical Solution for Two-Dimensional Columnar Crystal Growth during Laser Beam Welding of Thin Steel Sheets // Applied Sciences. 2023. Vol. 13. Issue 10. P. 6249. DOI: 10.3390/app13106249

20. Туснин А.Р., Постарнак М.В. Испытания модели мембранного перекрытия многоэтажных зданий // Промышленное и гражданское строительство. 2022. № 9. С. 26–35. DOI: 10.33622/0869-7019.2022.09.26-35. EDN BLXHDI.

Поступила в редакцию 7 июня 2025 г.

Принята в доработанном виде 11 июня 2025 г.

Одобрена для публикации 8 июля 2025 г.

ОБ АВТОРЕ: **Александр Романович Туснин** — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой металлических и деревянных конструкций, директор Института промышленного и гражданского строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 7034-0713, РИНЦ ID: 455914; Scopus: 6507367654, ResearcherID: U-2546-2018, ORCID: 0000-0002-9997-9436; Tushinar@mgsu.ru.

REFERENCES

1. Kyvelou P., Huang C., Li J., Gardner L. Residual stresses in steel I-sections strengthened by wire arc additive manufacturing. *Structures*. 2024; 60:105828. DOI: 10.1016/j.istruc.2023.105828

2. Guo X., Kyvelou P., Ye J., Teh L.H., Gardner L. Experimental study of DED-arc additively manufactured steel double-lap shear bolted connections. *Engineering Structures*. 2023; 281:115736. DOI: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2023.115736

3. Vatin N., Gubayduln R., Tingaev A. Flange connections with high-strength bolts with technological heredity of bolts. *Magazine of Civil Engineering*. 2020; 7(99). DOI: 10.18720/MCE.99.12. EDN QFVYPO.

4. Protasov K.G., Teplitsky A.V., Kramarev S.Ya., Nikitin M.K. *Metal bridges : tutorial*. Moscow, Transport, 1973; 352. (rus.).

5. Belov V.K., Kalyuta A.A., Rudzey G.F. *Ensuring fatigue life of aircraft structures by technological methods : monograph*. Novosibirsk, NSTU, 2012; 404. EDN RPSAKJ. (rus.).

6. Kozlov I.E. Application of LSTC joints on blind rivets. *Scientific Progress — Creativity of the Young*. 2017; 4:30-32. EDN ZVHCPJ. (rus.).

7. Tushina O.A. Joints of sandwich panels with thin-walled bent purlins with the use of blind rivets. *Industrial and Civil Engineering*. 2013; 3:14-16. EDN OHWQRL. (rus.).

8. Mysak V.V., Tushina O.A., Danilov A.I., Tushin A.R. The features of riveted connections of metal elements. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2014; 3:82-91. EDN RYXTNN. (rus.).

9. Lacki P., Kasza P., Adamus K. Optimization of composite dowels shape in steel-concrete composite floor. *Composite Structures*. 2019; 222:110902. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.110902
10. Kushchev I.E., Petrov M.A. Composite dowels for anchors in low-bearing building envelopes. *Construction Economics*. 2023; 10:132-135. EDN VOGFOQ. (rus.).
11. Gukova M.I., Popelyansky Yu.L., Markov E.S. Evaluation of the strength of connections of metal elements of building structures on dowels. *Industrial Construction*. 1978; 6:23-25. EDN ZIFFQZ. (rus.).
12. Larsson G., Serrano E., Gustafsson P.J., Danielsson H. Dowel design of the shear plate dowel joint. *Engineering Structures*. 2020; 209:110296. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110296
13. Eremeev P.G. Thin-sheet membranes — a new type of light metal structures (LMS) coatings. *Installation and Special Works in Construction*. 1992; 7:14-16. EDN YZHETB. (rus.).
14. Eremeev P.G. Thin sheet metal membrane roofs structures: researches, building. *Bulletin of the Scientific Research Center of Construction*. 2017; 3(14):43-57. EDN ZCDGZN. (rus.).
15. Farfel M.I. Steel membrane coatings are an effective type of hanging structures. *Structural Mechanics and Calculation of Structures*. 2024; 4(315): 58-67. DOI: 10.37538/0039-2383.2024.4.58.67.EDN ZOTSNM. (rus.).
16. Tusnin A. Experimental research of a membrane roof with the membrane eccentrically fixed on a thin-walled open-profile supporting contour. *Journal of Building Engineering*. 2021; 39:102256. DOI: 10.1016/j.job.2021.102256
17. Shehab A.A., Nawi S.A., Al-Rubaiy A., Ham-moudi Z., Hafedh S.A., Abass M.H. et al. CO₂ laser spot welding of thin sheets AISI 321 austenitic stainless steel. *Archives of Materials Science and Engineering*. 2020; 2(106):68-77. DOI: 10.5604/01.3001.0014.6974
18. Xie J., Kar A. Laser welding of thin sheet steel with surface oxidation. *Welding Research Supplement*. 1999; 78(10):343-348.
19. Artinov A., Karkhin V., Meng X., Bachmann M., Rethmeier M. A General Analytical Solution for Two-Dimensional Columnar Crystal Growth during Laser Beam Welding of Thin Steel Sheets. *Applied Sciences*. 2023; 13(10):6249. DOI: 10.3390/app13106249
20. Tusnin A.R., Postarnak M.V. Testing of the membrane floor slab model of multi-storey buildings. *Industrial and Civil Engineering*. 2022; 9:26-35. DOI: 10.33622/0869-7019.2022.09.26-35. EDN BLXHDI. (rus.).

Received June 7, 2025.

Adopted in revised form on June 11, 2025.

Approved for publication on July 8, 2025.

BIONOTES: Aleksandr R. Tusnin — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Metal and Timber Structures, Director of the Institute of Industrial and Civil Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 7034-0713, ID RSCI: 455914; Scopus: 6507367654, ResearcherID: U-2546-2018, ORCID: 0000-0002-9997-9436; Tusninar@mgsu.ru.