

DOI: 10.24412/2077-8481-2023-4-14-24

УДК 624.074.5

И. М. КУЗМЕНКО¹, канд. техн. наук, доц.

Д. О. КУЗМЕНКО²

В. М. ФРИДКИН³, д-р техн. наук

М. А. АНТОНОВА³

¹Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

²ООО «Проектное бюро Апекс» (Москва, Россия)

³Российский университет транспорта (МИИТ) (Москва, Россия)

КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ СТЕРЖНЕВЫХ НЕСУЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ С КОМБИНИРОВАННЫМИ СВАРНЫМИ СОЕДИНЕНИЯМИ ДЛЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ

Аннотация

Разработаны и обоснованы предложения по замене в сквозных металлических конструкциях стержневых элементов коробчатого сечения на пластинчатые элементы, для соединения которых в пространственные структуры применяются специальные соединительные элементы (катушки).

Ключевые слова:

сквозные металлические конструкции, стержневые элементы, листовой прокат, комбинированные сварные соединения, конструктивная форма, конечные элементы.

Для цитирования:

Конструктивные решения стержневых несущих элементов с комбинированными сварными соединениями для металлических пролетных строений / И. М. Кузменко, Д. О. Кузменко, В. М. Фридкин, М. А. Антонова // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2023. – № 4 (81). – С. 14–24.

Введение

При проектировании объектов транспортного, промышленного и гражданского строительства, в том числе в мостостроении, широко применяются металлические конструкции в виде пространственных каркасов ферм, сводов, куполов и других конструктивных форм инженерных сооружений. Несущие элементы таких конструкций в большинстве случаев имеют коробчатое сечение. При их производстве и монтаже используются комбинированные (сварные, заклепочные и болтовые) соединения, которые обладают рядом недостатков. Кроме того, необходимо обеспечить антикоррозионную защиту поверхности конструктивных элементов, что представляет определенные трудности, особенно для внутренних поверхностей.

Исследования по совершенствованию таких конструкций ведутся совместно в Белорусско-Российском университете и Российском университете транспорта (МИИТ) в соответствии с Соглашением о сотрудничестве в области подготовки специалистов и научно-исследовательской работе от 10.06.2009 г.

При изготовлении упомянутых конструкций, в частности в мостостроении, используется листовой, в том числе стандартный универсальный, а также фасонный прокат низколегированных сталей. Стальные стержневые несущие элементы имеют, как правило, коробчатое односвязное или двутавровое (Н-образное) поперечные сечения, возможно, с диафрагмами [1–5]. Пространственные несущие структуры из таких стержневых элементов образуются путем их взаимных соединений узловыми фасонками и стыковыми накладками, раскра-

иваемыми и вырезаемыми из стального листового проката.

Для соединения элементов применяются заклепочные и сварные соединения – как заводские, так и монтажные. Повышаются трудоемкость и энергоемкость изготовления, возникают необратимые нарушения геометрии изделий и дислокационной структуры металла в зонах сварных швов, снижение выносливости и хладостойкости несущих стальных конструкций, воспринимающих существенные динамические нагрузки, особенно с учетом их эксплуатации в суровых природно-климатических условиях многих регионов России. Необходим также контроль геометрии и сварочных напряжений, а при необходимости – устранение последствий неизбежных теплофизических воздействий на объединяемые детали при сварке. Монтажные фрикционные соединения узлов выполняются, как правило, с применением высокопрочных болтов [6].

Одной из проблем проектирования таких металлических конструкций является необходимость обеспечения доступности пространства стыковочных узлов для установки и затяжки на расчетное усилие каждого из высокопроч-

ных болтов на каждом соединяемом элементе каждого из стержней, примыкающих к узловым фасонкам.

Еще один фактор усложнения конструирования – необходимость организации равнопрочных сварных стыков для коробчатых стержневых элементов, а также обеспечение доступа к антикоррозионной защите внутренних поверхностей таких элементов на стадии эксплуатации сооружения.

В конструкциях стержней коробчатого сечения также применяется перфорация [7] по меньшей мере одного из листов, что удорожает заводское изготовление и практически не снижает материалоемкость несущих элементов. Вместе с тем, открывается доступ загрязнений во внутреннее пространство стержня. С другой стороны, отказ от перфорации приводит к потребности обеспечения герметичности коробчатых стержней на весь период эксплуатации сооружения, что существенно усложняет стыковочные узлы и технологию монтажа металлоконструкций и приводит к разрушениям [8]. На рис. 1 приведен вид разрушенного (1987 г.) пролета моста в Великом Устюге (Россия), построенного в 1981 г.



Рис. 1. Разрушение моста с проезжей частью коробчатого сечения: а – общий вид; б – фрагмент

Также зафиксированы аварийное состояние и местные разрушения (тре-

щины) на мостах аналогичной конструкции в Беларуси: Бобруйск (р. Бере-

зна, построен в 1978 г., закрыт на ремонт в 2013 г.), Гомель (р. Сож, 1980–2017), Житковичи (р. Припять, 1985–2017), Новополоцк (р. Западная Двина, 1972–2018).

Конструктивные особенности стержневых несущих элементов новой конструктивной формы

Авторами статьи разработаны новые подходы к проектированию конструктивных форм сооружений со сквозными стержнями [9–11]. При этом существенно упрощается технология заводского изготовления важнейших несущих элементов сквозных строительных конструкций (стержней и узловых фасонок главных ферм пролетных строений мостов или пространственных стержневых каркасов купольных, сводчатых и башенных конструктивных форм), без повышения стоимости их монтажа на площадках строительства инженерных сооружений.

Несущие элементы стержневой строительной конструкции образуются

пластинчатыми элементами из листовых материалов, например, из раскроя стандартного листового металлического проката, возможно, в сочетании с элементами стандартного универсального листового проката. Эти элементы объединяются высокопрочными болтами в сочетании с комбинированными сварными соединениями в пространственные стержни и узлы с помощью деталей из элементов фасонного проката или отрезков труб с приваренными к их торцам шайбами.

В целом, получаем плоскую структуру несущих элементов, состоящую из систем пластинчатых элементов, образующих, в свою очередь, элементы пространственных стержней, и специальных соединительных элементов – плоских фасонок, состыкованных с ними с помощью узловых накладок.

Базовым элементом является пространственный стержень, образованный из двух пластинчатых элементов, связанных между собой при помощи соединительных элементов (рис. 2).

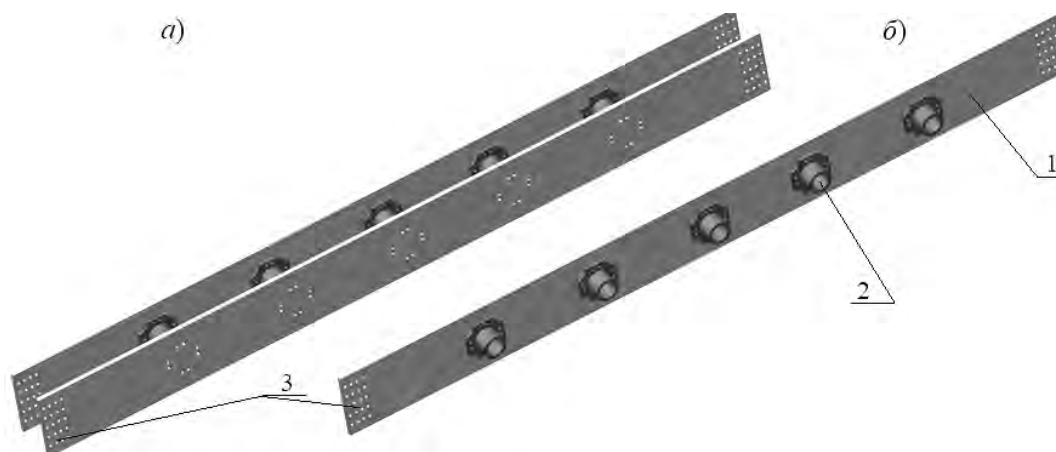


Рис. 2. Пространственный стержень несущего элемента: а – общий вид (3D-модель); б – вид стержня, рассеченного вдоль его продольной оси

Каждый пространственный стержень структуры состоит по меньшей

мере из двух пластинчатых элементов 1, соединенных между собой посредством

соединительных элементов 2, имеющих внешний вид трубчатых «катушек» с плоскими торцевыми стыковочными шайбами, или имеющих вид отрезков элементов фасонного проката.

При объединении пространственных стержней в пространственные системы образуется каркас несущих элементов стержневой строительной конструкции. Следовательно, такой стержень может быть использован как самостоятельная конструкция, или как монтажный элемент сборной стержневой строительной конструкции.

Технология изготовления стержней и стержневых систем предусматривает использование комбинированных соединений: сварка, заклепочные и (или) болтовые соединения.

Сборка элементов 1 между собой, а также с соединительными элементами 2, осуществляется при помощи, как правило, высокопрочных болтов. Все крепежные отверстия 3 (см. рис. 2) выполняются на заводе-изготовителе и могут в различном порядке располагаться на пластинчатых несущих элементах 1.

Конструктивное оформление пространственного стержня структуры может быть различным (рис. 3).

Соединительные элементы 2 (см. рис. 2) состоят по меньшей мере из двух листовых деталей 4 фасонного профиля (см. рис. 3), соединенных неразъемно между собой посредством отрезка трубы 5. Для усиления могут быть использованы ребра жесткости 6. Вместо трубы возможно применение прокатного двутаврового или Z-образного профиля 7.

Рассмотрены также варианты соединения трех и более пластинчатых элементов (рис. 4, а–в), а также вариант этажного расположения пространственных стержней с листовыми деталями фасонного профиля увеличенной длины (рис. 4, г).

Особое значение при проектировании ферм имеет конструктивное исполнение узлов. На рис. 5, а показана

конструкция узла, в котором два стержневых несущих элемента присоединяются к узловым фасонкам 8, а также узел со стойкой (подвеской) – рис. 5, б.

Соединение двух и более несущих элементов 1 в узлы производится с использованием по меньшей мере двух узловых листовых накладок в виде узловых фасонки 8, которые снабжены собственными соединительными элементами. Конструкция этих элементов аналогична соединительным элементам 2. Соединяются они друг с другом (узловая фасонка 8 и несущий элемент 1) при помощи общих узловых фасонки 9.

Все детали конструкции изготавливаются в заводских условиях. Листы режут на определенную ширину, просверливают отверстия под крепежные болты или заклепки для сборки несущих элементов 1 и для крепления полученных пространственных стержней между собой через соединительные элементы 2, 7, 10 и узловые фасонки 8. После этого каркас сооружения собирается непосредственно на строительной площадке с применением болтовых фрикционных соединений.

Граничные условия при моделировании НДС исследуемых конструкций

Для исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкций созданы их модели в среде ANSYS Workbench [12–14].

Исследовались две модели пространственной большепролетной конструкции на примере фермы:

1) стандартной конструкции по Серии 3.501.2-166 [15] (*базовая конструкция*);

2) конструкции с измененной конструктивной формой стержневых элементов главных ферм (*новая конструкция*).

Граничные условия при расчете новой конструкции полностью соответствовали расчетной схеме базовой конструкции (Серия 3.501.2-166).

В качестве внешних нагрузок, действующих на конструкцию, приняты следующие нагрузки: собственный вес (*Standard Earth Gravity*) и распределенная нагрузка по продольным несущим балкам моста – 80 кН/м (*Line Pressure*). Распределенная нагрузка принята по ТКП EN 1991-2–2009 приложение D, пункт D.3, тип 5 – Буксируемый локомотивом грузовой поезд. При этом используются шарнирные опоры: шарнирно-подвижные *Displacement* и *Displacement 3* и шарнирно-неподвижная *Displacement 2* (рис. 6).

В строительной механике в расчетных схемах ферм жесткие узлы заменяются шарнирами: принимается, что стержни фермы воспринимают только действие продольных сил (работают на растяжение-сжатие), следовательно, напряженно-деформированное состояние стержней фермы определяется площадью их поперечного сечения. Поэтому при выполнении инженерных расчетов площади поперечных сечений стержней предлагаемой конструктивной формы (*новой конструкции*) максимально приближали к площади сечений стержней главной фермы стандартной конструкции (*базовой конструкции*).

В свою очередь, при выполнении расчетов в программном комплексе ANSYS все узлы рассматриваются жесткими. Следовательно, элементы фермы воспринимают воздействие нормальных сил и изгибающих моментов.

Выводы

Проанализированы причины разрушений металлических пролетных строений мостов. Некоторыми причинами таких разрушений являются:

– невозможность обеспечения герметичности несущих элементов, имеющих коробчатое сечение и сложности с доступом к антикоррозионной защите внутренних поверхностей таких элементов;

– при выполнении сварочных работ не всегда возможно получение равнопрочных сварных соединений для коробчатых стержневых элементов, что приводит к снижению надежности конструкции, особенно при воздействии на нее низких температур и динамических нагрузок.

Перечисленные причины являются характерными также и для сквозных каркасов пространственных сооружений транспортного, промышленного и гражданского строительства, например, пространственных каркасов ферм.

Предложена новая конструктивная форма стержневых несущих элементов, свободная от выявленных недостатков. В сквозных металлических конструкциях стержневые элементы коробчатого сечения заменяются на пластинчатые элементы. При этом значительно снижается объем применения сварки.

Каждая пара смежных пластинчатых элементов пространственного стержня собирается в пространственную структуру с применением специальных соединительных элементов («катушек»). Предложены различные варианты конструктивного исполнения «катушек», а также варианты соединения с их помощью трех и более пластинчатых элементов.

Сформулированы граничные условия, принятые для дальнейшего исследования напряженно-деформированного состояния стержневой сквозной конструкции.

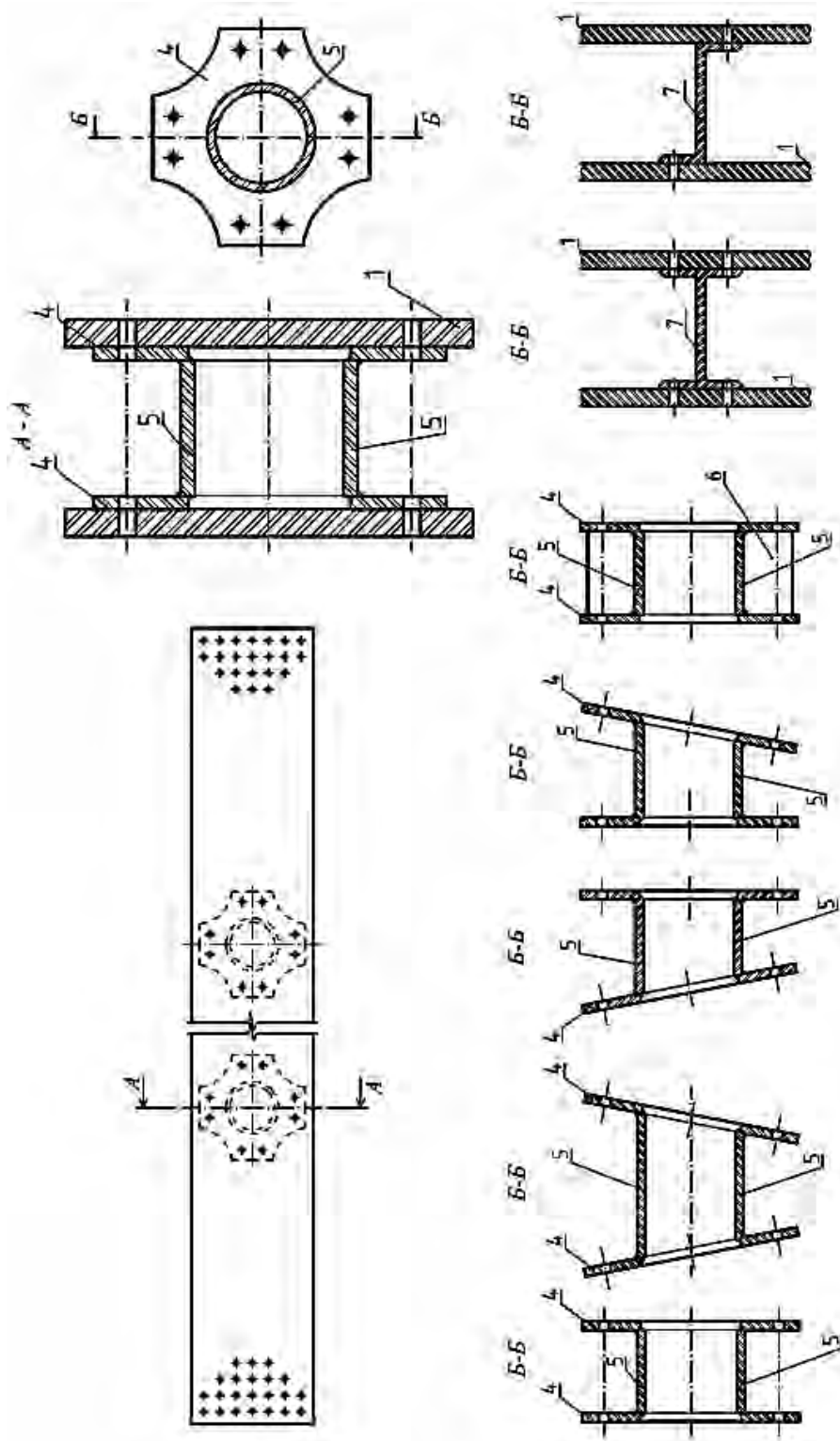


Рис. 3. Варианты конструктивного оформления пространственного стержня структуры: А-А – поперечный разрез по пространственному стержню и соединительному элементу (кагушке); Б-Б – разрез по катушке и различные варианты ее конструкции

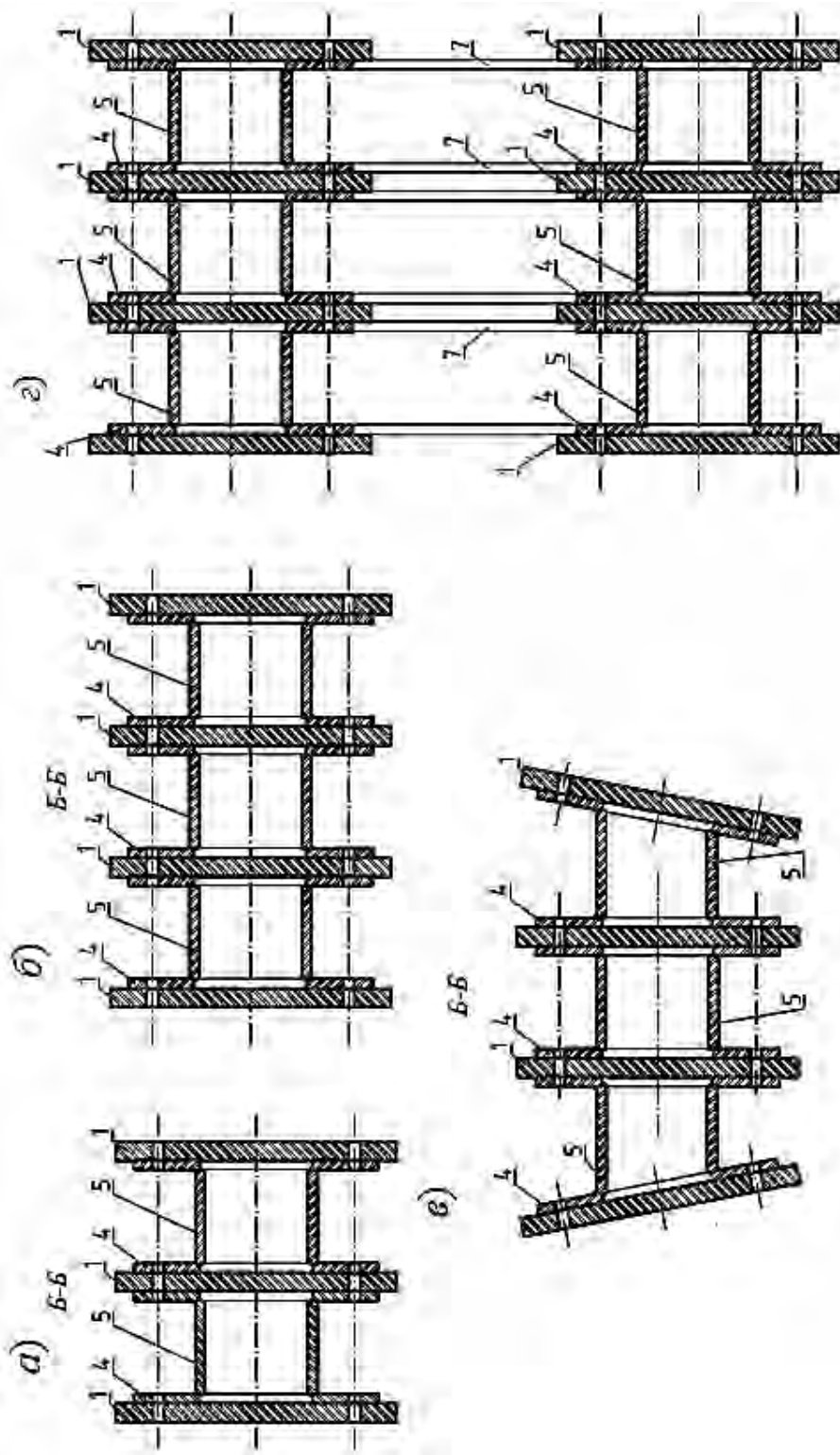


Рис. 4. Варианты соединения с помощью «когущек» трех и более пластинчатых элементов

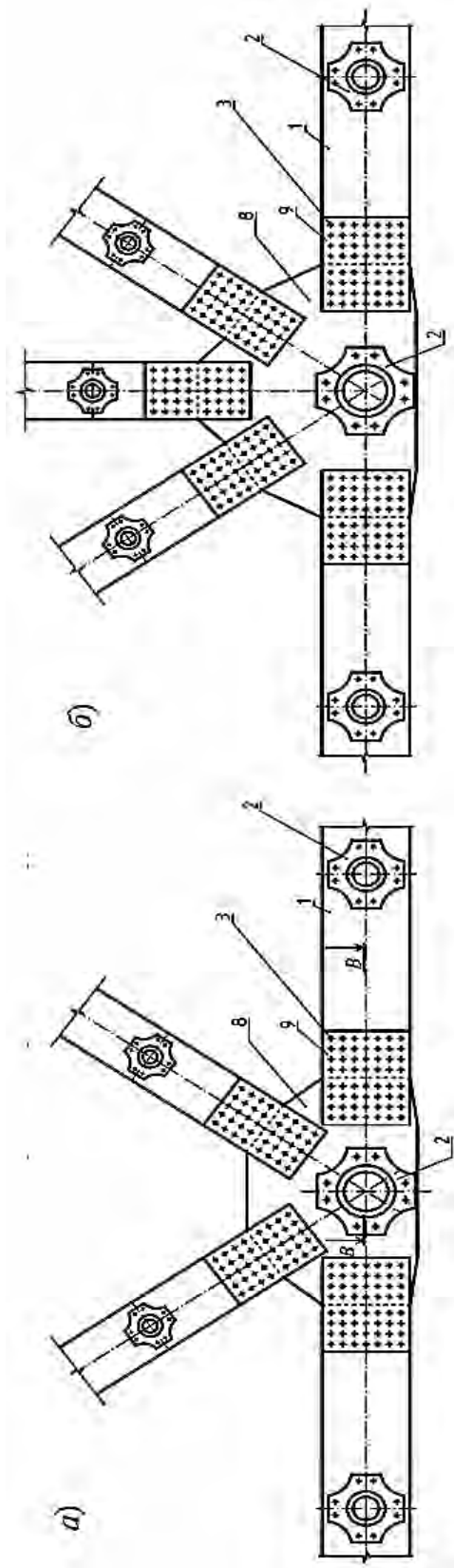


Рис. 5. Конструктивное исполнение узлов фермы

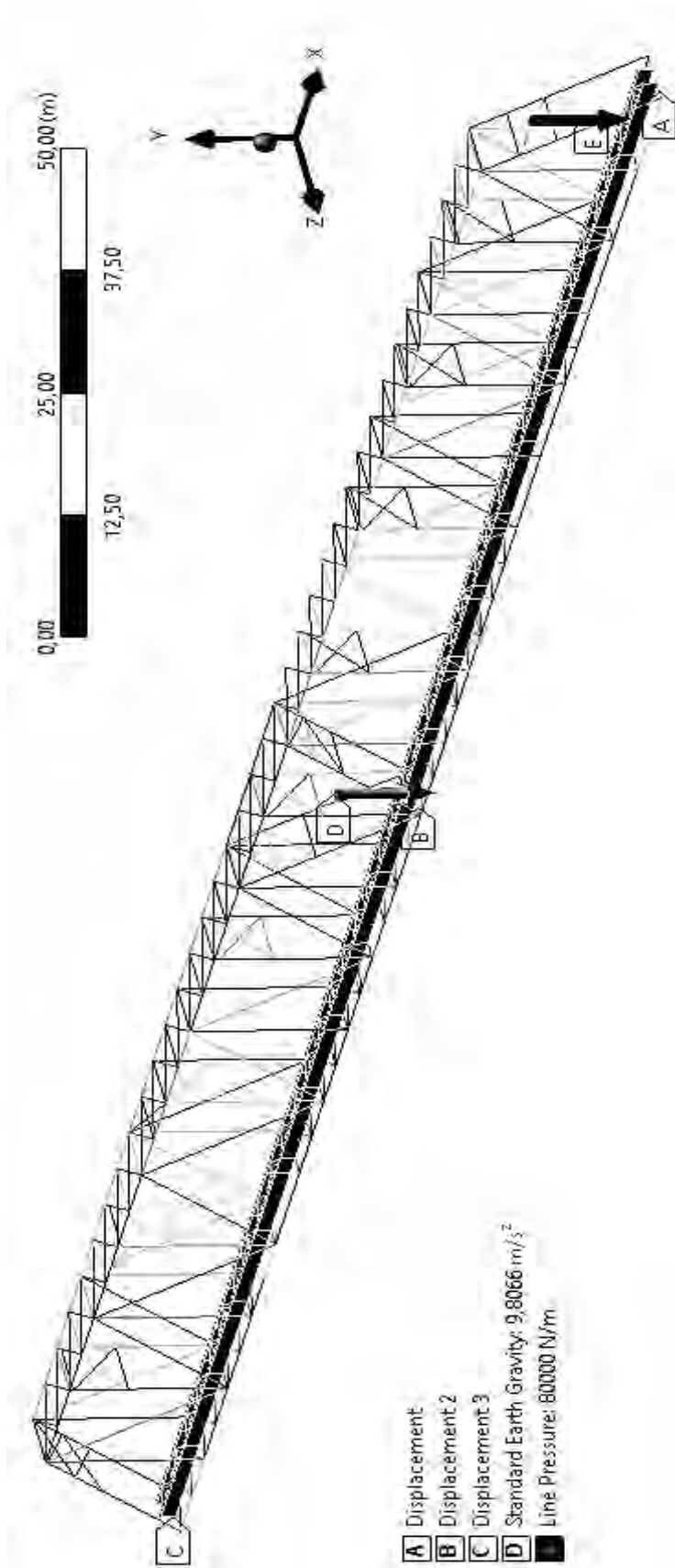


Рис. 6. Граничные условия, принятые в исследовании напряженно-деформированного состояния

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гибшман, Е. Е.** Проектирование металлических мостов / Е. Е. Гибшман. – Москва: Транспорт, 1969. – 416 с.
2. **Бычковский, Н. Н.** Металлические мосты: в 2 ч. / Н. Н. Бычковский, А. Ф. Данковцев. – Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2005. – Ч. 1. – 364 с.
3. **Поливанов, Н. И.** Проектирование и расчет железобетонных и металлических автодорожных мостов: учебное пособие / Н. И. Поливанов. – Москва: Транспорт, 1970. – 516 с.
4. **Корнеев, М. М.** Сталежелезобетонные мосты: теоретическое и практическое пособие по проектированию / М. М. Корнеев. – Санкт-Петербург: ФГБОУ ВПО ПГУПС, 2015. – 400 с.
5. **Середина, О. С.** Архитектура транспортных сооружений [Электронный ресурс]: учебное пособие / О. С. Середина. – Волгоград: ВолгГТУ, 2017. – 1 электрон. опт. диск (CD-R).
6. **Серия 3.501.2-139.** Пролетные строения для железнодорожных мостов с ездой понизу, пролетами 33–110 м, металлические, со сварными элементами замкнутого сечения и монтажными соединениями на высокопрочных болтах в обычном и северном исполнении: утв. и введены в действие с 01.01.1999 г. письмом МПС России от 07.12.1998 г. № ЦПИ-6/38. – Москва, 1999.
7. Сквозные балки пролетных строений автодорожных мостов: монография / В. М. Картопольцев [и др.]; под общ. ред. В. М. Картопольцева. – Томск: Том. гос. арх.-строит. ун-т, 2015. – 136 с.
8. **Рудь, А.** Треснувший мост: пророчество. Минский пенсионер бил в колокола, но его не приняли всерьез [Электронный ресурс] / А. Рудь. – Режим доступа: <https://auto.onliner.by/2018/01/15>. – Дата доступа: 06.10.2023.
9. **Кузменко, И. М.** Перспективы развития строительных конструкций инженерных сооружений: монография / И. М. Кузменко, В. М. Фридкин. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2017. – 171 с.
10. **Фридкин, В. М.** Принципы проектирования инженерных сооружений XXI века: учебное пособие / В. М. Фридкин. – Москва: Русайнс, 2018. – 191 с.
11. **Kuzmenko, I. M.** Belarusian-russian innovation: creation of engineering structures of the XXI century / I. M. Kuzmenko, S. N. Markov, V. M. Fridkin // Proceedings of the METNET Seminar 2015 in Budapest, Hungary. HAMK University of Applied Sciences. Hämeenlinna, FINLAND, December. – 2015. – P. 40–51.
12. **Кузменко, Д. О.** Совершенствование пластинчато-стержневых несущих элементов сквозных металлических конструкций / Д. О. Кузменко // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2018. – С. 10–14.
13. **Kuzmenko, D. O.** Selection of finite element for designing metal building structures / D. O. Kuzmenko, V. M. Fridkin, I. M. Kuzmenko // Proceedings of the METNET Seminar 2017 in Gottbus, Germany. HAMK University of Applied Sciences. Hämeenlinna, FINLAND, February. – 2018. – P. 156–167.
14. **Ткачев, Д. Н.** Силовой анализ элементов сквозной металлической конструкции большепролетного сооружения / Д. Н. Ткачев, А. А. Моргунов // 55 студенч. науч.-техн. конф. Белорус.-Рос. ун-та. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т. 2019. – С. 188.
15. **Серия 3.501.2-166.** Пролетные строения для железнодорожных мостов с ездой понизу неразрезные пролетами 110–176 м металлические со сварными элементами замкнутого сечения и герметичными узлами. – Вып. 1, ч. 1: Пролетное строение $L_p = 2 \times 110$ м. Материалы для проектирования и чертежи КМ: утв. и введены в действие с 01.06.1992 г. письмом МПС России от 29.12.1991 г. МПС СССР. – Москва, 1992.

Статья сдана в редакцию 19 октября 2023 года

Контакты:

kuzmenko_im43@mail.ru (Кузменко Игорь Михайлович);

onedimaz@mail.ru (Кузменко Дмитрий Олегович);

fvm38.38@mail.ru (Фридкин Владимир Мордухович);

ama-more@yandex.ru (Антонова Марина Анатольевна).

I. M. KUZMENKO, D. O. KUZMENKO, V. M. FRIDKIN, M. A. ANTONOVA

STRUCTURAL SOLUTIONS OF ROD LOAD-BEARING ELEMENTS WITH COMBINED WELDED JOINTS FOR METAL SUPERSTRUCTURES

Abstract

Proposals have been developed and substantiated for replacing box section rod elements with plate elements in framed metal structures, special connecting elements (coils) being used for connecting them into spatial structures.

Keywords:

framed metal structures, core elements, sheet metal, combined welded joints, structural form, finite elements.

For citation:

Structural solutions of rod load-bearing elements with combined welded joints for metal superstructures / I. M. Kuzmenko, D. O. Kuzmenko, V. M. Fridkin, M. A. Antonova // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2023. – № 4 (81). – P. 14–24.