

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-12-18-27

**Солодов Н.В., \*Водяхин Н.В., Кочерженко В.В.**

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

\*E-mail: partietz5000@bk.ru

## НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ СМЯТИЯ И СДВИГА В БОЛТОСВАРНОМ СОЕДИНЕНИИ

**Аннотация.** В статье изложены результаты исследований, которые продолжают ранее выполненные авторами работы по комбинированным болтосварным соединениям для строительных металлоконструкций. Приводятся данные о параметрах напряженно-деформированного состояния конечноэлементных моделей физических образцов болтовых, сварных и болтосварных соединений. Эти образцы к настоящему времени изготовлены и подготавливаются к проведению испытаний. Особенность конструкции физических образцов и численных моделей заключается в том, что в них созданы условия для реализации предельного состояния, обусловленного смятием болтом кромки отверстия в более тонкой детали и ее последующего разрыва (выкола). В последующем данные о параметрах НДС численных моделей и физических образцов предполагается сравнить. При компьютерном моделировании болтосварных образцов принимается, что сварные швы выполнены (наложены) после того, как конечноэлементная модель болтового соединения была нагружена на определенную часть его несущей способности по критерию смятия. Такие условия соответствуют работе болтового соединения, усиленного при частичной разгрузке сварными швами. Тем самым предполагается, что в болтовом соединении, перед его усилением сварными швами, в значительной мере деформации будут проработаны. Это, по гипотезе авторов, создает благоприятные условия для совместной работы болтового соединения и сварных швов при его нагружении после усиления. Полученные данные численного моделирования в целом подтверждают приведенную выше гипотезу о возможной совместной работе сварных швов и болтового соединения, в котором реализуется предельное состояние по смятию и которое было усилено при частичной разгрузке сварными швами.

**Ключевые слова:** комбинированное болтосварное соединение, конечноэлементное моделирование, напряженно-деформированное состояние, деформативность, несущая способность, болтовые и сварные соединения.

**Введение.** Одно из направлений совершенствования соединений в стальных конструкциях (и не только) заключается в разработке и исследовании комбинированных соединений. Их особенностью является сочетание в одном конструктивном решении узла сопряжения или стыка более одного вида связей. Традиционные, однородные по виду используемых в качестве несущих связей, болтовые и сварные соединения хорошо изучены и массово применяются. Однако имеются также достаточно обширные исследования по соединениям [1–8], в которых в том или ином виде реализована идея комбинации, сочетания двух различных связей.

К числу таких связей, наряду с обычными и высокопрочными болтами и сварными швами, можно отнести заклепки, клеевые швы, контактная точечная или шовная сварка и так далее. В настоящее время исследованы и были внедрены в реальное производство целый ряд конструктивных решений комбинированных соединений, в том числе – следующие.

1. Болтозаклепочные – представляют собой комбинацию в одном соединении заклепок и преднапряженных высокопрочных болтов. Последние (болты) устанавливают взамен ослаблен-

ных в процессе эксплуатации заклепок. Исследования таких соединений были выполнены, в частности, Арановичем В.М., Хусидом Р.Г. [9].

2. Болтоклеевые – в таких соединениях контактные поверхности объединены не только посредством преднапряженных высокопрочных болтов (фрикционный принцип работы), но и клеевыми швами. Известна разновидность болтоклеевых соединений, в которых в состав клея добавляется наполнитель в виде корундового порошка, что приводит к увеличению сопротивления клевого шва сдвигу. Исследования в этой области были выполнены Ицковичем Г.М., Чесноковым А.С., Княжевым А.Ф., Стрелецким Н.Н. [10].

3. Болтосварные – представляют собой комбинацию в одном соединении сварных швов и преднапряженных высокопрочных болтов. Такое соединение использовалось в конструкциях монтажных стыков пролетных строений мостов. Сварными швами соединялись пояса, а высокопрочными болтами, через накладки, стенка балки. Исследованиями таких стыков занимались, например, Большаков К.П., Шаферман И.М., Олеков В.М. [11].

Болтосварные комбинированные соединения с угловыми сварными швами и высокопрочными преднапряженными болтами в последние 15–20 лет активно исследуются в ряде стран (США, Канада, Китай, Южная Корея). Результаты некоторых исследований содержатся в работах [12–15].

4. Болтовые фрикционные соединения с внедряемыми проволочными элементами. В таких соединениях, при их устройстве, между поверхностями трения располагают специальные элементы из высокопрочной проволоки. Под воздействием усилия предварительного натяжения высокопрочных болтов проволока вдавливается в металл (сталь, алюминий) соединяемых деталей и при воздействии сдвигающего усилия такой элемент, выполняя роль шпонки, обеспечивает увеличение сопротивления сдвигу. Исследование описанного выше соединения было выполнено Хисимовым Р.И. и Хуснулловым Р.Г. [16].

5. Болтосрезные соединения на высокопрочных преднапряженных болтах – в основу комбинации в таком соединении положено сочетание двух механизмов его сопротивления действию усилия сдвига: на первом этапе – сопротивление за счет сил трения по контактным поверхностям; на втором этапе, после преодоления приложенным внешним усилием сил трения и сдвига соединения, добавляется сопротивление сдвигу за счет упора болтов в кромки отверстий. Работу таких соединений в нашей стране исследовали Вейнблат Б.М., Леонов В.П., Грудев И.Д., Амалин А.А., Зубков В.А., Мурадян А.А. [17–20].

6. Клеесварные соединения – в такой комбинации сопротивление сдвигу стыков тонколистовых деталей формируется за счет клеевой прослойки и сварных соединений в виде точечной или шовной контактной сварки. При этом площадь склеиваемой поверхности существенно превышает площадь точечной или шовной контактной сварки. Исследования клеесварных соединений выполнялись, например, Шавыриным В.Н., Рязанцевым В.И. и др.

7. Клееклепаные соединения – в таком соединении роль дискретных связей, при клеевом шве по всей прилегающей поверхности стыкуемых деталей, выполняют заклепки. Исследования клееклепанных соединений выполняли Заривняк И.С., Барушковский А.Л., Максименко В.Н., Матвиенко В.А., Тягний А.В. [21].

8. Клеенагельные и клеегвоздевые соединения образуют комбинацией болтовых нагелей или гвоздей с клеевыми швами в узлах строительных дощатых конструкций. Прочность и деформативность таких узлов исследовал Еропов Л.А. [22].

Приведенные выше варианты комбинированных соединений относятся к числу несущих, то есть обеспечивают выполнение элементами с такими соединениями тех или иных несущих функций. При этом следует отметить, что по области применения они относятся не только к строительным конструкциям, но и к машиностроению, автомобилестроению, авиационной промышленности и ряду других областей.

**Исследуемая проблема и рабочая гипотеза.** Постановка проблемы. Обосновать и исследовать возможность совместной работы первоначально существенно разнодеформативных связей (болты обычной прочности и фланговые угловые сварные швы) в комбинированном болтосварном соединении, воспринимающем усиление сдвига и образованном путем усиления болтового соединения, после его частичной разгрузки, сварными швами.

**Рабочая гипотеза.** При работе болтового соединения в период, предшествующий его усилению, значительная часть упруго-пластических деформаций болтовых связей прорабатывается. Если после этого выполнить усиление болтового соединения (в условиях частичной разгрузки) путем наложения угловых фланговых сварных швов, то при последующем нагружении образованного комбинированного болтосварного соединения возможна достаточно эффективная совместная работа болтовых связей и сварных швов на возрастающую после усиления нагрузку. При этом несущая способность комбинированного болтосварного соединения ожидаемо должна быть выше несущих способностей отдельно взятых аналогичных болтового и сварного соединений. Предполагается, что указанный эффект достигается как при реализации в болтовых связях работы на смятие контактной кромки отверстия болтов, так и при работе болтов на срез.

Для исследования поставленной проблемы и подтверждения выдвинутой гипотезы исследования использованы следующие методы и средства:

- аналитический обзор результатов ранее выполненных исследований комбинированных соединений;

- компьютерное моделирование работы под нагрузкой образцов болтового, сварного и комбинированного соединений в вычислительном комплексе ANSYS при реализации в болтовых связях работы на смятие;

- сравнительный анализ результатов численного (компьютерного) моделирования и обоснование выдвинутой гипотезы.

**Основная часть.** Отечественной нормативной методикой расчета болтовых соединений на

болтах обычной прочности, воспринимающих усилие сдвига, несущую способность предписывается принимать по меньшей из двух значений расчетной предельной нагрузки:

- по критерию среза болтов в соединении;
- по критерию смятия металла контактной кромки отверстия болта (фактически реализуемого в форме выкола детали со стороны ее нагруженной кромки).

Ранее [23-25] были изложены результаты исследований комбинированных болтосварных со-

единений, в которых работа болтовых связей лимитируется по критерию среза болтов и конструктивно гарантированным ненаступлением предельного состояния по критерию смятия [26-28]. Образцы для численного моделирования в настоящей статье, напротив, конструктивно исключают возможный срез болтов. Для реализации процесса смятия (выкола) в конструкции образца используется тонкая, по сравнению с двумя существенно более толстыми пластинами, стенка прокатного двутавра. Общий вид образцов для численного моделирования показан на рисунке 1.

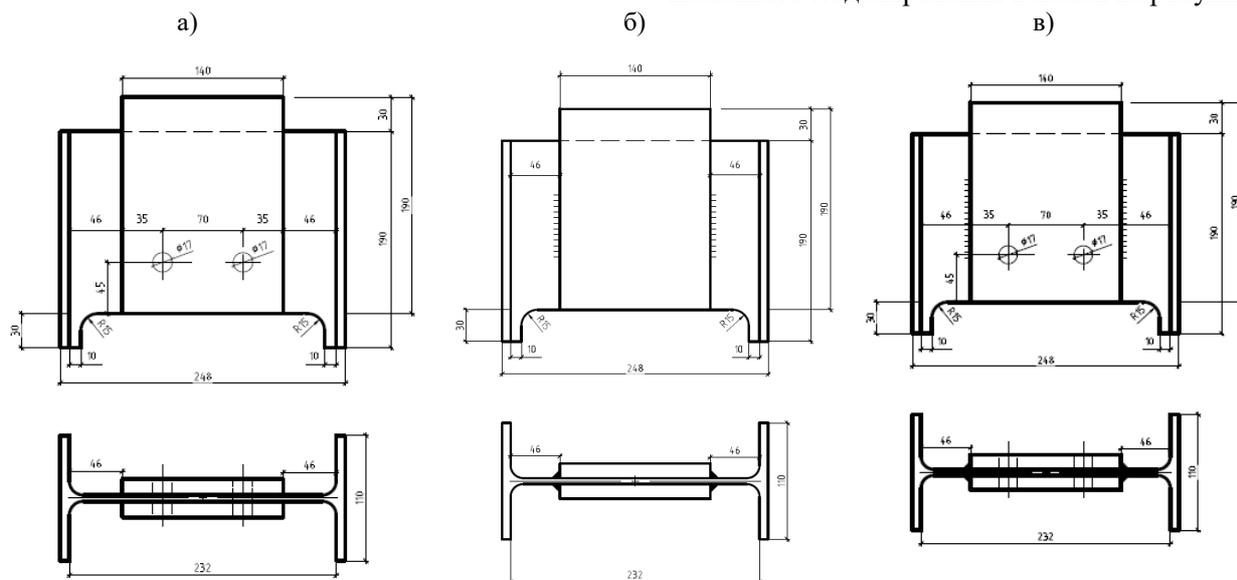


Рис.1. Конструктивное решение исследуемых образцов:  
а) конструкция образца группы SM345B; б) конструкция образца группы SM345W;  
в) конструкция образца группы SM345Comb

Образцы представляют собой нахлесточное двухсрезное соединение класса точности. В стенке двутавра и двух пластин: пластины имеют размеры 190×140 мм, толщиной 12 мм, двутавр 25Б1 с толщиной стенки 5 мм. Образцы запроектированы из стали С345. В качестве связей применены болты класса прочности 5.8 диаметром 16 мм, диаметр отверстий принят 17 мм, сварные швы запроектированы длиной 60 мм с катетом сварного шва 6 мм. Способ сварки – ручная электродуговая, в нижнем положении, электроды тип Э-50.

Моделируемые образцы разделены на три группы. Первая группа образцов имеет маркировку SM345B и болтовые связи. Образцы второй группы, с маркировкой SM345W, имеют связи в виде четырех угловых фланговых сварных швов. В образцах третьей группы принята маркировка SM345Comb, а сопротивление соединения сдвигу обеспечивается комбинацией болтовых связей и сварных швов, идентичных тем, что использованы в образцах первой и второй групп.

Так как комбинированное соединение образовано путем усиления болтового в условиях его частичной разгрузки, то для учета истории нагружения и моделирования комбинированного соединения принято следующее. Болтовое соединение предварительно нагружается до необходимого уровня, который соответствует уровню разгрузки при усилении, с «выключенными» из работы сварными швами. Затем, при помощи специальной процедуры программного комплекса ANSYS, которая называется «рождение и смерть элемента», сварные швы включаются в работу и нагружение численных моделей продолжается.

При численном моделировании варьировали уровень предварительного нагружения, принимая его равным 40,0, 80,0, и 100,0 кН, что соответствует 39,2 %, 78,4 %, 98 % от расчетной предельной нагрузки для болтового соединения по критерию смятия в соответствии с методикой расчета, приведенной в СП 16.13330.2017 «СНиП II-23-81\* Стальные конструкции».

Разбиение образцов на конечные элементы производили посредством программного комплекса ANSYS. Расчеты выполнены с учетом геометрической и физической нелинейности.

**Результаты исследований.** На рисунке 2 представлен общий вид численных моделей образцов SM345B и SM345W.

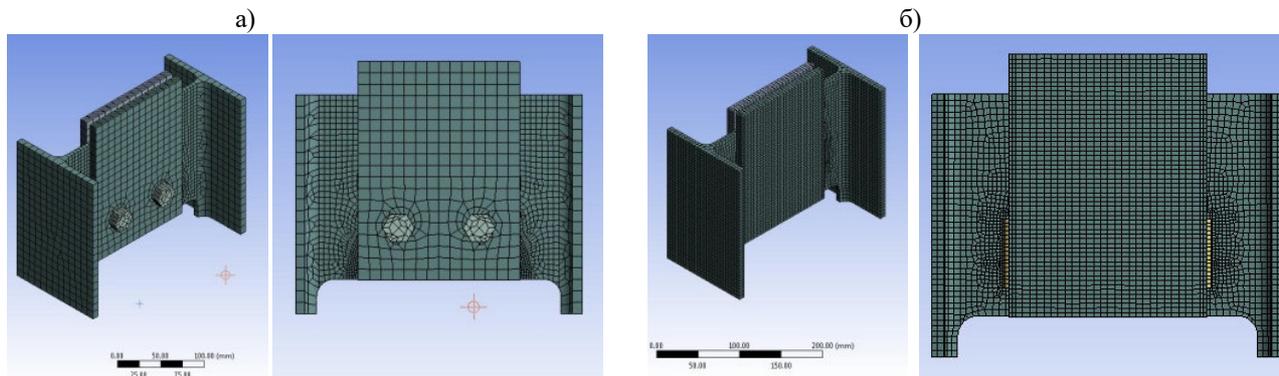


Рис.2. Общий вид конечноэлементных моделей исследуемых образцов:  
а) образец группы SM345B; б) образец группы SM345W

В ходе численного моделирования величина несущей способности образцов группы SM345B составила 160,0 кН, перемещение нижних торцов крайних пластин по направлению приложенной нагрузки составило 1,8 мм. При численном моделировании за несущую способность образца принималась величина достигнутой нагрузки, при которой начиналось расхождение итерационного

процесса. Графическое представление НДС численной модели болтового соединения (изополя напряжений в стенке двутавра  $\sigma_z$ , перемещение крайних пластин по направлению приложенной нагрузки) на этапе нагружения, соответствующего предельной нагрузке, приведено на рисунке 3.

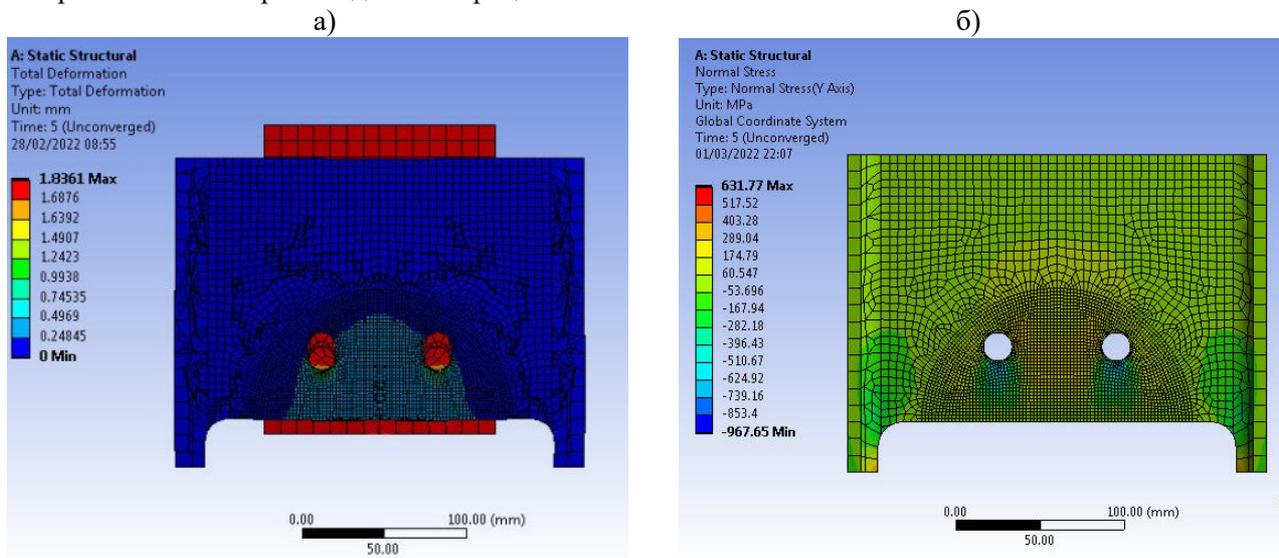


Рис.3. Графическое представление НДС образца группы SM345B по результатам численного моделирования:  
а) перемещение крайних пластин по направлению приложенной нагрузки;  
б) изополя напряжений  $\sigma_z$  в стенке двутавра

Несущая способность образцов группы SM345W по результатам численного моделирования составила 260 кН. На рисунке 4 представлено изображение НДС численной модели сварного соединения (изополя напряжений в стенке двутавра  $\sigma_z$ , перемещение крайних пластин по направлению приложенной нагрузки) на этапе нагружения, соответствующего предельной нагрузке.

На рисунке 5 представлен общий вид численной модели образца третьей группы - SM345Comb.

Несущая способность образцов комбинированного соединения в ходе численного моделирования составила 350 кН. НДС численной модели комбинированного болтосварного соединения (изополя напряжений в стенке двутавра  $\sigma_z$ , перемещение крайних пластин по направлению

приложенной нагрузки) в графическом виде при предельной нагрузке отображено на рисунке 6.

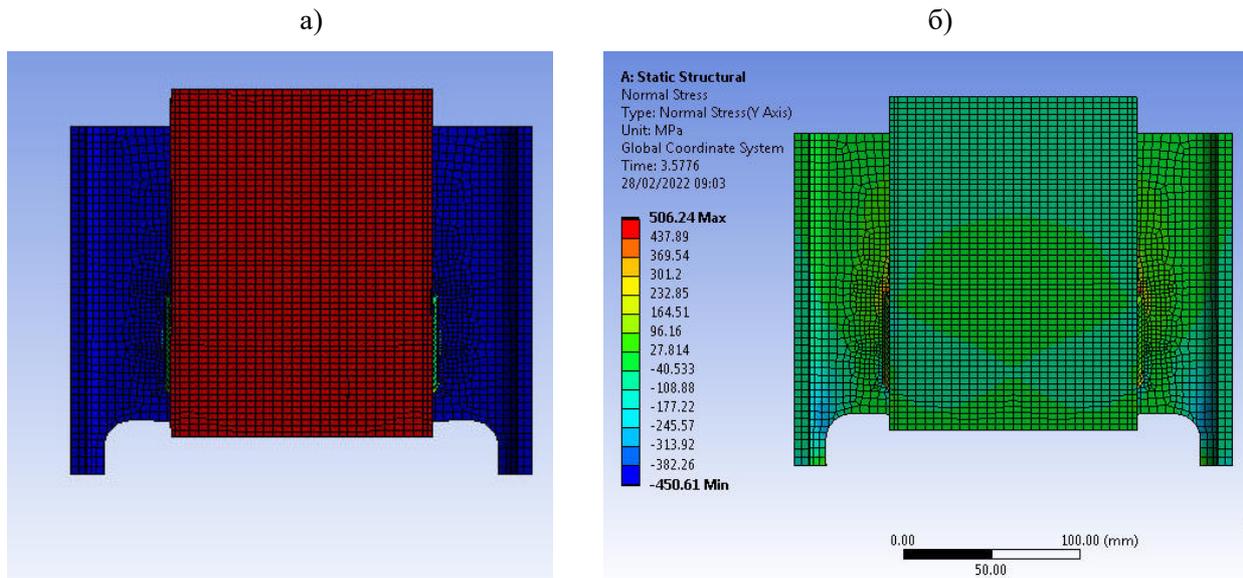


Рис. 4. Графическое представление НДС образца группы SM345W по результатам численного моделирования:  
 а) перемещение крайних пластин по направлению приложенной нагрузки;  
 б) изополя напряжений  $\sigma_z$  в стенке двутавра

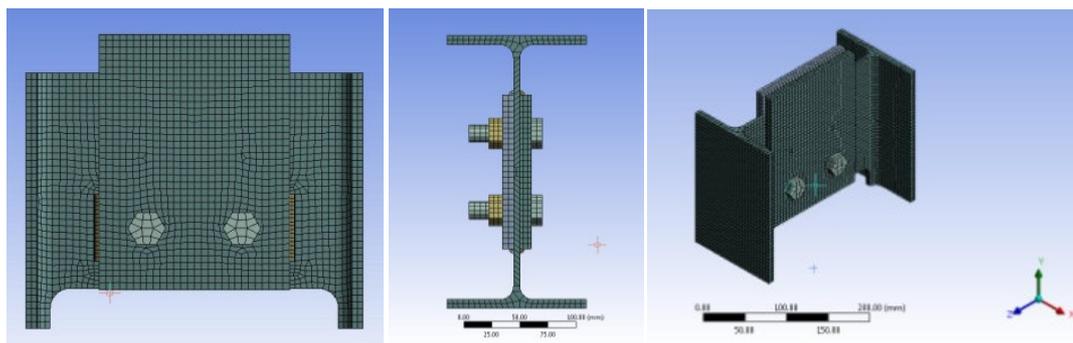


Рис. 5. Общий вид численной модели образцов группы SM345Comb

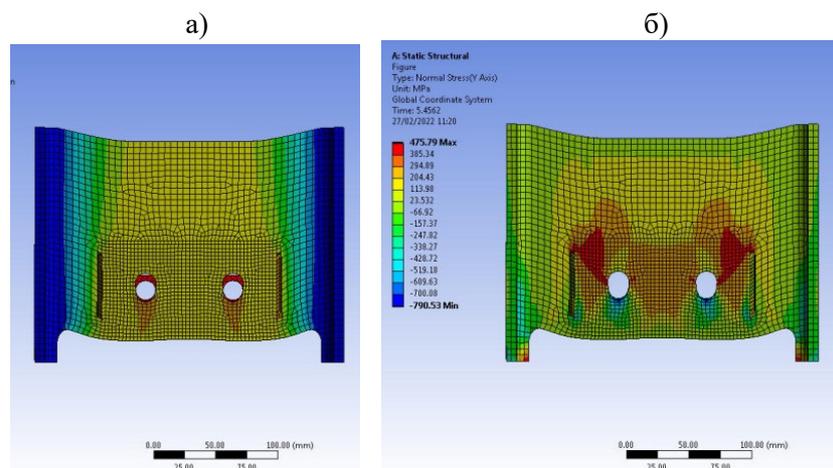


Рис. 6. Графическое представление НДС образца группы SM345B по результатам численного моделирования:  
 а) перемещение крайних пластин по направлению приложенной нагрузки;  
 б) изополя напряжений  $\sigma_z$  в стенке двутавра

На рисунке 7 приведены диаграммы деформирования исследуемых численных моделей комбинированных болтосварных образцов.

При численном моделировании было исключено «отрицательное» положение тела болта относительно отверстия деталей, что было подробно исследовано в работах зарубежных исследователей [29, 30]. Под «отрицательным» положением подразумевается случай, когда между телом болта и кромкой отверстия по направле-

нию приложения нагрузки имеется зазор. В исследуемых численных моделях в момент приложения нагрузки тело болта имело непосредственный контакт с каждой из кромок отверстий деталей по направлению передачи и восприятия приложенной нагрузки.

Приведенные диаграммы отчетливо иллюстрируют, что в комбинированных болтосварных соединениях наблюдается совместная работа разнореформативных связей.

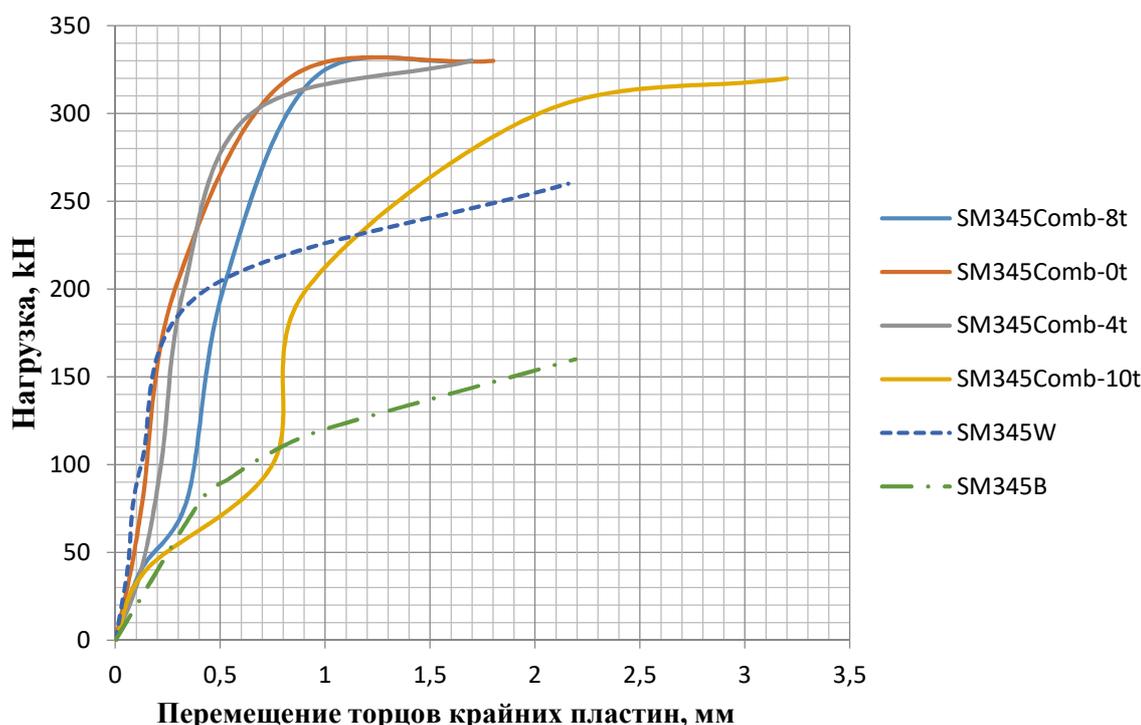


Рис. 7. Диаграммы работы под нагрузкой образцов численного моделирования

**Заключение.** Исследование конечноэлементной модели болтосварного соединения, образованного как болтовое соединение, усиленное при частичной разгрузке сварными швами, показало следующее:

- предельная нагрузка на болтосварное соединение больше предельных нагрузок отдельно болтового и сварного соединения, параметры которых аналогичны тем, что приняты в болтосварном соединении: на 118,2 % и 34,6 % соответственно;

- деформативность конечноэлементной модели (сближение торцов) в направлении приложенного после усиления внешнего воздействия меньше деформативности модели болтового соединения и меньше деформативности сварного соединения: на 18,2 % и 14,2 % соответственно;

- предельная нагрузка на болтосварное соединение на 16,7 % меньше суммы предельных нагрузок отдельно для болтового и сварного соединений;

- эффективность совместной работы болтов и сварных швов в комбинированном болтосварном соединении, для исследованного варианта его конечноэлементной модели, можно оценить в 83,3 %, что обусловлено влиянием различной величины деформативных свойств связей в соединении в виде болтов и сварных швов;

- для обеспечения эффективной совместной работы болтов и сварных швов в комбинированном соединении частичную разгрузку болтового соединения, перед его усилением сварными швами, следует производить до уровня не менее 70 % от расчетной предельной нагрузки по критерию смятия.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шавырин В.Н., Рязанцев В.И., Клеесварные конструкции. М: Машиностроение, 1981. 168 с.
2. Федосейкин В.И. Экспериментально-теоретическое исследование болтоклеевых соединений в металлических конструкциях,

работающих на изгиб. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. М.: 1980. 147 с.

3. Шестов Н.М., Каргин Ю.Б. Особенности конструирования и производства клеесварных конструкций // Надежность и долговечность элементов машин. Саратов: Саратовский университет, 1975. С. 136–144.

4. Андреев Н.Х. Исследование прочности сварных и клеесварных точечных соединений. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. М.: 1962. 56 с.

5. Кашеев В.Н. Процессы в зоне фрикционного контакта металлов. М.: Машиностроение, 1978. 214 с.

6. Каленов В.В., Кармалин В.В., Павлов А.Б. О расчете несущей способности болтовых монтажных соединений на сдвиг по критерию деформативности // Сборник научных трудов. Исследование и совершенствование металлических конструкций промышленных зданий. 1984. С. 88–105.

7. Teh L.H., Uz M.E. Ultimate shear-out capacity of structural steel bolted connections // J. Struct. Eng. 2015. Vol.141, Issue 6. 04014152.

8. Zeynali Y., Jafari Samimi M., Mazroei A., AsgariMamani, Rohanimanesh M.S. Experimental and numerical study of frictional effects on block shear fracture of steel gusset plates with bolted connections // Thin-Walled Struct. 2017. No. 121. Pp 8–24. DOI: 10.1016/j.tws.2017.09.012.

9. Хусид Р.Г. Исследование работы комбинированных клепано-болтовых соединений: Автореф. дис. ... канд. техн. наук.-Л.:Изд. ЛИИЖТ, 1977. 23 с.

10. Чесноков А.С., Княжев А.Ф. Сдвигоустойчивые соединения на высокопрочных болтах. М: Стройиздат. 1974. 121 с.

11. Шаферман И.М. Разработка и исследование монтажных болтосварных стыков мостовых балок. Автореф. ... дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук : (05.04.05). М. 1983. 16 с.

12. Liu M.S., Li C.A., Huang J.R., Numerical modeling and mechanical analysis of combined connection with bolts and welds // Strength Mater. 2016. Vol. 48, Issue 6. Pp. 862–869. DOI: 10.1007/s11223-017-9832-1.

13. Kim D.-K., Lee C.-H. Experimental and analytical study of combined bolted-welded lap joints including high-strength steel // Journal of Constructional Steel Research 2020. No. 168. Pp. 81–96. DOI: 10.1016/j.jcsr.2020.105995

14. Kulak G.L., Grondin G.Y., Strength of joints that combine bolts and welds // Engineering Journal, American Institute of Steel Construction. 2003. Vol. 40. Pp. 89–98.

15. Manuel T.J., Kulak G.L., Strength of joints that combine bolts and welds // J. Struct. Eng. 2000. Vol. 126, Issue 3. Pp. 279–287.

16. Хуснуллов Р.Г. Работа соединений строительных металлоконструкций на высокопрочных болтах с внедряемыми проволочными элементами: Б.И. 1985. 170 с.

17. Амелин А.А. Работа фрикционно-срезных соединений в металлических конструкциях, эксплуатирующихся при низких температурах: Дис. канд. техн. наук: 05.23.01. Москва. 1994. 156 с.

18. Леонов В.П. Исследование фланцевых соединений на высокопрочных болтах в стальных конструкциях мостов. Дис. канд. техн. наук: 05.23.01. Москва, 1974. 193 с.

19. Вейнблат Б.М. Теоретические и конструктивно-технологические основы повышения эффективности соединений на высокопрочных болтах: Автореф. дис. ... докт. техн. Наук. М. 1981. 47 с.

20. Стрелецкий Н.Н., Вейнблат Б.М., Княжев А.Ф., Мурадян А.А. Соединения на несущих высокопрочных болтах в строительных металлоконструкциях // Промышленное строительство. 1979. №2. С. 27–29.

21. Тягний А.В. Определение напряженного состояния и параметров разрушения тонкостенных клееных и клееклепаных элементов авиационных конструкций с трещинами. Дис. канд. техн. наук: 05.07.03. Новосибирск. 2004. 123 с.

22. Еропов Л.А. Прочность и деформативность клеевых и клеесварных соединений в узлах дощатых строительных конструкций. Автореф. ... дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук : (05.23.01) / Центр. н.-и. и проект.-эксперим. ин-т комплекс. пробл. строит. конструкций и сооружений им. В.А. Кучеренко. М. 1988. 17 с.

23. Solodov N.V., Vodyakhin N.V. Evaluation of the load-bearing capacity of the combined bolt-welded joint // Lecture Notes in Civil Engineering, Springer, Cham. 2021. Vol 151. Pp. 174–180. DOI:10.1007/978-3-030-72910-3\_25.

24. Solodov N.V., Vodyakhin N.V. Experimental study and computer simulation of the work of combined bolt and weld-in connections // Lecture Notes in Civil Engineering, 2022. Vol 173. Pp. 321–327. DOI: 10.1007/978-3-030-81289-8\_41.

25. Солодов Н.В., Водяхин Н.В. Об особенностях применения, конструирования и расчета комбинированных болтосварных соединений // Наука и инновации в строительстве Сборник докладов IV Международной научно-практической конференции. Белгород. 2020. С. 80–85.

26. Солодов Н.В., Шевченко А.В., Алейников М.В. Решение контактной задачи методом теории пластичности // Вестник БГТУ им. В.Г.

Шухова, сб. науч. тр. Вып. 10. Белгород. 2005. С. 474–477.

27. Мурадян А.А., Стрелецкий Н.Н. К расчёту на смятие элементов стальных конструкций на обычных болтах // Промышленное строительство. 1980. №3. С. 24–26.

28. Солодов Н.В., Иванов И.В., Шарик А.В. Анализ предельной деформативности болтового соединения по условию смятия // Сб. науч. трудов международной научно-технической конфе-

ренции «Региональные энергосберегающие конструкции, здания и сооружения в строительстве и коммунальном хозяйстве». Ч.1. Белгород: Изд. БелГТАСМ. 2003. С. 242–247.

29. Kulak G.L., Grondin G.Y. Strength of joints that combine bolts and welds. // Eng. Second Quarter J. 2003. Vol. 40, Issue 2. Pp. 89–98.

30. Manuel T.J., Kulak G.L. Strength of joints that combine bolts and welds // Journal of Structural Engineering. 2000. No. 3. Pp. 279–287.

#### Информация об авторах

**Солодов Николай Владимирович**, кандидат технических наук, доцент кафедры строительства и городского хозяйства. E-mail: solodov\_niko\_v@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Водяхин Николай Вячеславович**, ассистент кафедры строительства и городского хозяйства. E-mail: partietz5000@bk.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Кочерженко Владимир Васильевич**, кандидат технических наук, профессор кафедры строительства и городского хозяйства. E-mail: kocherzhenko\_vv@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 06.06.2022 г.

© Солодов Н.В., Водяхин Н.В., Кочерженко В.В., 2022

**\*Solodov N.V., Vodyahin N.V., Kocherzhenko V.V.**  
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov  
\*E-mail: partietz5000@bk.ru

## STRESS-STRAIN STATE AS THE IMPLEMENTATION OF COLLAPSE AND SHEAR IN A BOLTED-WELDED JOINT

**Abstract.** *The results of the studies are presented which is an extension of the earlier authors' work of combined bolted-welded joints for building steel structures. Data on the parameters of the stress-strain state of finite-element models of physical specimens of bolted, welded and bolted-welded connections are given. These specimens are manufactured and are being prepared for testing. There are some special features of design of physical specimens and numerical models: the conditions which have been created for realization of limit state, conditioned by crushing of bolt edge of a hole in a thinner piece and its consequent breaking (poking out). Subsequently, it is supposed to compare data on the parameters of the numerical models and physical samples. Considering computer modeling of bolted-welded specimens, it is assumed that welds are made (imposed) after a finite-element model of the bolt connection has been loaded to a certain part of its bearing capacity according to the crushing criterion. Such conditions correspond to the operation of a bolted joint reinforced at partial unloading by welds. Thus, it is assumed that the bolted joint will be deformed largely before it is reinforced with welds. According to the authors' hypothesis, it will create favourable conditions for joint operation of the bolted joint and welds during its loading after reinforcement. The generally obtained numerical simulation data confirm the above hypothesis on the possible joint operation of welds and bolted joint, in which the limiting state in terms of buckling is realized and which is reinforced by partial unloading with welds.*

**Keywords:** *combined bolted-welded joint, finite-element modeling, stress-strain state, deformability, load-bearing capacity, bolted and welded joints.*

### REFERENCES

1. Shavyrin V.N., Ryazantsev V.I. Bonded constructions [Kleesvarnye konstrukcii]. M: Mashinostroenie. 1981. 168 p. (rus)
2. Fedoseikin V.I. Experimental and theoretical study of bolt-and-glug joints in metal structures

working in bending [Eksperimental'no-teoreticheskoe issledovanie boltokleevykh soedinenij v metallicheskih konstrukciyah, rabotayushchih na izgib]. Dissertaciya na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk. M.: 1980. 147 p. (rus)

3. Shestov N.M., Kargin Yu.B. Features of the design and production of glue-welded structures. [Osobnosti konstruirovaniya i proizvodstva kleesvarnykh konstrukcij]. Nadezhnost' i dolgovechnost' elementov mashin. Saratov: Saratovskij universitet. 1975. Pp. 136–144. (rus)
4. Andreev N.H. Investigation of the strength of welded and glue-welded spot joints [Issledovanie prochnosti svarnykh i kleesvarnykh tochechnykh soedinenij]. Dissertaciya na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk. M.: 1962. 56 p. ill. (rus)
5. Kashcheev V.N. Processes in the zone of frictional contact of metals [Processy v zone frikcionnogo kontakta metallov]. M.: Mashinostroenie. 1978. 214 p. (rus)
6. Kalenov V.V., Karmalin V.V., Pavlov A.B. On the calculation of the bearing capacity of bolted assembly joints for shear according to the criterion of deformability [Sbornik nauchnykh trudov. Issledovanie i sovershenstvovanie metallicheskih konstrukcij promyshlennykh zdaniy]. M.: 1984. Pp. 88–105. (rus)
7. Teh L.H., Uz M.E. Ultimate shear-out capacity of structural steel bolted connections. J. Struct. Eng. 2015. Vol. 141, Issue 6. 04014152.
8. Zeynali Y., Jafari Samimi M., Mazroei A., AsgariMamami, Rohanimanesh M.S. Experimental and numerical study of frictional effects on block shear fracture of steel gusset plates with bolted connections. Thin-Walled Struct. 2017. No. 121. Pp. 8–24. DOI: 10.1016/j.tws.2017.09.012.
9. Husid R.G. Study of the operation of combined riveted-bolted joints. [Issledovanie raboty kombinirovannykh klepano-boltovykh soedinenij]. Avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. L.:Izd. LIIZHT. 1977. 23 p. (rus)
10. Chesnokov A.S., Knyazhev A.F. Shear-resistant connections on high-strength bolts. [Sdvigoustojchivye soedineniya na vysokoprochnykh boltah]. M: Stroyizdat. 1974. 121 p. (rus)
11. Shaferman I.M. Development and research of mounting bolt-welded joints of bridge beams. [Razrabotka i issledovanie montazhnykh boltsvarnykh stykov mostovykh balok]. Avtoref. ... dis. na soisk. uchen. step. kand. tekhn. nauk : (05.04.05) M. 1983. 16 p. (rus)
12. Liu M.S., Li C.A., Huang J.R. Numerical modeling and mechanical analysis of combined connection with bolts and welds. Strength Mater. 2016. Vol. 48, Issue 6. Pp. 862–869. DOI: 10.1007/s11223-017-9832-1.
13. Dae-Kyung Kim, Cheol-Ho Lee. Experimental and analytical study of combined bolted-welded lap joints including high-strength steel. Journal of Constructional Steel Research 2020. No. 168. Pp. 81–96. DOI: 10.1016/j.jcsr.2020.105995.
14. Kulak G.L., Grondin G.Y., Strength of joints that combine bolts and welds. Engineering Journal, American Institute of Steel Construction. 2003. Vol. 40. Pp. 89–98.
15. Manuel T.J., Kulak G.L., Strength of joints that combine bolts and welds. J. Struct. Eng. 2000. Vol. 126, Issue 3. Pp. 279–287.
16. Khusnullov R.G. The work of joints of building metal structures on high-strength bolts with embedded wire elements [Rabota soedinenij stroitel'nykh metallokonstrukcij na vysokoprochnykh boltah s vnedryaemymi provolochnymi elementami]. B.I. 1985. 170 p. (rus)
17. Amelin A.A. The work of friction-shear joints in metal structures operating at low temperatures [Rabota frikcionno-sreznnykh soedinenij v metallicheskih konstrukciyah, ekspluatiruyushchihysya pri nizkih temperaturah]. Dis. kand. tekhn. nauk: 05.23.01. Moskva. 1994. 156 p. (rus)
18. Leonov V.P. Investigation of flange connections on high-strength bolts in steel structures of bridges. [Issledovanie flancevykh soedinenij na vysokoprochnykh boltah v stal'nykh konstrukciyah mostov]. Dis. kand. tekhn. nauk: 05.23.01. Moskva. 1974. 193 p. (rus)
19. Veinblat B.M. Theoretical and constructive-technological foundations for improving the efficiency of joints on high-strength bolts [Teoreticheskie i konstruktivno-tekhnologicheskie osnovy povysheniya effektivnosti soedinenij na vysokoprochnykh boltah]. Avtoref. dis. ... dokt. tekhn. nauk. M.. 1981. 47 p. (rus)
20. Streletsky N.N., Veinblat B.M., Knyazhev A.F., Muradyan A.A. Connections on load-bearing high-strength bolts in building metal structures [Soedineniya na nesushchih vysokoprochnykh boltah v stroitel'nykh metallokonstrukciyah]. Promyshlennoe stroitel'stvo. 1979. No 2. Pp. 27–29.
21. Tyagniy A.V. Determination of the stress state and fracture parameters of thin-walled glued and riveted elements of aircraft structures with cracks [Opredelenie napryazhennogo sostoyaniya i parametrov razrusheniya tonkostennykh kleenykh i kleeklepanykh elementov aviacionnykh konstrukcij s treshchinami.]. Dis. kand. tekhn. nauk: 05.07.03. Novosibirsk. 2004. 123 p. (rus)
22. Eropov L.A. Strength and deformability of glue-nail and glue-bolt joints in the nodes of plank building structures [Prochnost' i deformativnost' kleegvozdevykh i kleeboltovykh soedinenij v uzlah doshchatykh stroitel'nykh konstrukcij]. Avtoref. ... dis. na soisk. uchen. step. kand. tekhn. nauk : (05.23.01). Centr. n.-i. i proekt.-eksperim. in-t kompleks. probl. stroit. konstrukcij i sooruzhenij im. V.A. Kucherenko. M. 1988. 17 p. (rus)
23. Solodov N.V., Vodyakhin N.V.: Evaluation of the load-bearing capacity of the combined bolt-

welded joint. In: Klyuev S.V., Klyuev A.V., Vatin N.I. (eds) Innovations and Technologies in Construction. BUILDINTECH BIT 2021. Lecture Notes in Civil Engineering. Vol. 151. Springer, Cham. 2021. Pp. 174–180. DOI:10.1007/978-3-030-72910-3\_25.

24. Solodov N.V., Vodyakhin N.V.: Experimental study and computer simulation of the work of combined bolt and weld-in connections. Lecture Notes in Civil Engineering. 2022. Vol. 173. Pp. 321–327. DOI: 10.1007/978-3-030-81289-8\_41.

25. Solodov N.V., Vodyakhin N.V. On the features of the application, design and calculation of combined bolt-welded joints [Ob osobennostyah primeneniya, konstruirovaniya i rascheta kombinirovannyh boltosvarnyh soedinenij]. Nauka i innovacii v stroitel'stve. Sbornik dokladov IV Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. Belgorod, 2020. Pp. 80–85. (rus)

26. Solodov N.V., Shevchenko A.V., Aleinikov M.V. Solution of the contact problem by the method of the theory of plasticity [Reshenie kontaktnoj zadachi metodom teorii plastichnosti]. Bulletin of

BSTU named after V.G. Shukhov. 2005. No. 10. Pp. 474–477.

27. Muradyan A.A., Streletsky N.N. To the calculation of the collapse of steel structure elements on ordinary bolts [K raschyotu na smyatie elementov stal'nyh konstrukcij na obychnyh boltah]. Promyshlennoe stroitel'stvo. 1980. No. 3. Pp. 24–26.

28. Solodov N.V., Ivanov I.V., Sharik A.V. Analysis of the ultimate deformability of a bolted joint according to the collapse condition [Analiz predel'noj deformativnosti boltovogo soedineniya po usloviyu smyatiya]. Sb. nauch. trudov mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii «Regional'nye energosberegayushchie konstrukcii, zdaniya i sooruzheniya v stroitel'stve i kommunal'nom hozyajstve». CH.1. Belgorod: Izd. BelGTASM. 2003. Pp. 242–247. (rus)

29. Kulak G.L., Grondin G.Y. Strength of joints that combine bolts and welds. Eng. Second Quarter J. Vol. 40, Issue 2. 2003. Pp. 89–98.

30. Manuel T.J., Kulak G.L. Strength of joints that combine bolts and welds. Journal of Structural Engineering. No. 3. 2000. Pp. 279–287.

#### Information about the authors

**Solodov, Nikolai V.** Associate professor. E-mail: solodov\_niko\_v@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostukova st., 46.

**Vodyakhin, Nikolai V.** Assistant. E-mail: nat-kuts@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostukova st., 46.

**Kocherzhenko, Vladimir V.** Associate professor. E-mail: kocherzhenko\_vv@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostukova st., 46.

Received 06.06.2022

#### Для цитирования:

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. № 12. С. 18–27. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-12-18-27

#### For citation:

Solodov N.V., Vodyahin N.V., Kocherzhenko V.V. Stress-strain state as the implementation of collapse and shear in a bolted-welded joint. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 12. Pp. 18–27. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-12-18-27