



(25)-0417-1

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА И АНАЛИЗ РАБОТОСПОСОБНОСТИ КОМБИНИРОВАННЫХ БОЛТОСВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ ДЕЙСТВИИ УСИЛИЯ СДВИГА

Николай Владимирович Солодов¹, Николай Вячеславович Водяхин²

^{1,2} Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, Белгород, Россия,

¹solodov_niko_v@mail.ru, ²partietz5000@bk.ru

Аннотация. В статье приведены данные экспериментальных исследований болтовых, сварных и комбинированных болтосварных соединений в строительных металлоконструкциях. На основании полученных результатов сделаны выводы о работоспособности комбинированного болтосварного соединения, воспринимающего усилие сдвига. Опытные образцы комбинированных болтосварных соединений получены в результате усиления болтовых соединений под нагрузкой фланговыми угловыми сварными швами. Экспериментально подтверждена возможность совместной работы разнодеформативных связей в виде болтов обычной прочности и сварных швов. Получена количественная оценка эффективности усиления болтовых соединений сварными швами в процентах повышения несущей способности образцов комбинированных болтосварных соединений по сравнению с несущей способностью отдельно болтовых и сварных образцов. Кроме того, получена количественная оценка эффективности совместной работы болтовых связей в комбинированном болтосварном соединении в виде доли усилия сдвига, воспринимаемого болтовыми связями после усиления соединения, отнесенной к величине их фактической предельной нагрузки. Указанные выше результаты экспериментальных исследований получены применительно к двум группам опытных образцов. Конструкция образцов одной группы предусматривала для исходных болтовых соединений реализацию предельного состояния среза болтов, а другой – предельное состояние смятия кромки отверстия стержнем болта.

Ключевые слова: комбинированные болтосварные соединения, срез болтов, болтовые и сварные соединения, усиление болтовых соединений, фланговые швы, деформативность, несущая способность

Финансирование: Работа выполнена в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет 2030» с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В. Г. Шухова.

Для цитирования: Солодов Н. В., Водяхин Н. В. Экспериментальная оценка и анализ работоспособности комбинированных болтосварных соединений при действии усилия сдвига // Металлические конструкции. 2025. Том 31, № 1. С. 5–14. doi: 10.71536/mc.2025.v31n1.1. edn: srqnmmt.



Original article

EXPERIMENTAL EVALUATION AND ANALYSIS OF THE SERVICEABILITY OF COMBINED BOLT-WELDED JOINTS UNDER SHEAR FORCE

Nikolai V. Solodov¹, Nikolai V. Vodyakhin²

^{1,2} Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov, Belgorod, Russia,

¹solodov_niko_v@mail.ru, ²partietz5000@bk.ru

Abstract. The article presents the data of experimental studies of bolted, welded and combined bolt-welded joints in building steel structures. On the basis of the results obtained, conclusions are drawn about the serviceability of the combined bolt-welded connection, absorbing shear force. Experimental samples of combined bolt-welded joints are obtained as a result of reinforcement of bolted joints under load by flank angle welds. The possibility of joint operation of multistrain connections in the form of bolts of ordinary strength and welded joints has been experimentally confirmed. A quantitative assessment of the effectiveness of bolted connections reinforcement with welded seams in percent of increase in the load-bearing capacity of the combined bolt-welded connection specimens compared to the load-bearing capacity of separately bolted and welded specimens has been obtained. In addition, a quantitative assessment of the efficiency of joint operation of bolted links in a combined bolted-welded connection was obtained in the form of a fraction of the shear force perceived by bolted links after reinforcement of the connection, referred to the value of their design ultimate load. The above results of experimental studies were obtained for two groups of prototypes. The design of specimens of one group provided for the initial bolted connections for the realization of the limit state of bolt shear, and the other – the limit state of buckling of the hole edge by the bolt rod.

Keywords: combined bolt-welded joints, bolt shear, bolted and welded joints, reinforcement of bolted joints, longitudinal fillet weld, deformability, bearing capacity

Funding: The work was carried out within the framework of the federal program for supporting universities «Priority 2030» using equipment based on the High Technology Center of the V. G. Shukhov BSTU.

For citation: Solodov N. V., Vodyakhin N. V. Experimental evaluation and analysis of the serviceability of combined bolt-welded joints under shear force. *Metal Constructions*. 2025;31(1): 5–14. (in Russ.). doi: 10.71536/mc.2025.v31n1.1. edn: srqnm

Введение

В практике металлостроительства достаточно распространены соединения на болтах обычной прочности класса точности В, воспринимающие усилие сдвига. К их числу можно отнести узлы соединения в одном уровне главных и второстепенных балок рабочих площадок и перекрытий многоэтажных зданий, узлы монтажных стыков на накладках отправочных марок длинных балок и стропильных ферм, узлы крепления элементов вертикальных связей к колоннам и другие.

В процессе эксплуатации такие узлы в ряде случаев требуют усиления из-за увеличения усилий (нагрузок) в сопрягаемых элементах, из-за пропуска (неустановки) при монтаже болтов и т. п. Усиление узлов путем замены старых болтов на новые высокопрочные преднапряженные

не всегда возможно. Например, из-за: ограниченности или невозможности доступа к болтам усиливаемого узла; невозможности подготовки контактных поверхностей соединяемых деталей; невозможности выполнить достаточную разгрузку усиливаемого узла для замены болтов и т. п.

В этой связи приобретает актуальность разработка новых конструктивных решений для усиления узлов болтовых соединений стальных конструкций. Одним из вариантов решения проблемы могут стать комбинированные болтосварные соединения. Однако, действующие нормы (СП 16.13330.2017) содержат прямой запрет на применение таких соединений.

На основе анализа факторов действительной работы узла болтового соединения, в случае его

усиления сваркой под нагрузкой, можно предположить, что в предшествующий усилению период болтовое соединение, вследствие действия приложенных нагрузок, уже реализовало значительную часть своих деформаций (упругих, пластических, а также деформаций сдвига соединяемых деталей на величину зазора из-за разницы диаметров болта и отверстия). После усиления такого соединения сварными швами, при частичной разгрузке, и последующего после усиления нагружения, даже сверх уровня нагрузки на соединение до усиления, болтовые связи будут работать с меньшей деформативностью, что создает условия для их совместной работы со сварными швами. Однако, такое предположение требует экспериментального обоснования и дальнейших исследований, чему и посвящена настоящая статья.

Анализ исследований и публикаций

Сочетание двух и более видов связей в одном конструктивном решении принято называть комбинированным соединением. В ряде зарубежных источников иногда используют термин гибридное соединение. Анализ исследований отечественных и зарубежных авторов позволил составить перечень таких соединений. На рис. 1 приведены виды комбинированных соединений, нашедших применение в различных отраслях промышленности, в том числе в строительстве.

Исследованию комбинированных болтосварных соединений посвящен целый ряд опублико-

ванных работ. Проведенный анализ публикаций по этой тематике позволил установить, что комбинированные болтосварные соединения, прежде всего на высокопрочных преднапряженных болтах, последние несколько десятков лет исследовали специалисты из России (СССР) [2; 4; 5], Польши [1], Украины [3], США, Канады, КНР, Южной Кореи. Вероятно, первые исследования комбинированных болтосварных соединений были выполнены в конце 60-х начале 70-х годов прошлого века в Северной Америке Г. Л. Кулаком и Н. М. Хольцем (G. L. Kulak и N. M. Holtz) [6]. Авторы исследования установили работоспособность комбинированных болтосварных соединений с преднапряженными высокопрочными болтами и сварными швами, а также пришли к выводу, что в таких соединениях большое влияние на несущую способность комбинированного соединения оказывает положение сварных швов (лобовые или фланговые сварные швы). В дальнейшем исследованию комбинированных болтосварных соединений были посвящены работы К. Х. Яроша, М. Д. Бовмана (К. Н. Jarosch, M. D. Bowman) [7], Т. Д. Мануеля, Г. Л. Кулака, Г. Я. Грондина (Т. J. Manuel, G. L. Kulak, G. Y. Grondin) [8–9], Я. М. Гуо, Е. Д. Шия, Л. Ванга, Е. К. Ванга, Д. С. Ма, Р. С. Бай, М. Жянсуо, М. С. Лю, Т. Лана, С. Геуй-Юнга, Е. Чинг-Ю, К. Дае-Кюнга, Л. Чеол-Хо (Y. M. Guo, Y. J. Shi, L. Wang, Y. Q. Wang, J. S. Ma, R. S. Bai, M. Jiansuo, M. S. Liu, T. Lan, C. Heui-Yung, Y. Ching-Yu, K. Dae-Kyung, L. Cheol-Ho) [10–17]. Приведенные исследования были выполнены как на основе



Рисунок 1 – Виды комбинированных соединений.

экспериментальных образцов, так и с применением численного моделирования. Авторы исследований отмечают, что такие соединения имеют достаточный ресурс работоспособности.

По комбинированным соединениям на болтах без контролируемого натяжения, хотя они и исследованы в существенно меньших масштабах, также имеются экспериментальные данные о ресурсе работоспособности [1; 17]. Работоспособность комбинированных болтосварных соединений, образованных путем усиления под нагрузкой болтовых соединений на болтах обычной прочности, до настоящего времени не была исследована.

По результатам выполненного обзора и анализа публикаций были сформулированы **научная проблема** и **научная гипотеза** о возможности усиления сварными швами под нагрузкой болтовых соединений без контролируемого натяжения болтов, воспринимающих усилие сдвига, а также о том, что в таких соединениях возможна совместная работа разнодеформативных связей (болтов и угловых фланговых сварных швов) и что такие соединения будут работоспособны после их усиления.

Цель исследования

Получить экспериментальное обоснование работоспособности и несущей способности болто-

го соединения, усиленного под нагрузкой фланговыми угловыми сварными швами, а также количественную оценку эффективности усиления и эффективности совместной работы разнодеформативных связей, в виде болтов обычной прочности и сварных швов, в комбинированном соединении.

Объект исследования

Болтовые, сварные и комбинированные болтосварные соединения, полученные путем усиления под нагрузкой болтовых соединений фланговыми угловыми сварными швами.

Основная часть

Для решения научной проблемы были разработаны программа и методика экспериментального исследования, конструкция опытных образцов и выполнены их испытания. Всего испытано 18 образцов, объединенных в две группы. Образцы первой группы (SR) запроектированы таким образом, что в болтовом соединении предельное состояние определяется срезом болтов, а второй группы (SM) – смятием кромки отверстия стержнем болта. Общий вид конструкции болтовых, сварных и комбинированных болтосварных образцов приведен на рис. 2.

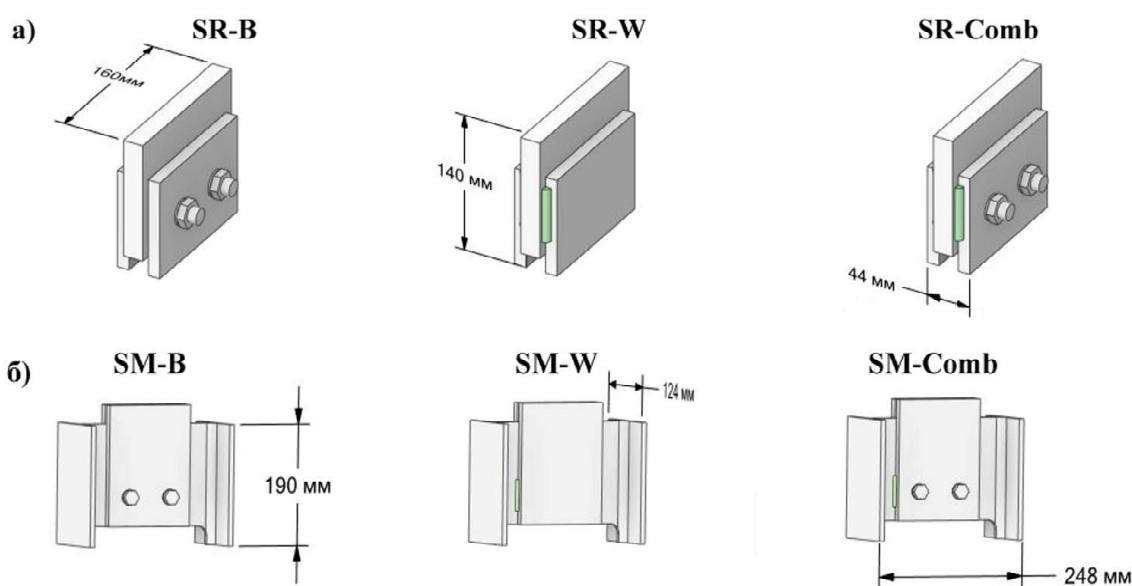


Рисунок 2 – Общий вид экспериментальных образцов: а) образцы группы SR; б) образцы группы SM.

Индекс «В» в маркировке образцов означает, что образец имеет только болтовые связи, индекс «W» – только сварные, а «Comb» – что соединение является комбинированным.

Образцы группы SR были выполнены из пластин толщиной 20 мм и 10 мм, группы SM – из пластин толщиной 10 мм и двутавра 25Б1. Все образцы изготовлены из стали 09Г2С.

Опытные образцы были выполнены на болтах Ø16 мм, класс прочности 5,8. Сварные швы имели катет 6 мм и длину 4×55 мм для образцов группы SR и, соответственно 4 и 4×50 мм для группы SM.

Листовые детали вырезали из одного прокатного листа соответствующей толщины, а детали фасонного проката из двутавровой балки длиной 12 м. Рабочие торцовые поверхности деталей образцов, через которые прикладывалась нагрузка, фрезеровали.

Параметры опытных болтовых и сварных образцов в каждой из групп SR и SM были подобраны таким образом, что их расчетные предельные нагрузки были практически равны или имели достаточно близкие значения (табл.).

Комбинированные болтосварные образцы получали путем наложения сварных швов усиления на предварительно нагруженные образцы болтовых соединений. Величина предварительного нагружения составляла 60 % от расчетной предельной нагрузки, найденной в соответствии с СП 16.13330.2017, усиливаемого болтового соединения по реализуемому критерию разрушения (срез болтов или смятие кромки отверстий деталей).

Испытания образцов проводили в гидравлическом прессе с предельным усилием 1 250 кН. Общий вид образцов в ходе испытаний показан на фото на рис. 3.

На основании полученных данных на каждой ступени нагружения были построены диаграммы работы под нагрузкой образцов групп SR и SM. Общий вид диаграмм показан на рис. 4.

Расчетные и экспериментальные значения предельных нагрузок для болтовых, сварных и комбинированных болтосварных соединений, а также данные о величине взаимного сдвига деталей, образующих эти соединения, приведены в таблице.

В каждой строке таблицы приведены средние для трех образцов каждой марки данные об экспериментальной разрушающей нагрузке, о деформациях взаимного сдвига деталей и об эффективности усиления образцов и работы болтовых связей в комбинированном болтосварном соединении.

Данные таблицы позволяют сделать утвердительный вывод о работоспособности комбинированного (болтосварного) соединения, полученного путем усиления под нагрузкой болтового соединения фланговыми угловыми сварными швами.

Об этом свидетельствует то обстоятельство, что величина экспериментальной разрушающей нагрузки (т. е. фактическая несущая способность) отдельно на болтовые и сварные образцы каждой из групп SR и SM меньше экспериментальных разрушающих нагрузок на соответствующие комбинированные образцы: на 55,5 и 34,8 % для образцов группы SR; на 49,3 и 17,6 % – для группы SM. С учетом этого, эффективность работы (усиления) комбинированного болтосварного соединения по испытанным образцам группы SR можно оценить величиной 91,1 %, а группы SM 70,3 %. Эффективности 100 % соответствует

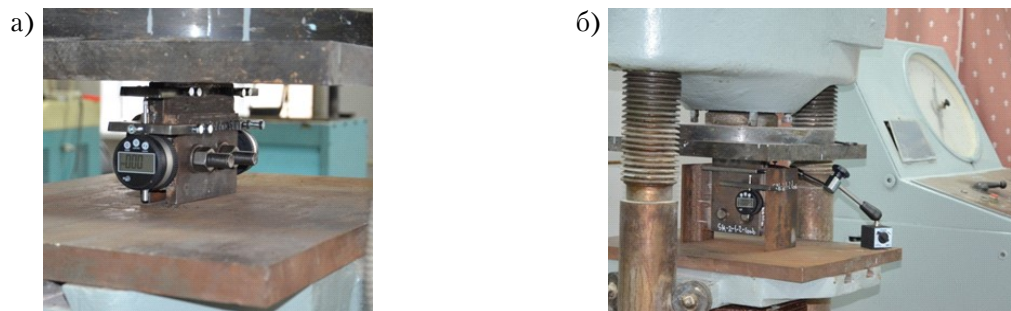


Рисунок 3 – Общий вид образцов в ходе испытаний: а) образец группы SR; б) образец группы SM.

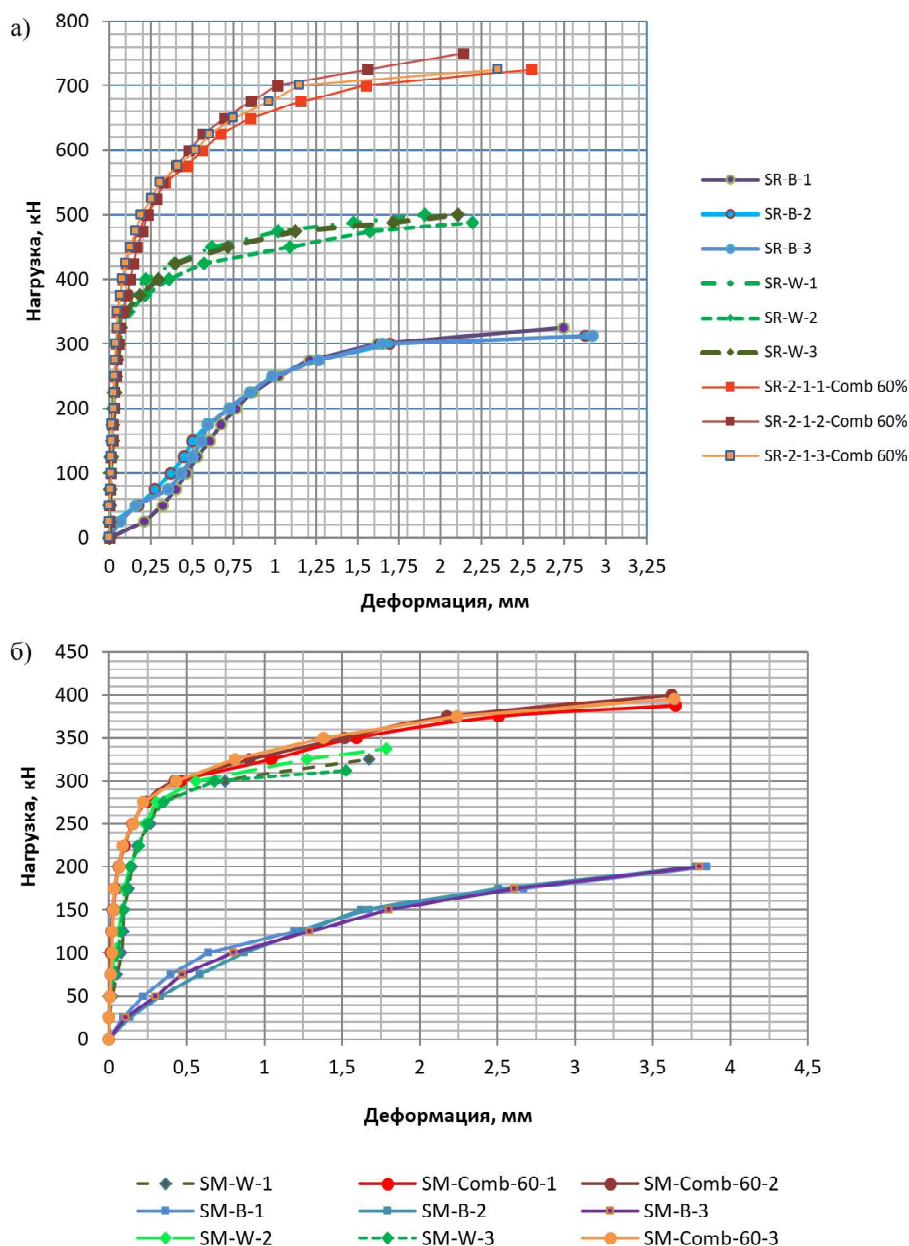


Рисунок 4 – Диаграммы работы образцов под нагрузкой: а) образцы группы SR; б) образцы группы SM.

значение несущей способности комбинированного соединения, равное сумме экспериментальных значений несущей способности отдельно болтового и сварного соединений. Меньшая эффективность усиления образцов группы SM объясняется большей деформативностью образцов болтового соединения марки SM-B, по сравнению с деформативностью образцов марки SR-B (графики рис. 4 и данные таблицы).

В таблице также приведена количественная оценка эффективности комбинированного со-

единения и эффективности работы болтов в комбинированном соединении после усиления.

Анализ данных таблицы показывает, что на стадии нагружения образцов комбинированного болтосварного соединения обеих групп, соответствующей максимальной разрушающей экспериментальной нагрузке, доля усилия, приходящаяся на болтовые связи, превышала усилия на эти связи, отвечающие нагрузке предварительного нагружения болтовых образцов перед их усилением.

Таблица. Предельные нагрузки и сдвиг деталей образцов

Тип конструктивного исполнения опытного образца	Количество, шт.	Расчетная предельная нагрузка на образец, кН		Экспериментальная разрушающая нагрузка на образец, кН	Деформация взаимного сдвига деталей образцов, мм	Эффективность работы комбинированного соединения, %	Эффективность работы болтов в комбинированном соединении, %	Реализуемое предельное состояние болтовых связей
		по СП 16.13330. 2017	с учетом фактической прочности					
SR-B	3	152,0	187,7	331,0	2,75	–	–	срез
SR-W	3	158,0	192,3	485,0	1,90	–	–	–
SR-Comb60	3	310,0	380,0	744,2	2,55	91,1	78,3	срез
SM-B	3	89,2	143,1	200,0	3,70	–	–	смятие
SM-W	3	103,6	125,2	325,0	1,84	–	–	–
SM-Comb60	3	192,8	268,3	394,2	3,56	70,3	34,5	смятие

Этот факт подтверждает включение болтовых связей в совместную работу со сварными швами на нагрузку, приложенную к образцам после их усиления. Отметим, что эта доля усилий в болтовых связях была меньше их экспериментальной разрушающей нагрузки. Эффективность работы болтов в комбинированном соединении (для испытанных образцов) можно оценить величиной 78,3 % для группы SR и 34,5 % – для группы SM.

Эффект совместной работы разнотипных связей в виде болтов обычной прочности и угловых фланговых сварных швов в комбинированном болтосварном соединении подтверждается также меньшей деформативностью комбинированных соединений по сравнению со сварными (графики рис. 4 и данные табл.).

Комбинированные образцы марок как SR-Comb60, так и SM-Comb60 имеют не только большую, чем образцы SR-W и SM-W величину разрушающей нагрузки, но и исчерпывали несущую способность при существенно большей деформации сдвига деталей соединения (графики рис. 4). Это можно интерпретировать как свидетельство более «вязкого» характера работы и разрушения комбинированных болтосварных образцов и как свидетельство увеличения

«живучести» соединения, в чем, очевидно, проявляется влияние болтовых связей.

Выводы

1. Испытания показали, что опытные образцы болтовых, сварных и комбинированных болтосварных (после усиления) соединений обеспечили, на стадии исчерпания несущей способности (разрушения) образцов, получение предусмотренных программой испытаний предельных состояний и достижение цели исследования.
2. Экспериментально обоснована работоспособность комбинированных болтосварных соединений, получена количественная оценка их несущей способности.
3. Для испытанных образцов марки SR-Comb60 эффективность усиления болтовых соединений посредством сварных швов, оказалась выше, чем для образцов марки SM-Comb60: 91,1 и 70,3 %, соответственно.
4. Эффективность совместной работы болтов в комбинированном болтосварном (после усиления) соединении в образцах группы SR-Comb60 выше, чем в образцах группы SM-Comb60: 78,3 и 34,5 %, соответственно.

Список источников

1. Долговечность стальных конструкций в условиях реконструкции / Е. В. Горохов [и др.]. М.: Стройиздат, 1994. 482 с.
2. Солодов Н. В., Водяхин Н. В., Кочерженко В. В. Напряженно-деформированное состояние при реализации смятия и сдвига в болтосварном соединении // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2022. Т. 7, N 12. С. 18-27. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49950528> (дата обращения: 12.02.2025). ISSN 2071-7318. DOI 10.34031/2071-7318-2022-7-12-18-27. EDN FDIPMX.
3. Рюмин В. В., Солодовник Ю. Ю., Евдокимов А. А. Анализ работы комбинированного соединения на высокопрочных болтах и сварке // Коммунальное хозяйство городов. 2024. Т. 1, N 182. С. 105-111.
4. Solodov N. V., Vodyakhin N. V. Experimental Study and Computer Simulation of the Work of Combined Bolt and Weld-in Connections // Digital Technologies in Construction Engineering. 2022. Vol. 173. P. 321-327. DOI 10.1007/978-3-030-81289-8_41.
5. Solodov N. V., Vodyakhin N. V. Combined Joints of Building Metal Structures: Conditions and Factors of their Operation and Deformability // Russian Journal of Building Construction and Architecture. 2024. Vol. 1, issue 61. P. 23-33. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=60036331> (дата обращения: 12.02.2025). ISSN 2542-0526. DOI 10.36622/VSTU.2024.61.1.002. EDN BPIBQW.
6. Kulak G. L. High strength bolting for Canadian engineers: educational and methodical manual. Edmonton: Canadian Institute of Steel Construction, 2005. 56 p.
7. Jarosch K. H., Bowman M. D. Behavior of tension butt joints using bolts and welds in combination. West Lafayette: School of Civil Engineering, 1985. 80 p.
8. Manuel T. J., Kulak G. L. Strength of Joints that Combine Bolts and Welds // Journal of Structural Engineering. 2000. Vol. 126, issue 3. P. 279-287. DOI 10.1061/(asce)0733-9445(2000)126:3(279).
9. Kulak G. L., Grondin G. Y. Strength of Joints that Combine Bolts and Welds // Engineering Journal. 2003. Vol. 40. P. 89-98.
10. Guo Y. M., He J. X., Liu G. L. Research on Connecting Behaviour and Processor Weld-Bolt Hybrid Joint // Steel Construction. 1996. Vol. 3, issue 33. P. 50-55.
11. Finite Element Analysis of the Combined Connection with Bolts and Welds / Y. J. Shi [et al.]. // Applied Mechanics and Materials. 2011. Vol. 94-96. P. 316-321. URL: <https://www.scientific.net/AMM.94-96.316> (дата обращения: 12.02.2025). DOI 10.4028/www.scientific.net/AMM.94-96.316.
12. Proposed Design Method of Combined Connections with Bolts and Longitudinal Welds for Steel Structures / Y. J. Shi [et al.]. // Applied Mechanics and Materials. 2013. Vol. 94-96. P. 923-928. DOI 10.4028/www.scientific.net/AMM.94-96.923.
13. The Discuss of the Finite Element Simulation Method of the Combined Connection with Bolts and

References

1. Gorokhov, E.V., Brudka, Ya., Lubin'ski, M., Zyulko, E. and Korolev, V.P. (1994), *Dolgovechnost' stal'nykh konstrukcij v usloviyah rekonstrukcii* [Durability of steel structures under reconstruction]: Stroizdat, Moscow, Russia.
2. Solodov, N.V., Vodyakhin, N.V. and Kocherzhenko, V.V. (2022), "Stress-Strain State During the Realization of Crumpling and Shear in a Bolted Joint", *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov*, vol. 7, no. 12, pp. 18-27, available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49950528> (Accessed 12 February 2025). ISSN 2071-7318. DOI 10.34031/2071-7318-2022-7-12-18-27. EDN FDIPMX.
3. Riumin, V.V., Solodovnyk, J.Y. and Evdokimov, A.A. (2024), "Analysis of the Performance of a Joint that Combines High-Strength Bolts and Welding", *Municipal Services of Cities*, vol. 1, no. 182, pp. 105-111.
4. Solodov, N.V. and Vodyakhin, N.V. (2022), "Experimental Study and Computer Simulation of the Work of Combined Bolt and Weld-In Connections", *Digital Technologies in Construction Engineering*, vol. 173, pp. 321-327. DOI 10.1007/978-3-030-81289-8_41.
5. Solodov, N. and Vodyakhin, N. (2024), "Combined Joints of Building Metal Structures: Conditions and Factors of their Operation and Deformability", *Russian Journal of Building Construction and Architecture*, vol. 1, issue 61, pp. 23-33, available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=60036331> (Accessed 12 February 2025). ISSN 2542-0526. DOI 10.36622/VSTU.2024.61.1.002. EDN BPIBQW.
6. Kulak, G.L. (2005), *High strength bolting for Canadian Engineers*, Canadian Institute of Steel Construction, Edmonton, Canada.
7. Jarosch, K.H. and Bowman, M.D. (1985), *Behavior of Tension butt joints using bolts and welds in combination*, School of Civil Engineering, West Lafayette, USA.
8. Manuel, T.J. and Kulak, G.L. (1998), "Strength of Joints that Combine Bolts and Welds", *Journal of Structural Engineering*, vol. 126, issue 3, pp. 279-287. DOI 10.1061/(asce)0733-9445(2000)126:3(279).
9. Kulak, G. and Grondin, G. (2003), "Strength of Joints that Combine Bolts and Welds", *Engineering Journal*, vol. 40, pp. 89-98.
10. Guo, Y.M., He, J.X. and Liu, G. L. (1996), "Research on Connecting Behaviour and Processor Weld-Bolt Hybrid Joint", *Steel Construction*, vol. 3, issue 33, pp. 50-55.
11. Shi, Y.J., Wang, L., Wang, Y.Q., Ma, J.S. and Bai, R.S. (2011), "Finite Element Analysis of the Combined Connection with Bolts and Welds", *Applied Mechanics and Materials*, vol. 94-96, pp. 316-321, available at: <https://www.scientific.net/AMM.94-96.316> (Accessed 12 February 2025). DOI 10.4028/www.scientific.net/AMM.94-96.316.
12. Shi, Y.J., Wang, L., Wang, Y.Q., Ma, J.S. and Bai, R.S. (2013), "Proposed Design Method of Combined Connections with Bolts and Longitudinal Welds for Steel Structures", *Applied Mechanics and Materials*,

- Weldsand Welds / M. Jiansuo [et al.]. // Fifth International Conference on Intelligent Systems Design and Engineering Applications (ISDEA 2014): (Hunan, China, 15-16 June 2014). China, 2014. P. 1036-1038. DOI 10.1109/ISDEA.2014.228.
14. Numerical Modeling and Mechanical Analysis of Combined Connection with Bolts and Welds / M. S. Liu [et al.]. // *Strength of Materials*. 2016. Vol. 48, issue 6. P. 862-869. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50804027> (дата обращения: 12.02.2025). ISSN 0039-2316. DOI 10.1007/s11223-017-9832-1. EDN JYYWRZ.
 15. Lan T., Ju J. S., Liu M. S. Analysis of Ultimate Load-Carrying Capacity of Combined Connection with Bolts and Welds // *Mechanika*. 2019. Vol. 25, issue 6. P. 426-433. DOI 10.5755/j01.mech.25.6.24791.
 16. Chang H.-Y., Ching Yu. Y. A Study on Behavior of Steel Joints that Combine High-Strength Bolts and Fillet Welds // *Steel and Composite Structures*. 2019. Vol. 31, issue 4. P. 361-372. DOI 10.12989/scs.2019.31.4.361.
 17. Kim D.-K., Lee C.-H. Analytical Modeling of Load-Deformation Relationship and Design Strength of Combined Welded-Bolted Lap Joints // *Journal of Korean Society of Steel Construction*. 2018. Vol. 30, issue 5. P. 277-288. URL: https://www.researchgate.net/publication/3286-39406_Analytical_Modeling_of_Load-Deformation_Relationship_and_Design_Strength_of_Combined_Welded-Bolted_Lap_Joints (дата обращения: 12.02.2025). DOI 10.7781/kjoss.2018.30.5.277.
 - vol. 94-96, pp. 923-928. DOI 10.4028/www.scientific.net/AMM.94-96.923.
 13. Jiansuo, M., Runshan, B., Minfeng, L., Yuanqing, W., Lei, W. and Yongjiu, S. (2014), "The Discuss of the Finite Element Simulation Method of the Combined Connection with Bolts and Welds", *Fifth International Conference on Intelligent Systems Design and Engineering Applications (ISDEA 2014)*, Hunan, China, 15-16 June 2014, pp. 1036-1038. DOI 10.1109/ISDEA.2014.228.
 14. Liu, M.S., Li, C.A., Huang, J.R. and Ju, J.S. (2016), "Numerical Modeling and Mechanical Analysis of Combined Connection with Bolts and Welds", *Strength of Materials*, vol. 48, issue 6, pp. 862-869, available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50804027> (Accessed 12 February 2025). DOI 10.1007/s11223-017-9832-1. EDN JYYWRZ.
 15. Lan, T., Ju, J.S. and Liu, M.S. (2019), "Analysis of Ultimate Load-Carrying Capacity of Combined Connection with Bolts and Welds", *Mechanika*, vol. 25, issue 6, pp. 426-433. DOI 10.5755/j01.mech.-25.6.24791.
 16. Chang H.-Y. and Ching, Yu. Y. (2019), "A Study on Behavior of Steel Joints that Combine High-Strength Bolts and Fillet Welds", *Steel and Composite Structures*, vol. 31, issue 4, pp. 361-372. DOI 10.12989/scs.2019.31.4.361.
 17. Kim, D.-K. and Lee, C.-H. (2018), "Analytical Modeling of Load-Deformation Relationship and Design Strength of Combined Welded-Bolted Lap Joints" *Journal of Korean Society of Steel Construction*, vol. 30, issue 5, pp. 277-288, available at: https://www.researchgate.net/publication/3286-39406_Analytical_Modeling_of_Load-Deformation_Relationship_and_Design_Strength_of_Combined_Welded-Bolted_Lap_Joints (Accessed 12 February 2025). DOI 10.7781/kjoss.2018.30.5.277.

Информация об авторах

Солодов Николай Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры строительства и городского хозяйства Белгородского государственного технологического университета имени В. Г. Шухова, Белгород, Россия. Научные интересы: обследование и усиление металлических конструкций зданий и сооружений, оценка их остаточного ресурса и резервов несущей способности.

Водяхин Николай Вячеславович – ассистент кафедры строительства и городского хозяйства Белгородского государственного технологического университета имени В. Г. Шухова, Белгород, Россия. Научные интересы: исследование деформативности и несущей способности комбинированных соединений металлических конструкций, численное моделирование металлических конструкций.

Information about the authors

Solodov Nikolai V. – Ph. D.(Eng.), Associate Professor of the Department of Construction and Municipal Facilities, Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov. Scientific interests: inspection and reinforcement of metal structures of buildings and structures, assessment of their residual life and reserve load-bearing capacity.

Vodyakhin Nikolai V. – Assistant of the Department of Construction and Municipal Facilities, Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov. Scientific interests: study of deformability and bearing capacity of combined joints of metal structures, numerical modeling of metal structures.

Вклад авторов:

Солодов Н. В. – научное руководство; концепция исследования; развитие методологии; итоговые выводы.

Водяхин Н. В. – проведение экспериментального исследования; обработка и анализ результатов исследования; подготовка исходного текста; подготовка инфографиков; итоговые выводы.

Contribution of the authors:

Solodov N. V. – scientific management; research concept; methodology development; final conclusions.

Vodyakhin N. V. – conducting experimental research; processing and analyzing research results; preparing source text; preparing infographics; final conclusions.

Статья поступила в редакцию 04.03.2025; одобрена после рецензирования 21.03.2025; принята к публикации 28.03.2025.

The article was submitted 04.03.2025; approved after reviewing 21.03.2025; accepted for publication 28.03.2025.