

МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ДЮБЕЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЙ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ НА РАСТЯГИВАЮЩУЮ НАГРУЗКУ

Д.А. ЧЕСНОКОВ, канд. техн. наук

Независимый исследователь. Москва, Российская Федерация

Аннотация

Введение. Высокопрочные дюбель-гвозди могут применяться для крепления оборудования, элементов ЛСТК и кровли к металлическим конструкциям как альтернатива самонарезающим винтам и сварным соединениям. Современные дюбель-гвозди позволяют крепить стальные и алюминиевые конструкции толщиной 0,5–4,0 мм, с пределом прочности до 550 Н/мм² к стальным и чугунным основаниям толщиной от 3 мм с пределом прочности до 750 Н/мм². При работе дюбельного соединения на растягивающую нагрузку возможен ряд механизмов разрушения, вероятность наступления которых должна быть проверена расчетом. В настоящее время в России действуют два свода правил по проектированию металлических конструкций (СП 260.13330.2023 и СП 294.13330.2017), имеющих положения по расчету дюбельных соединений. Данные положения имеют ряд существенных отличий и должны быть гармонизированы между собой.

Цель. Оценка точности существующих методик расчета дюбельных соединений по актуальным нормативным документам РФ, Евросоюза и США для различных механизмов разрушения креплений.

Материалы и методы. Для проверки результатов расчета были использованы данные испытаний 25 серий испытаний креплений стальных конструкций на растяжение. Для испытаний были использованы 5 типов дюбель-гвоздей различной конфигурации, диапазон толщин прикрепляемых элементов составил 0,5–3 мм, диапазон толщин базовых материалов 3–6 мм.

Результаты. В испытаниях выделены два основных механизма разрушения: вырыв дюбеля из основания и прорыв прикрепляемого листа. Данные испытаний сравнены с результатами расчета креплений по российским стандартам, а также с положениями EN 1993-1-3 и AISI S100-24. При анализе положений указанных стандартов выявлены различия в области применения и расчетных подходах.

Выводы. Установлено, что методика СП 294.13330.2017 обеспечивает наибольшую точность прогноза несущей способности в пределах своей области применения, а также может быть рекомендована для расчета креплений тонколистовых элементов ($t_1 \geq 0,8$ мм).

Ключевые слова: дюбель-гвоздь, дюбельные соединения, техника прямого монтажа, металлические конструкции, расчет соединений

Для цитирования: Чесноков Д.А. Методики расчета дюбельных соединений металлических конструкций на растягивающую нагрузку // Вестник НИЦ «Строительство». 2026. № 2(49). С. 31–47. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2026-2\(49\)-31-47](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2026-2(49)-31-47) EDN: CDCCPG

Вклад авторов

Чесноков Д.А. – выбор объекта и методики исследования, разработка программы проведения экспериментальных исследований, обработка результатов лабораторных испытаний с их обобщением и анализом.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 24.11.2025

Поступила после рецензирования 17.02.2026

Принята к публикации 05.03.2026

POWER-ACTUATED FASTENER CONNECTION IN TENSION DESIGN METHODS

D.A. CHESNOKOV, Cand. Sci. (Engineering)

Independent researcher: Moscow, Russian Federation

Abstract

Introduction. High-strength power-actuated pins can be used for fastening equipment, cold-formed metal buildings elements, and roof decking to metal structures as an alternative to self-drilling screws and welded joints. Modern pins allow fastening steel and aluminum components with thicknesses ranging from 0.5 to 4.0 mm and tensile strength from 330 to 550 N/mm² to steel and cast iron bases with thicknesses starting from 3 mm and tensile strength from 350 to 750 N/mm². When an anchor connection is subjected to tensile load, several failure mechanisms may occur, and their likelihood must be verified by calculation. Currently, Russia has two design codes for metal structures (SP 260.13330.2023 and SP 294.13330.2017) that include provisions for calculating anchor connections. These provisions have significant differences and need to be harmonized.

Materials and methods. To verify calculation results, data from 25 series of tensile tests on steel structure fastenings were used. Five types of pins with different configurations were tested. The thickness range of the attached elements was 0.5–3 mm, and the thickness range of the base materials was 3–6 mm.

Results. Two failure modes were identified in the tests: pull-out from the base and tearing of the attached sheet. Test data were compared with calculation results according to Russian standards, as well as with provisions of EN 1993-1-3 and AISI S100-24. Analysis of these standards revealed differences in application scope and calculation approaches.

Conclusions. It was established that the methodology of SP 294.13330.2017 provides the highest prediction accuracy of load-bearing capacity within its application scope and can be recommended for extended use when fastening thin-sheet elements ($t_1 \geq 0.8$ mm).

Keywords: power-actuated pins, power-actuated connections, direct fastening technology, steel structures, fastening design

For citation: Chesnokov D.A. Power-actuated fastener connection in tension design methods. *Bulletin of Science and Research Center of Construction*, 2026, no. 2(49), pp. 31–47. [In Russian] [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2026-2\(49\)-31-47](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2026-2(49)-31-47) EDN: CDCCPG

Author contribution statements

Chesnokov D.A. – Selection of the research subject and methodology, formulation of an experimental program, and systematic processing, synthesis, and analytical interpretation of laboratory test results.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

Received 24.11.2025

Revised 17.02.2026

Accepted 05.03.2026

Введение

Применение высокопрочных дюбель-гвоздей для устройства креплений оборудования и элементов ЛСТК к стальным конструкциям позволяет получить надежные соединения при минимальных трудозатратах. Высокая производительность труда монтажников, выполняющих дюбельные соединения, обеспечивается применением пороховых, пневматических и аккумуляторных монтажных пистолетов [1]. Область применения современных дюбель-гвоздей включает в себя крепление стальных и алюминиевых элементов толщиной 0,5–4,0 мм, с пределом прочности от 330 до 550 Н/мм² к стальным и чугунным основаниям толщиной от 3 мм с пределом прочности от 350 до 750 Н/мм². Верхний предел толщины некоторых дюбель-гвоздей формально не ограничен, что позволяет устанавливать дюбели в стальной массив [2–6] (рис. 1, 2). Однако при производстве работ следует исключать устройство креплений вблизи сварных швов согласно требованиям СП 70.13330.2012 [7].

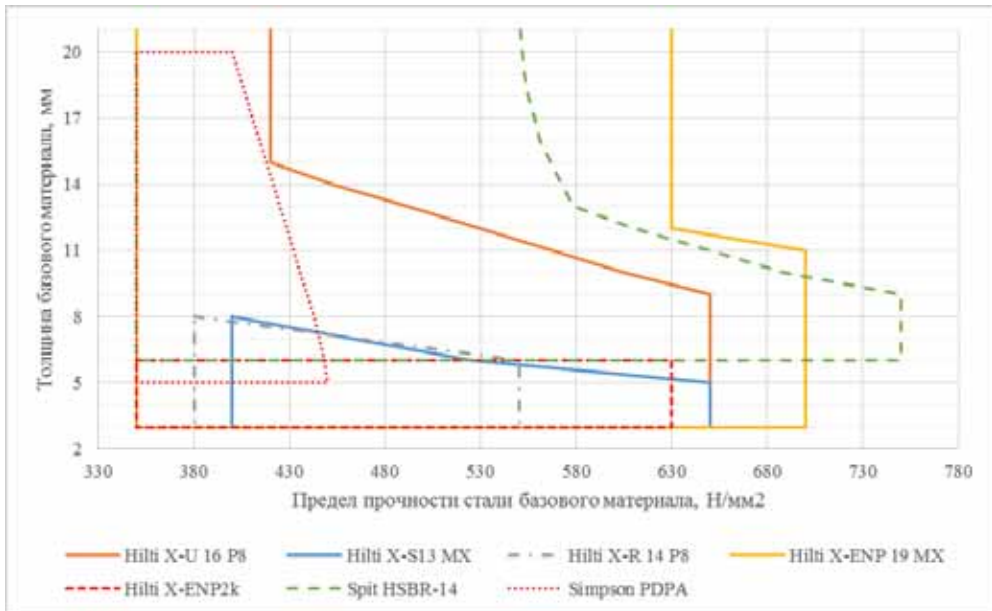


Рис. 1. Сравнение областей применения дюбель-гвоздей разных марок

Fig. 1. Comparison of application limits of different powder-actuated pins

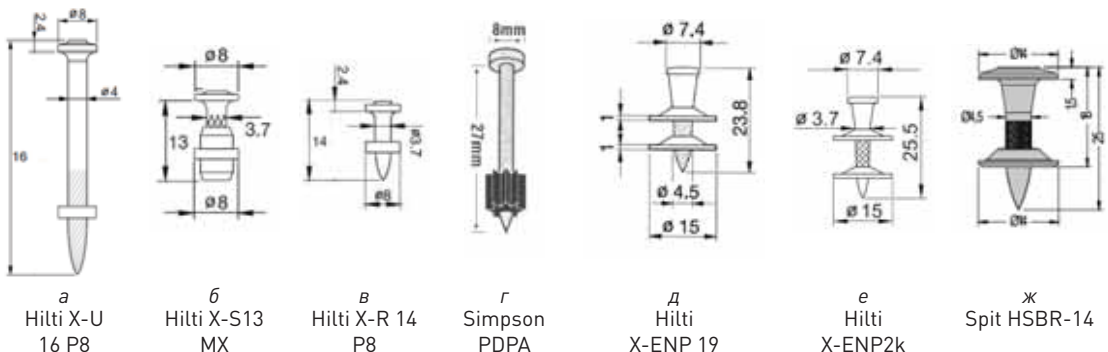


Рис. 2. Геометрические характеристики рассматриваемых дюбель-гвоздей

Fig. 2. Geometric characteristics of the investigated pins

Различия в области применения обусловлены конструктивными особенностями дюбелей (геометрия, прочность стали, технология обработки острия) [8] и мощностью удара соответствующих монтажных пистолетов. Дюбель-гвозди, предназначенные для крепления тонких профилированных листов, могут иметь специальные шайбы (рис. 2 д, е, ж) [9].

При выстреле из монтажного пистолета дюбель-гвоздь под воздействием удара поршня о головку проникает в основание, вызывая пластическую деформацию металла вокруг острия. Анкеровка крепежного элемента обеспечивается за счет силы трения стержня о материал основания и упругого обжатия стержня материалом основания за счет его локального уплотнения (рис. 3а) [10]. Сила трения, возникающая при контакте дюбеля с основанием, вызывает локальное повышение температуры, которое при наличии цинкового покрытия на элементе может дополнительно вызывать эффект спайки (рис. 3б). В отдельных случаях наблюдаются эффекты микрозащемления (при наличии насечки на стержне дюбеля, рисунок 3в) и сварки трением (рисунок 3г) [11]. Влияние каждого из механизмов крепления на несущую способность зависит от типа крепежного элемента, толщины, прочности и твердости материала основания [8]. При установке дюбелей в растянутую зону конструктивных элементов из высокопрочной стали в месте контакта могут возникать лучеобразные микротрещины, которые в случае агрессивного воздействия среды усиливают тенденцию к коррозионному растрескиванию (водородному охрупчиванию) материала основания [12].

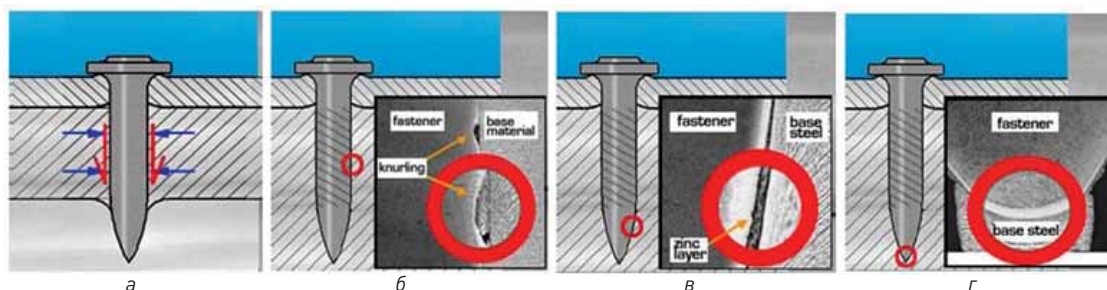


Рис. 3. Механизмы анкеровки дюбель-гвоздей
Fig. 3. Geometric characteristics of the investigated pins

Для креплений металлических конструктивных элементов к стали, работающих на растяжение и устроенных с помощью техники прямого монтажа возможны те же механизмы разрушения, что и для самонарезающих винтов, описанных в статье [13]: разрушение крепежного элемента вследствие разрушения по поперечному сечению стержня (включая отрыв головки или шайбы) (рис. 4а); вырыв дюбель-гвоздя из основания (рисунок 4б); прорыв прикрепляемого элемента (рис. 4в). Отдельные исследования выделяют несколько случаев разрушения крепления вследствие вырыва в зависимости от соотношения длины острия дюбеля и толщины прикрепляемого материала, а так же глубины анкеровки [14].

Далее рассмотрены 4 стандарта по расчету металлических конструкций, имеющих положения по расчету дюбельных соединений: российские СП 260.13330.2023 [15] и СП 294.13330.2017 [16], европейский EN1993-1-3 [17] и американский AISI S100-24 [18]. Сравнительный анализ областей применения каждого из стандартов представлен в Таблице 1.

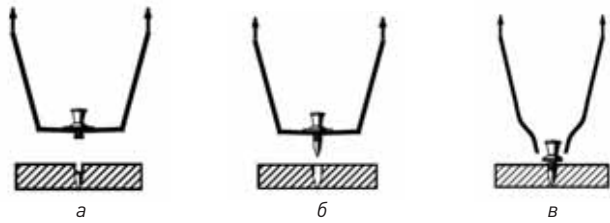


Рис. 4. Механизмы разрушения креплений на дюбель-гвоздях
Fig. 4. Powder-actuated pins failure modes

Таблица 1

Сравнение областей применения стандартов

Table 1

Comparison of the application scopes of different standards

Требование	СП 260.13330.2023, 11.1-11.2	СП 294.13330.2017, 12.4	EN 1993-1-3:2005 8.3	AISI S100-24, J6
Материал дюбель-гвоздя	Сталь с $R_{un} \geq 2000$ МПа, с твердостью ≥ 55 HRC	Сталь с $R_{un} = 210-1500$ МПа	Нет требований	Углеродистая или нержавеющая сталь, с твердостью 49-61 HRC
Диаметр стержня, d	11.1.16 $d = 3,0-8,0$ мм 11.2.1 $d = 2,6-6,4$ мм	$d = 2,6-6,4$ мм	$d = 3,7-6,0$ мм	$d = 2,69-5,23$ мм
Диаметр шайбы, d_w	Нет требований	Нет требований	Нет требований	$d_w \leq 15,2$ мм (ограничение касается расчетного диаметра. Фактический диаметр не ограничен)
Прикрепляемый материал, t_1	Раздел 1 $t_1 < 4,0$ мм П. 11.1.16 Сталь с $R_{un} \leq 550$ Мпа, $t_1 = 0,5 - 1,5$ мм	Сталь с $R_{un} 355-590$ МПа, $t_1 \geq 1,5$ мм	Сталь с $R_{un} 270-550$ МПа, $t_1 = 0,5 - 1,5$ мм	Сталь с $R_{un} 275-550$ МПа $t_1 \leq 1,52$ мм
Толщина базового материала, t_2	Раздел 1 $t_2 < 4,0$ мм П. 11.1.1 $t_2 \geq 3,0$ мм П. 11.1.16 Сталь с $R_{un} \leq 550$ Мпа, $t_2 > 4,0$ мм при $d=3,7$ мм $t_2 > 6,0$ мм при $d=4,5$ мм $t_2 > 8,0$ мм при $d=5,2$ мм	Сталь с $R_{un} \leq 550$ Мпа, $t_2 = 3 - 40$ мм	Сталь с $R_{un} 360-550$ МПа, $t_2 \geq 6,0$ мм	Сталь с $R_{un} 275-550$ МПа $t_2 \leq 19.1$ мм
Краевые расстояния, e	$e = 4,5d$	$e = 4,5d$	$e = 4,5d$	$e = 12,7$ мм при $d=2,69-5,08$ мм $e = 25,4$ мм при $d=5,08-5,23$ мм
Осевые расстояния, s	$s = 4,5d$	$s = 4,5d$	$s = 4,5d$	$s = 25,4$ мм при $d=2,69-5,08$ мм $s = 40,6$ мм при $d=5,08-5,23$ мм
R_{un} – нормативное временное сопротивление HRC – твердость по Роквеллу				

Стоит отметить, что в СП 260.13330.2023 в пределах одного раздела содержатся противоречащие друг другу требования к диаметру дюбелей, а также толщинам прикрепляемого и базового материалов. Приведенное требование к прочности стали дюбелей фактически отсекает любые крепежные элементы из углеродистой стали.

Рассмотрим подходы данных стандартов к проверке прочности крепления по каждому из возможных механизмов разрушения:

Таблица 2

Сравнение методик расчета

Table 2

Comparison of design methodologies

Стандарт	Разрушение по поперечному сечению стержня (А)	Вырыв дюбель-гвоздя из основания (Б)	Прорыв прикрепляемого элемента (В)
СП 260.13330.2023	F_t определяется по результатам испытаний	F_o определяется по результатам испытаний	$F_p = d_w \cdot t_1 \cdot R_{u1}$
СП 294.13330.2017	Нет требований	$N_{do} = 0,24 \cdot R_{un2} \cdot \pi \cdot d \cdot 0.6 \cdot t_2$	$N_{dp} = d_w \cdot t_1 \cdot R_{u1}$
EN 1993-1-1:2005	Нормативное значение $F_{t,Rd}$ определяется по результатам испытаний	$F_{o,Rd}$ определяется по результатам испытаний	$F_{p,Rd} = d_w \cdot t_1 \cdot R_{u1}$
AISI S100-24	$P_{ntp} = (d/2)^2 \pi \cdot 455 \cdot 2,718^{(HRC_p/40)}$	P_{not} определяется по результатам испытаний	$P_{nov} = \alpha_w \cdot t \cdot d_w \cdot R_{u1}$

Примечания:
1. Формулы в таблице приведены для условий статического нагружения без учета коэффициентов надежности. При проектировании крепления на сопротивление ветровой нагрузке, значения F_p , N_{dp} , $F_{p,Rd}$ нужно дополнительно умножить на коэффициент 0,5.
2. Переменные формул приведены в соответствии с Таблицей 1 и следующими условными обозначениями:
 R_u – расчетное сопротивление стали;
 α_w – коэффициент, учитывающий геометрию шайбы дюбеля:
Дюбель-гвозди с головкой без шайбы или с внешней шайбой (рис. 5а), $\alpha_w=1,5$
Дюбель-гвозди с предустановленной шайбой (рис. 5б), $\alpha_w=1,25$
Дюбель-гвозди с предустановленной пружинной шайбой (рис. 5в), $\alpha_w=2,0$

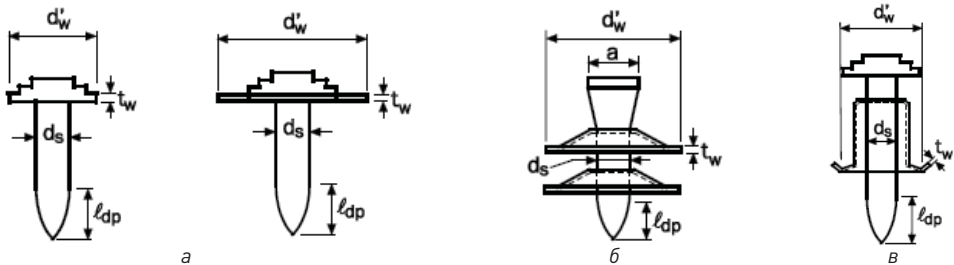


Рис. 5. Схема для определения коэффициента α_w по AISI S100-24
Fig. 5. Schematic for determining the α_w coefficient according to AISI S100-24

Во всех рассмотренных стандартах кроме AISI S100-24, в качестве коэффициента надежности по материалу (в СП 260.13330 обозначен как «коэффициент условий работы») принято значение $\gamma_m=1,25$. В строительном нормировании США сосуществуют два подхода к расчету конструкций: ASD (Allowable Strength Design) – расчет по допустимым напряжениям и LRFD (Load and Resistance Factor Design) – расчета с коэффициентами нагрузки и сопротивления [19].

Суть расчета и проектирования по ASD состоит в создании конструктивной системы, в элементах которой упругие расчетные напряжения на этапе расчета при номинальных

(фактических) нагрузках не превышали некоторого заданного допустимого напряжения. Допускаемое усилие в конструктивном элементе определяется путем деления «номинальной» прочности элемента на коэффициент Ω .

Метод LRFD схож с концепцией расчета конструкций по предельным состояниям, применяемым в России, поскольку содержит коэффициенты надежности как по нагрузке, так и по прочности элементов. Расчетное сопротивление конструктивного элемента определяется путем умножения «номинальной» прочности на коэффициент надежности Φ . Несмотря на то, что метод LRFD считается более прогрессивным и предпочтительным для расчета сложных конструктивных систем, на практике метод ASD также имеет широкое применение. По этой причине в AISI S100-24 приведено два набора коэффициентов надежности для разных механизмов разрушения (Таблица 3).

Таблица 3

Коэффициенты надежности по AISI S100-24

Table 3

Safety factors according to AISI S100-24

Характер работы крепления	Механизм разрушения	Ω (ASD)	Φ (LRFD)
Растяжение	Разрушение по поперечному сечению стержня	2,65	0,6
	Вырыв дюбель-гвоздя из основания	4,0	0,4
	Прорыв прикрепляемого элемента	3,0	0,5

Анализ расчетных положений отечественных стандартов выявил следующие области для их совершенствования:

- область применения обоих сводов правил должна быть уточнена. Выявлены как противоречия внутри самих стандартов, так и требования к материалу дюбелей, которые не могут быть выполнены современными производителями.

- терминология и условные обозначения должны быть приведены в соответствие с принятыми в СП 16.13330.2017 [20].

- подход к расчету креплений должен быть унифицирован и, возможно, объединен в один стандарт для избежания дублирования. В настоящее время отмечается наличие избыточных, либо некорректных коэффициентов надежности, и уравнений, заимствованных из методики расчета болтовых соединений.

Ввиду того, что в некоторых аспектах расчета дюбельных соединений зарубежные стандарты имеют существенные отличия, возникает задача по определению и сравнению запасов прочности по различным механизмам разрушения, рассчитанным по рассматриваемым нормам.

Материалы и методы

Для проверки рассмотренных методик расчета были использованы данные лабораторных испытаний 5 типов дюбель-гвоздей производства компании Hilti. Дюбель-гвозди X-HSN, X-ENP и X-ENP2k предназначены для крепления стальных профилированных настилов к стальным конструкциям различной толщины и имеют прижимную шайбу, препятствующую прорыванию тонких прикрепляемых листов при отрыве настила. Дюбель-гвозди X-R и X-U предназначены для крепления конструктивных элементов повышенной толщины (Таблица 4). Данные о нормативных сопротивлениях вырыву и срезу в Таблице 4 представлены на основании Руководства по технологии прямого монтажа Hilti [4].

Таблица 4

Характеристики рассматриваемых дюбель-гвоздей

Table 4

Properties of the investigated powder-actuated pins

Марка	Прочность стали, МПа	HRC	L, мм	t ₁ , мм	t ₂ , мм	d, мм	d _н , мм	Нормативное сопротивление растяжению, кН
X-ENP2k	>750	57	25,5	0,75–1,5	3–6	3,7	15,0	8,8
X-R	>2000	57	14,0	0,75–3,0	3–8	3,7	8,0	2,2
X-HSN24	>590	55	24,0	0,6–1,5	3–9.5	3,75	12,0	3,9
X-U	>660	46	16,0	0,75–1,25	≥6	4,0	8,0	2,0
X-ENP	>750	57	23,8	0,6–2,5	≥6	4,5	15,0	8,8

Испытания креплений на растяжение, приведенные в Таблице 6, выполнены автором при поддержке сотрудников лабораторий ИСМИиК (НИУ МГСУ), а также рассмотрены данные других исследователей [21, 22]. Данные статистически обработаны и приведены к расчетным значениям с применением коэффициента Оуэна для обеспеченности 0,95 при достоверности 90 % [23]:

$$S = \sqrt{\frac{\sum(N_i - N_{cp})^2}{n - 1}},$$
$$v = \frac{S}{N_{cp}},$$
$$N_{Rd} = \frac{N_{cp}(1 - t \cdot v)}{\gamma_m},$$

где N_{cp} – среднее значение разрушающей нагрузки, определенное по серии испытаний без учета выпадающих результатов, кН;
 N_i – единичное значение нагрузки в серии результатов испытаний, кН;
 n – число результатов в серии испытаний;
 S – среднее квадратическое отклонение единичных значений нагрузки, кН;
 v – коэффициент вариации v ;
 t – коэффициент Оуэна для нижней границы несущей способности крепежного элемента в соответствии с Таблицей 5.

Таблица 5

Коэффициенты Оуэна

Table 5

Owen's statistical factors

Число результатов испытаний, n	Значение коэффициента, t
5	3,400
6	3,091
7	2,894
8	2,755
9	2,649
10	2,568

Таблица 6

Результаты испытаний образцов

Table 6

Test results of the specimens

№	Шифр серии испытаний	Крепежный элемент			Базовый материал		Прикрепляемый материал		Результаты испытаний	
		Марка	R_{un} , МПа	HRC	t_2 , мм	R_{un} , МПа	t_1 , мм	R_{un} , МПа	F_{test} , кН	Механизм разрушения
1	P-ENP2k-3-0.7	X-ENP2k	763	57,7	3,0	413	0,7	290	3,8	Б + В
2	P-ENP2k-3-0.8	X-ENP2k	763	57,7	3,0	413	0,8	290	5,5	Б + В
3	P-ENP2k-5-0.7	X-ENP2k	763	57,7	5,0	446	0,7	290	4,1	В
4	P-ENP2k-5-0.8	X-ENP2k	763	57,7	5,0	446	0,8	290	6,1	В
5	P-ENP2k-5-0.9	X-ENP2k	763	57,7	5,0	446	0,9	290	6,5	В
6	P-ENP2k-5-1	X-ENP2k	763	57,7	5,0	446	1,0	290	7,3	В
7	P-ENP2k-5-1.2	X-ENP2k	763	57,7	5,0	446	1,2	290	7,5	В
8	P-R-6-3	X-R 14	2123	57,6	5,9	448	3,0	431	12,4	Б
9	P-HSN-3-1.9	X-HSN24	590	55,4	3,2	400	1,9	401	7,0	Б
10	P-HSN-5-1.9	X-HSN24	590	55,9	4,8	438	1,9	401	11,1	Б + В
11	P-HSN-10-0.7	X-HSN24	590	55,9	9,5	448	0,7	409	5,5	В
12	P-HSN-10-0.9	X-HSN24	590	55,4	9,5	448	0,9	415	6,3	В
13	P-HSN-10-1.2	X-HSN24	590	55,9	9,5	448	1,2	413	8,5	В
14	P-HSN-10-1.5	X-HSN24	590	55,3	9,5	448	1,5	399	8,6	В
15	P-HSN-10-1.9	X-HSN24	590	55,5	9,5	448	1,9	401	12,2	В
16	P-U-3-2.9	X-U 16	765	45,5	3,2	331	2,9	336	3,3	Б
17	P-U-6-3	X-U 16	669	57,9	5,9	448	3,0	431	7,1	Б
18	P-ENP-6-0.5	X-ENP 19	669	57,9	5,9	448	0,5	290	1,5	В
19	P-ENP-6-0.5	X-ENP 19	783	57,7	6,0	437	0,5	290	1,2	В
20	P-ENP-6-0.7	X-ENP 19	783	57,7	6,0	437	0,7	290	2,6	В
21	P-ENP-6-0.8	X-ENP 19	783	57,7	6,0	437	0,8	290	3,1	В
22	P-ENP-6-0.9	X-ENP 19	783	57,7	6,0	437	0,9	290	5,1	В
23	P-ENP-6-1.2	X-ENP 19	783	57,7	6,0	437	1,2	290	7,5	В
24	P-ENP-6-2	X-ENP 19	785	57,3	5,9	448	2,0	380	9,4	Б
25	P-ENP-6-3	X-ENP 19	785	57,3	5,9	448	3,0	431	7,6	Б
26	P-ENP2k-3-0.7	X-ENP2k	763	57,7	3,0	413	0,7	290	3,8	Б + В
27	P-ENP2k-3-0.8	X-ENP2k	763	57,7	3,0	413	0,8	290	5,5	Б + В
28	P-ENP2k-5-0.7	X-ENP2k	763	57,7	5,0	446	0,7	290	4,1	В

Примечание: для описания механизмов разрушения (МР) использованы следующие условные обозначения:
Б – Вырыв крепежного элемента из основания;
В – Прорыв прикрепляемого элемента.

При анализе результатов испытаний стоит отметить, что ни одного разрушения вследствие разрыва крепежного элемента зафиксировано не было: для образцов с толщиной прикрепляемого материала более 2 мм и нормативным сопротивлением стали >400 МПа

характерен вырыв дюбеля из основания (рис. 6а). Для образцов с меньшей толщиной при-
крепляемого материала и/или прочностью характерен прорыв прикрепляемого материала
через шляпку гвоздя (рис. 6б), либо смешанный тип (вырыв + прорыв).



Рис. 6. Характерные механизмы разрушения в испытанных образцах
Fig. 6. Typical failure modes observed in the tested specimens

Далее для испытанных образцов были вычислены расчетные значения прочности
креплений по СП 294.13330.2017, СП 260.13330.2023, AISI S100-24 (Таблица 7). Расчеты
креплений по EN 1993-1-1:2005 не приводятся, так как его методика расчета идентична
СП 260.13330.2023.

Таблица 7

Расчетная прочность креплений для испытанных образцов

Table 7

Calculated strength of fastenings for the tested specimens

№	Шифр серии испытаний	Результаты испытаний		СП 294.13330.2017			СП 260.13330.2023			AISI S100-24		
		F_{test} , кН	MP	F_{rd} , кН	F_{rd} / F_{test}	MP	F_{rd} , кН	F_{rd} / F_{test}	MP	F_{rd} , кН	F_{rd} / F_{test}	MP
1	P-ENP2k-3-0.7	3,8	Б + В	2,07	46 %	В	2,44	64 %	В	3,05	80 %	В
2	P-ENP2k-3-0.8	5,5	Б + В	2,07	38 %	В	2,78	50 %	В	3,48	63 %	В
3	P-ENP2k-5-0.7	4,1	В	2,44	60 %	В	2,44	60 %	В	3,05	75 %	В
4	P-ENP2k-5-0.8	6,1	В	2,78	46 %	В	2,78	46 %	В	3,48	57 %	В
5	P-ENP2k-5-0.9	6,5	В	3,13	48 %	В	3,13	48 %	В	3,52	54 %	Б
6	P-ENP2k-5-1	7,3	В	3,48	48 %	В	3,48	48 %	В	3,52	48 %	Б
7	P-ENP2k-5-1.2	7,5	В	3,73	50 %	В	4,18	55 %	В	3,52	47 %	Б
8	P-R-6-3	12,4	Б	1,76	14 %	А=Б	1,76	14 %	А=Б	0,88	7 %	Б
9	P-HSN-3-1.9	7,0	Б	2,15	31 %	А=Б	3,10	44 %	А=Б	1,55	22 %	Б
10	P-HSN-5-1.9	11,1	Б + В	3,10	28 %	А=Б	3,10	28 %	А=Б	1,55	14 %	Б
11	P-HSN-10-0.7	5,5	В	2,87	52 %	В	2,87	52 %	В	1,55	28 %	Б
12	P-HSN-10-0.9	6,3	В	3,10	49 %	А=Б	3,10	49 %	А=Б	1,55	25 %	Б
13	P-HSN-10-1.2	8,5	В	3,10	36 %	А=Б	3,10	36 %	А=Б	1,55	18 %	Б
14	P-HSN-10-1.5	8,6	В	3,10	36 %	А=Б	3,10	36 %	А=Б	1,55	18 %	Б
15	P-HSN-10-1.9	12,2	В	3,10	25 %	А=Б	3,10	25 %	А=Б	1,55	13 %	Б
16	P-U-3-2.9	3,3	Б	1,60	49 %	А=Б	1,60	49 %	А=Б	0,80	24 %	Б
17	P-U-6-3	7,1	Б	1,60	23 %	А=Б	1,60	23 %	А=Б	0,80	11 %	Б

№	Шифр серии испытаний	Результаты испытаний		СП 294.13330.2017			СП 260.13330.2023			AISI S100-24		
		F_{test} , кН	MP	F_{rd} , кН	F_{rd} / F_{test}	MP	F_{rd} , кН	F_{rd} / F_{test}	MP	F_{rd} , кН	F_{rd} / F_{test}	MP
18	P-ENP-6-0.5	1,5	В	1,74	115 %	В	1,74	115 %	В	2,18	144 %	В
19	P-ENP-6-0.5	1,2	В	1,74	151 %	В	1,74	151 %	В	2,18	188 %	В
20	P-ENP-6-0.7	2,6	В	2,44	92 %	В	2,44	92 %	В	3,05	115 %	В
21	P-ENP-6-0.8	3,1	В	2,78	90 %	В	2,78	90 %	В	3,48	113 %	В
22	P-ENP-6-0.9	5,1	В	3,13	61 %	В	3,13	61 %	В	3,52	69 %	Б
23	P-ENP-6-1.2	7,5	В	4,18	56 %	В	4,18	56 %	В	3,52	47 %	Б
24	P-ENP-6-2	9,4	Б	5,33	57 %	А=Б	7,04	75 %	А=Б	3,52	37 %	Б
25	P-ENP-6-3	7,6	Б	5,33	71 %	А=Б	7,04	93 %	А=Б	3,52	47 %	Б

Примечание: для описания механизмов разрушения (MP) использованы следующие условные обозначения:
А – Разрыв крепежного элемента;
Б – Вырыв крепежного элемента из основания;
В – Прорыв прикрепляемого элемента.

Результаты

Сравнение результатов испытаний креплений на растяжение с расчетной прочностью приведено на рис. 7. На графике видно, что для большинства образцов все три стандарта дают достаточно большой запас по прочности (15 % до 88 %), кроме серий с толщиной прикрепляемого материала 0,5 мм. Для двух серий P-ENP-6-0.5 разница между с результатами испытаний и расчетом составила более 15 %, что является неприемлемым для инженерной методики. Для образцов с дюбелем X-ENP и толщиной прикрепляемого материала 0,7–0,8 мм результаты расчета по отечественным стандартам показали запас прочности 8–10 %, в то время, как результат по AISI S100-24 оказался ниже значения, полученного в результате испытаний.

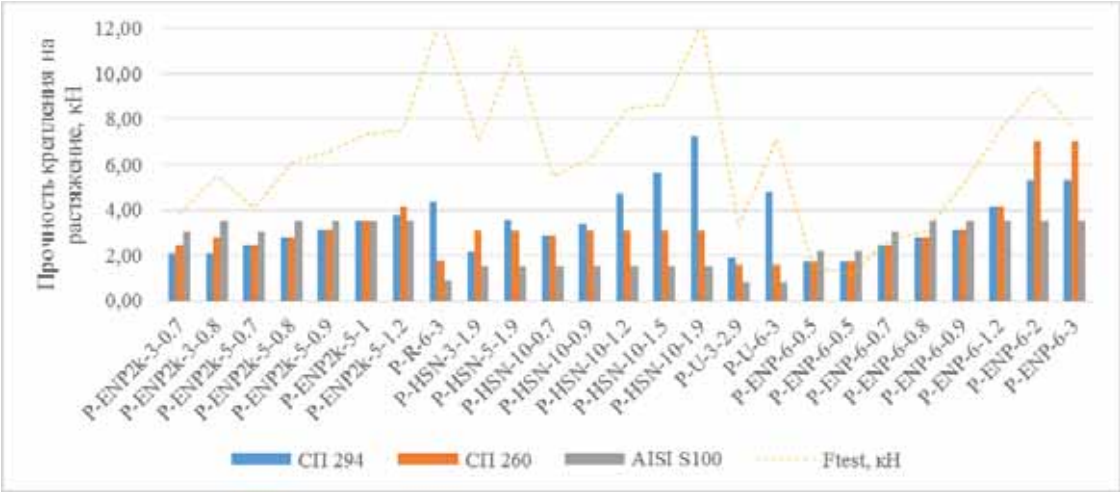


Рис. 7. Сравнение результатов испытаний образцов с расчетными значениями
Fig. 7. Comparison of Test Results with Calculated Values

Крепления в ряде серий (P-R-6-3, P-HSN-3-1.9, P-U-3-2.9, P-U-6-3, P-ENP-6-2 и P-ENP-6-3) разрушились вследствие вырыва дюбеля из основания. Стандарты СП 260.13330.2023 и AISI S100-24 не дают аналитической методики для оценки проч-

ности анкеровки дюбеля в основании и используют для проверки данные испытаний, в то время как в СП 294.13330.2017 предложена формула, устанавливающая зависимость между прочностью и толщиной стального основания, диаметром дюбеля и его сопротивлением вырыву. Выполним сравнение результатов испытаний с расчетными значениями сопротивления дюбеля вырыву по СП 294.13330.2017 и СП 260.13330.2023. Данные по AISI S100-24 не приводятся, поскольку отличаются от СП 260.13330.2023 только коэффициентом надежности.

Таблица 8

Сравнение результатов (серии с вырывом дюбеля из основания)

Table 8

Comparison of results for the fastener pullout failure series

№	Шифр серии испытаний	Результаты испытаний	СП 294.13330.2017		СП 260.13330.2023	
		F_{test} , кН	F_{rd} , кН	F_{rd} / F_{test}	F_{rd} , кН	F_{rd} / F_{test}
1	P-R-6-3	12,40	4,38	0,35	1,76	0,14
2	P-HSN-3-1.9	7,00	2,15	0,31	3,10	0,44
3	P-U-3-2.9	3,27	1,90	0,58	1,60	0,49
4	P-U-6-3	7,11	4,74	0,67	1,60	0,23
5	P-ENP-6-2	9,40	5,33	0,57	7,04	0,75
6	P-ENP-6-3	7,55	5,33	0,71	7,04	0,93

На рис. 8 видно, что для представленной выборки аналитический подход дает более точный «прогноз» с достаточным запасом прочности (30–70 %) по отношению к фактическим значениям прочности. В то же время для серии P-ENP-6-3, разница между расчетным значением, полученным по СП 260.13330.2023 на основе «данных производителя» составила всего 7 %. Принимая во внимание, что для остальных серий запас сопоставим с результатами аналитического расчета, требуется уточнение методики оценки технических данных, публикуемых производителями.

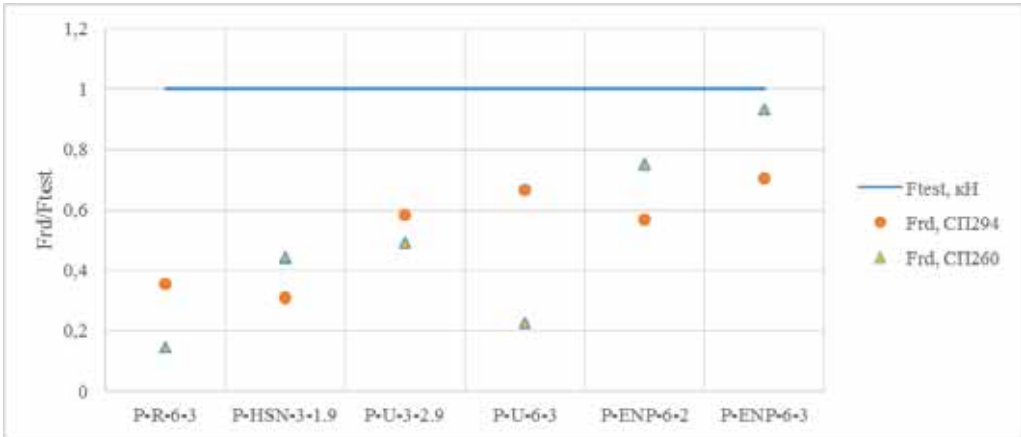


Рис. 8. Сравнение результатов испытаний образцов, разрушившихся вследствие вырыва дюбеля из основания, с расчетными значениями

Fig. 8. Comparison of experimental results and calculated values for specimens failing by fastener pullout from the base material

В Таблице 9 представлены результаты испытаний серий, разрушившихся вследствие прорыва листа через головку дюбеля и их «теоретическая прочность». Значения для СП 260.13330.2023 и СП 294.13330.2017 приведены в одной колонке, поскольку имеют идентичные уравнения и коэффициент надежности для данного механизма разрушения.

Таблица 9

Сравнение результатов (серии с прорывом листа через головку дюбеля)

Table 9

Comparison of results for the sheet pull-over failure series

№	Шифр серии испытаний	Результаты испытаний	СП 294.13330.2017, СП 260.13330.2023		AISI S100-24	
		F_{test} , кН	F_{rd} , кН	F_{rd} / F_{test}	F_{rd} , кН	F_{rd} / F_{test}
1	P-ENP2k-3-0.7	3,81	2,44	0,64	3,05	0,80
2	P-ENP2k-3-0.8	5,52	2,78	0,50	3,48	0,63
3	P-ENP2k-5-0.7	4,07	2,44	0,60	3,05	0,75
4	P-ENP2k-5-0.8	6,07	2,78	0,46	3,48	0,57
5	P-ENP2k-5-0.9	6,54	3,13	0,48	3,92	0,60
6	P-ENP2k-5-1	7,29	3,48	0,48	4,35	0,60
7	P-ENP2k-5-1.2	7,53	4,18	0,55	5,22	0,69
8	P-HSN-5-1.9	11,06	7,23	0,65	9,04	0,82
9	P-HSN-10-0.7	5,49	2,87	0,52	3,58	0,65
10	P-HSN-10-0.9	6,26	3,41	0,54	4,27	0,68
11	P-HSN-10-1.2	8,49	4,69	0,55	5,87	0,69
12	P-HSN-10-1.5	8,65	5,60	0,65	7,00	0,81
13	P-HSN-10-1.9	12,23	7,23	0,59	9,04	0,74
14	P-ENP-6-0.5	1,51	1,74	1,15	2,18	1,44
15	P-ENP-6-0.5	1,15	1,74	1,51	2,18	1,88
16	P-ENP-6-0.7	2,64	2,44	0,92	3,05	1,15
17	P-ENP-6-0.8	3,09	2,78	0,90	3,48	1,13
18	P-ENP-6-0.9	5,14	3,13	0,61	3,92	0,76
19	P-ENP-6-1.2	7,52	4,18	0,56	5,22	0,69

На рис. 9 видно, что кроме описанных выше серий P-ENP-6-0.5, P-ENP-6-0.7, P-ENP-6-0.8 американский стандарт оказывается точнее на 11–16 %. Ввиду того, что все рассмотренные образцы включали в себя специализированные дюбель-гвозди для крепления тонкого настила с характерной прижимной шайбой, оценить влияние коэффициента α , примененного в AISI S100-24 на точность прогноза не представляется возможным.

На основании проведенного выше анализа можно сделать вывод о том, что методика расчета дюбельных соединений по СП 294.13330.2017 для представленной выборки из 25 серий дает наибольшую точность в определении реальной несущей способности дюбельного соединения. Несмотря на то, что область применения стандарта с точки зрения толщины прикрепляемого материала ограничена $t_1 \geq 1,5$ мм, результаты анализа показывают, что она может применяться вплоть до $t_1 > 0,8$ мм. В данном диапазоне указанная методика дает запас 29–69 % по отношению к результатам испытаний.

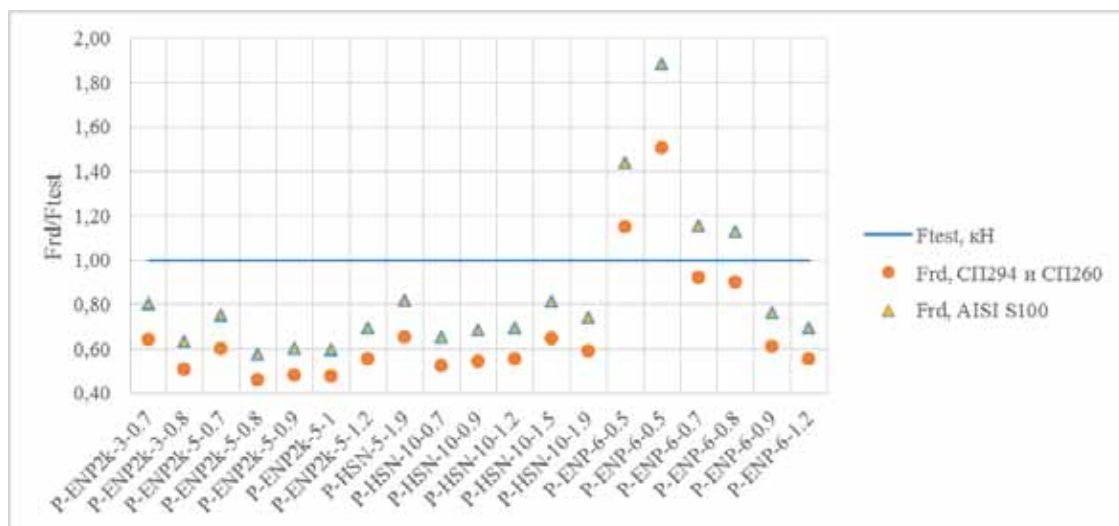


Рис 9. Сравнение результатов испытаний образцов, разрушившихся вследствие прорыва листа через головку дюбеля, с расчетными значениями

Fig. 9. Comparison of experimental results with calculated values for specimens that failed by sheet pull-over

Ключевым недостатком методики, описанной в СП 294.13330.2017, является избыточность всевозможных коэффициентов, которые ввиду отсутствия вариативности, могут быть приведены к константам. Также отмечена путаница в терминах и индексах некоторых величин, которые затрудняют практическое применение методики. При этом в стандарте отсутствует проверка крепления по прочности крепления по поперечному сечению стержня.

Несмотря на указанные недостатки, методика СП 294.13330.2017 в случае расширения области применения на крепление ЛСТК может полностью заменить собой положения СП 260.13330.2023 по расчету дюбельных соединений. Дальнейшее развитие методики возможно по пути уточнения факторов, влияющих на прочность анкеровки дюбеля в основании и учет вклада прижимной шайбы при расчете крепления на прорыв прикрепляемого листа, особенно при его толщине 0,5–0,8 мм.

Выводы

1. Надежность дюбельных соединений металлических конструкций при работе на статические растягивающие нагрузки обеспечивается несколькими взаимодополняющими механизмами анкеровки крепежного элемента в основании. Наибольший вклад в прочность крепления оказывает сила трения между стержнем дюбеля и материалом основания. В отдельных случаях на прочность крепления оказывают влияние эффект спайки цинкового покрытия дюбеля с основанием и эффект микрозашемления насечек на стержне дюбеля, однако оценить их вклад аналитически сложно.

2. Разрушение дюбельного соединения металлических конструкций при работе на растягивающие нагрузки возможно вследствие одного из трех механизмов разрушения: разрушения по поперечному сечению стержня, включая отрыв головки или шайбы; вырыв дюбель-гвоздя из основания и прорыв прикрепляемого элемента. Наступление того или иного механизма разрушения зависит главным образом от толщины и

прочности скрепляемых металлических элементов. При креплении тонких стальных элементов толщиной до 1,5 мм существенное влияние на прочность оказывает конструкция дюбеля, которая при наличии прижимной шайбы имеет повышенное сопротивление прорыву листа.

3. Рассмотрены два российских, европейский и американский стандарты по проектированию металлических конструкций, имеющих положения по расчету дюбельных соединений. Несмотря на единство в подходе, во всех стандартах были выявлены различия в области применения и особенности, влияющие на результат расчета. Для проверки результатов расчета были использованы данные испытаний 25 серий лабораторных испытаний креплений стальных конструкций на растяжение. Для испытаний были использованы 5 типов дюбель-гвоздей различной конфигурации, диапазон толщин прикрепляемых элементов составил 0,5–3 мм, диапазон толщин базовых материалов: 3–6 мм.

4. По результатам анализа было установлено, что методика СП 294.13330.2017 дает наиболее точные результаты расчета в пределах своей области применения, которая может быть расширена по результатам данного исследования. Установлено, что при понижении минимально допустимой толщины прикрепляемого листа с 1,5 до 0,8 мм указанная методика дает запас 29–69 % по отношению к результатам испытаний. Таким образом становится возможно ее применение для расчета элементов кровли из стального профилированного настила.

Список литературы

1. Beck H., Siemers M., Reuter M., Schöffendt E. Powder-actuated fasteners and fastening screws in steel construction. *Steel Construction Calendar*, 2019, pp. 16–24.
2. Рихтер Д.А., Иовенко А.А., Ершов М.Н., Проектирование сталежелезобетонных перекрытий по стальному профилированному настилу с применением анкерных упоров X-HVB // *Технология и организация строительного производства*. 2013. № 4(5). С. 17–22. EDN: RYHSKX
3. Kishiki S., Apriyadi A. J., Tatsumi N., Watahabe E., Okada Y., Hasebe M. Application of power actuated fasteners to framing components: joint strength of steel deck with power actuated fasteners. *Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ)*, 2021, no. 86(779), pp. 135–144. DOI: 10.3130/aijs.86.135
4. Руководство по технологии прямого монтажа Hilti / Hilti AG, Шаан, Лихтенштейн/ 2025. С. 341.
5. ETA-08/0040 – Power actuated fasteners: HSB 14, HSB 14 Tube and HSB 14 Strip, SPIT, 2018. 9 с.
6. Каталог продукции Simpson Strong-Tie, C-A-2023 / Simpson Strong-Tie, Плесантон, 2023. 250 с.
7. СП 70.13330.2012 Несущие и ограждающие конструкции [с Изменениями № 1, 2, 3, 4, 5, 6], 2023.
8. Бирюков М.А., Песин А.М., Чукин М.В., Картунов А.Д., Бакшинов В.А., Бирюков А.В., Разработка импортозамещающей технологии производства дюбель-гвоздей на основе численного моделирования методом конечных элементов // *Вестник МГТУ им. Г.И. Носова*. 2016. Т. 14. № 1. С. 52–59. DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-1-52-59.
9. Ступин Д.А. Совершенствование способов соединения металлических конструкций дюбелями // *XLII Гагаринские чтения*. 2016. С. 77–78.
10. Roy K., Cao Hung Pham. Power-actuated fasteners in single shear. An experimental investigation and proposed design rules. *Engineering Structures*, 2022, no. 259, pp. 66–124. DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.114124
11. Beck H., Engelhardt M., Glaser N. Static Pullout Strength of Power Actuated Fasteners in Steel: State-of-the-Art Review. *Engineering Journal*, 2023, no. 2, pp. 99–110.
12. Гальчун И.А., Садкин К.Е., Назарова Е.Д. Циклическая трещиностойкость высокопрочных сталей, склонных к водородному охрупчиванию, в коррозионной среде // *Труды Крыловского государственного научного центра. Специальный выпуск*. 2021. № 2. С. 126–131.
13. Катранов И.Г., Кунин Ю.С., Экспериментальные исследования работы вытяжных заклепок и винтов в соединениях ЛСТК // *Наука и безопасность*. 2011. № 2. С. 62–68.

14. Ubejd Mujagic J.R., Green P.S., Gould W.G. Strength Prediction Model for Power Actuated Fasteners Connecting Steel Members in Tension and Shear-north American Applications. *20st International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures*, 2010, pp. 551–574.
15. СП 260.13330.2023 Конструкции стальные тонкостенные из холодногнутых оцинкованных профилей и гофрированных листов. Правила проектирования, 2023.
16. СП 294.1325800.2017 Конструкции стальные. Правила проектирования (с Изменениями № 1, 2, 3, с Поправкой), 2023.
17. EN1993-1-1:2005/AC:2009 Eurocode 3 – General rules and rules for buildings, 2022.
18. AISI S100-24 – North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members – 2024.
19. Sabelli R., Ziemian R.D., Schafer B.W. ASD and LRFD lateral load combinations: Comparison of required strength and reliability for design of structural steel. *Journal of Constructional Steel Research*, 2024, no. 212. DOI: 10.1016/j.jcsr.2023.108326
20. СП 16.13330.2017 Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81* (с Поправками, с Изменениями № 1–6), 2024.
21. Кудрявцев М.В. Испытание дюбель-гвоздей в образцах стали различной толщины. *Сборник докладов научно-технической конференции по итогам научно-исследовательских работ студентов института строительства и архитектуры НИУ МГСУ*. 2018. С. 986–988.
22. Truong A.N., Pham C.H., Hancock G.J. Power-Actuated Fasteners Connecting Cold-Formed Sheet Steels under Monotonic Tension Loading. *Journal of Structural Engineering*, 2021, vol. 147, no. 3, article 04020361. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002920
23. Оуэн Д.Б., Сборник статистических таблиц [Текст] / Обработка таблиц Л.С. Барк; Пер. с англ. Л.Н. Большева и В.Ф. Котельниковой; М.: АН СССР. Матем. ин-т им. В.А. Стеклова, 1966. 586 с.

References

1. Beck H., Siemers M., Reuter M., Schöffendt E. Powder-actuated fasteners and fastening screws in steel construction. *Steel Construction Calendar*, 2019, pp. 16–24.
2. Rihter D.A., Iovenko A.A., Ershov M.N. Designing of permanent steel decking slabs with X-HVB anchor technology. *Technology and Organization of Construction Production*, 2013, no. 4(5), pp. 17–22 (In Russian). EDN: RYHSKX
3. Kishiki S., Apriyadi A.J., Tatsumi N., Watahabe E., Okada Y., Hasebe M. Application of power actuated fasteners to framing components [part 1]: joint strength of steel deck with power actuated fasteners. *Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ)*, no. 86(779), pp. 135–144, 2021. DOI: 10.3130/aijs.86.135
4. Hilti AG, Direct fastening technology manual, *Schaan, Liechtenstein*, 2025.
5. ETA-08/0040 – Power actuated fasteners: HSBR 14, HSBR 14 Tube and HSBR 14 Strip, *SPIT*, 2018.
6. Simpson Strong-Tie, C-A-2023. Anchoring, Fastening, *Restoration and Strengthening Systems for Concrete and Masonry*, *Pleasanton*, 2023.
7. СП 70.13330.2012 Load-bearing and separating constructions (with revisions no. 1, 2, 3, 4, 5, 6), 2023 (In Russian).
8. Biryukov M.A., Pesin A.M., Chukin M.V., Kartunov A.D., Bakshinov V.A., Biryukov A.V. Development of import-substituting technology for the production of dowel nails based on numerical finite element modeling. *Vestnik of Novosibirsk State Technical University*, 2016, vol. 14, no.1, pp. 52–59, 2016. DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-1-52-59 (In Russian).
9. Stupin D.A. Improving the methods of connecting metal structures with dowels. *XLII Gagarinskies chteniya*, 2016, pp. 77–78.
10. Roy K., Cao Hung Pham, Pham C.H. Power-actuated fasteners in single shear- An experimental investigation and proposed design rules. *Engineering Structures*, 2022, no. 259, pp. 66–124, DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.114124
11. Beck H., Engelhardt M., Glaser N. Static Pullout Strength of Power Actuated Fasteners in Steel: *State-of-the-Art Review*. *Engineering journal*, 2003, no. 2, pp. 99–110.
12. Galchun I., Sadkin K., Nazarova Ye. Fatigue crack toughness of high-strength steels prone to hydrogen embrittlement in corrosive environment. *Transactions of the Krylov State Research Centre. Special Issue 2*, 2021, pp. 126–131. (In Russian).

13. Katranov I.G., Kunin Yu.S. Experimental studies of the operation of exhaust rivets and screws in LSTC joints. *Nauka i bezopasnost*, 2011, no. 2, pp. 62–68. (In Russian).
14. Ubejd Mujagic J.R., Green P.S. Gould W.G. Strength Prediction Model for Power Actuated Fasteners Connecting Steel Members in Tension and Shear—North American Applications. *20st International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures*, 2010, pp. 551–574.
15. SP 260.13330.2023 – Cold-formed thin-walled steel profile and galvanized corrugated plate constructions. *Design rules*, 2023. (In Russian).
16. SP 294.1325800.2017 Steel Structures. Design rules (with revisions no. 1, 2, 3, with amendment), 2023. (In Russian).
17. EN1993-1-2:2005/AC:2009 Eurocode 3 – General rules and rules for buildings, 2022. AISI S100-24 – *North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members*, 2024.
18. AISI S100-24 – North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members – 2024.
19. Sabelli R., Ziemian R.D., Schafer B.W. ASD and LRFD lateral load combinations: Comparison of required strength and reliability for design of structural steel. *Journal of Construction Steel Research*, 2024, no. 212. DOI: 10.1016/j.jcsr.2023.108326
20. SP 16.13330.2017 – Steel Structures. Updated edition of SNiP II-23-81* (with Amendments and Revisions no. 1–6), 2024. (In Russian).
21. Kudryavtsev M.V. Testing dowel nails in steel samples of various thicknesses. *Collection of reports of a scientific and technical conference on the results of research work by students of the Institute of Construction and Architecture NRU MSTU*, 2018, pp. 986–988. (In Russian).
22. Truong A.N., Pham C.H., Hancock G.J. Power-Actuated Fasteners Connecting Cold-Formed Sheet Steels under Monotonic Tension Loading. *Journal of Structural Engineering*, 2021, vol. 147, no. 3, article 04020361. DOI:10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002920
23. Owen D.B. Collection of statistical tables [Text] / Processing tables by L.S. Bark ; Translated from English by L.N. Bolshev and V.F. Kotelnikova; 586 p. Moscow: USSR Academy of Sciences. Matem. V.A. Steklov Institute, 1966.

Информация об авторе / Information about the author

Чесноков Денис Александрович, канд. техн. наук, инженер по стандартизации и сертификации, независимый исследователь. Москва

SPIN-код: 1405-2285, ORCID: 0000-0002-4620-4442; Chesnokovdenis23@gmail.com.

Denis A. Chesnokov, Cand. Sci. (Engineering), Codes and Approvals engineer, Independent researcher. Moscow