

DOI: 10.24412/2077-8481-2024-2-36-46

УДК 624.074.5

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

Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

Д. О. КУЗМЕНКО

ООО «Проектное бюро Апекс» (Москва, Россия)

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ НЕСУЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ФЕРМЫ С КОМБИНИРОВАННЫМИ СВАРНЫМИ СОЕДИНЕНИЯМИ

Аннотация

Представлены результаты исследования напряженно-деформированного состояния пространственных стержневых несущих элементов фермы с комбинированными сварными соединениями. Приведены сравнительные данные показателей НДС в стержневых элементах базовой металлоконструкции главной фермы и разработанной новой конструкции. С целью улучшения показателей несущей способности новой конструкции выполнена оптимизация геометрической формы стержней.

Ключевые слова:

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

Для цитирования:

Кузменко, И. М. Напряженно-деформированное состояние пространственных несущих элементов фермы с комбинированными сварными соединениями / И. М. Кузменко, Д. О. Кузменко // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2024. – № 2 (83). – С. 36–46.

Введение

В качестве базовых элементов фермы использованы пространственные стержни, образованные из двух пластинчатых элементов, связанных между собой при помощи соединительных элементов. В [1] такие несущие элементы предлагается применять при проектировании металлических пролетных строений. Эти пластинчатые элементы при анализе напряженно-деформированного напряжения (НДС) с использованием метода конечных элементов (МКЭ) могут рассматриваться как балочные конечные элементы.

Исследованы две модели пространственной большепролетной конструкции (фермы): базовая конструкция – стандартная конструкция фермы по Серии 3.501.2-166 [2, 5] и новая конструкция – конструкция с измененной конст-

руктивной формой стержневых элементов главных ферм [1]. Стержни новой конструкции жестко соединены в узлах с использованием сварки и болтовых или заклепочных соединений.

Основная часть

В программном комплексе ANSYS исследовались напряжения в балочных элементах:

1) нормальные напряжения (*Direct Stress*): компоненты напряжений от действия осевой нагрузки, возникающей в элементе;

2) минимальное изгибающее напряжение (*Minimum Bending Stress*): от действия любых изгибающих нагрузок возникают изгибающие моменты в локальных направлениях относительно осей Y и Z , что приводит к следующим

четырем напряжениям изгиба: напряжение изгиба относительно оси Y и оси Z в верхнем и нижнем поясах фермы. Минимальное изгибающее напряжение – это минимум суммы этих четырех изгибающих напряжений;

3) максимальное изгибающее напряжение (*Maximum Bending Stress*): максимальное из четырех изгибающих напряжений, описанных выше;

4) минимальное комбинированное напряжение (*Combined Stress Minimum*): линейная суммарная комбинация нормального напряжения и минимального напряжения изгиба;

5) максимальное комбинированное напряжение (*Combined Stress Maximum*):

линейная суммарная комбинация нормального напряжения и максимального напряжения от изгиба.

На рис. 1–3 показаны результаты расчета напряжений и деформаций для базового варианта и фермы со стержнями новой конструктивной формы.

Для сравнения напряженно-деформированного состояния в стержневых элементах базовой металлоконструкции главной фермы и рассматриваемой новой конструкции проанализирован ряд выходных параметров (табл. 1):

– напряжения, возникающие в стержневых элементах: *Combined Stress Minimum, Bending Stress Maximum*;
– суммарные деформации пролетного строения: *Total Deformation*.

Табл. 1. Результаты расчетов по исследованию НДС

Показатель	Базовая конструкция	Новая конструкция	Δ , %
<i>Combined Stress Minimum</i> , МПа	–138,04	–146,84	+6,4
<i>Combined Stress Maximum</i> , МПа	188,37	218,07	+15,8
<i>Total Deformation Maximum</i> , м	0,13371	0,13599	+1,7
<i>Geometry Mass</i> , kg	794270	821150	+3,4
<i>Примечание</i> – Δ – величина отклонения исследуемого параметра новой конструкции от базовой, %; знак «+» перед числом указывает на рост параметра			

Как видно из табл. 1, предлагаемая новая конструкция уступает по НДС и массе стандартной конструкции, вследствие того, что в расчетной схеме базовой конструкции в стержнях фермы не учитывалось действие изгибающих моментов (принималось шарнирное соединение стержней в узлах фермы), а только лишь действие продольных сил.

При выполнении расчетов в среде ANSYS стержней новой конструкции рассматривается жесткое соединение стержней в узлах; следовательно, стержни воспринимают совместное действие изгибающих моментов и продольных сил.

Этими обстоятельствами объясняются более низкие показатели НДС в элементах базовой конструкции. Масса

ее также меньше, чем масса конструкции с измененной конструктивной формой пространственных стержней.

Выбор параметров оптимизации

Оптимизация геометрической формы стержней новой металлоконструкции пролетного строения, как один из важнейших этапов исследования, сама по себе невозможна без проведения многофакторного планирования вычислительного эксперимента.

С учетом рекомендаций [3] определены параметры оптимизации. При решении данной задачи по оптимизации конструкции проанализировано влияние параметров, характеризующих:

– массу конструкции;

– максимальные растягивающие и сжимающие напряжения в элементах конструкции;
 – предельные общие деформации.
 В качестве переменных (табл. 2 и 3) задавались геометрические размеры

стержневых элементов: для стального проката – ширина листа и его толщина; для труб соединительных элементов – диаметр и толщина стенки.

Табл. 2. Сводная таблица варьируемых переменных факторов (входных данных)

Базовая конструкция			Новая конструкция (оптимизированная модель)		
Листовой прокат, мм	Диапазон изменения размеров листа, мм				
	ширина		толщина	толщина	
600 × 40	500	700	32...40	697	36
600 × 32			26...38		36
600 × 30			24...36		31
600 × 26			20...32		30
600 × 25			20...30		26
600 × 24			18...30		24
600 × 22			16...28		20
600 × 20			15...25		23
600 × 18			12...24		12
600 × 16			12...20		12,5
600 × 12			10...14		10
600 × 10			8...12		10

Табл. 3. Соединительные элементы

В миллиметрах

Наименование	Диаметр трубы		Толщина	Диаметр трубы		Толщина
Труба 406 × 8	359,4	450,6	8	378	8	
Труба 377 × 7	333,3	420,7	7	357	7	
Труба 355 × 7	288,5	361,5	7	351	7	
Труба 273 × 6	235,7	310,3	6	250	6	
Труба 245 × 6	218,5	271,5	6	224	6	
Труба 219 × 6	181,1	256,9	6	222	6	

Результаты оптимизации фермы со стержневыми элементами

Оптимизация модели металлоконструкции моста под однопутную железную дорогу проведена в программном комплексе ANSYS Workbench. Составлен и проведен числен-

ный многофакторный эксперимент (модуль *Design of Experiments*). В первом приближении произведено 1106 вычислительных экспериментов (количество вычислительных экспериментов составляет автоматически программой, в зависимости от числа переменных факторов).

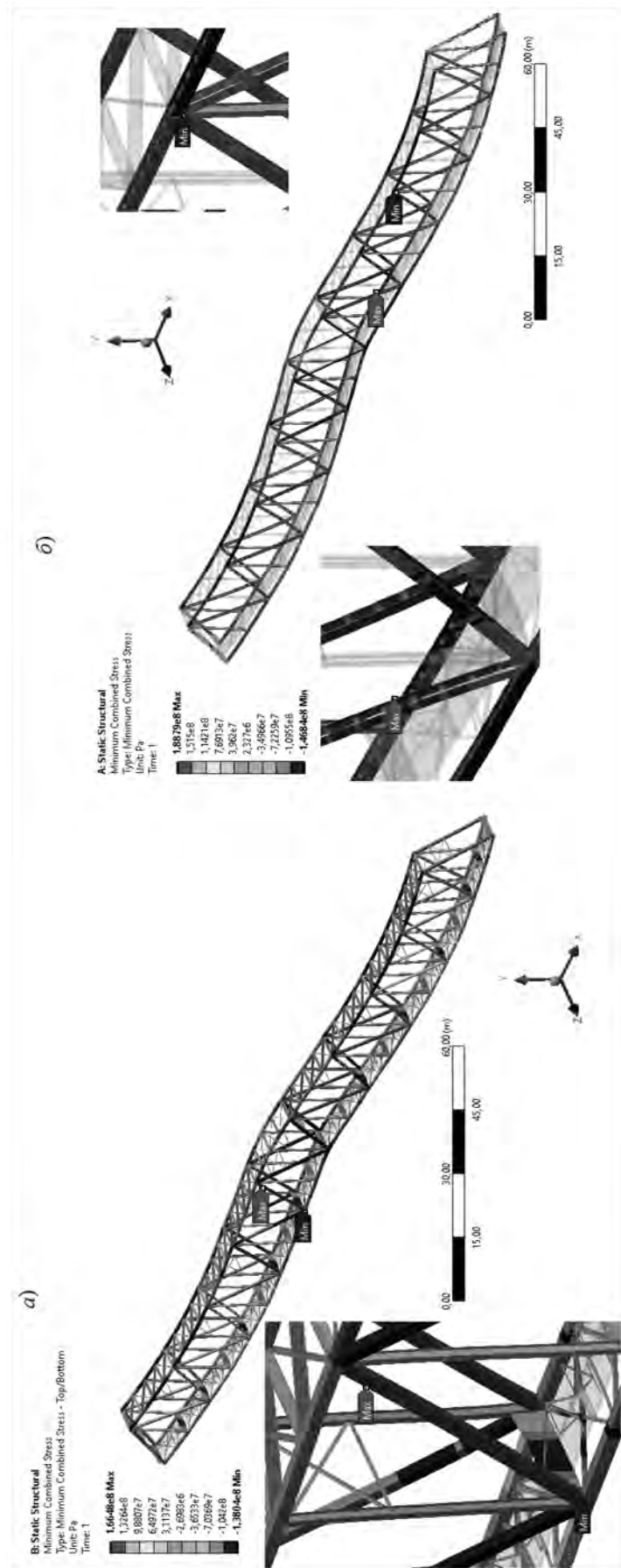


Рис. 1. Минимальные напряжения (*Combined Stress Maximum*) в стержнях фермы: *а* – базовый вариант; *б* – новый вариант

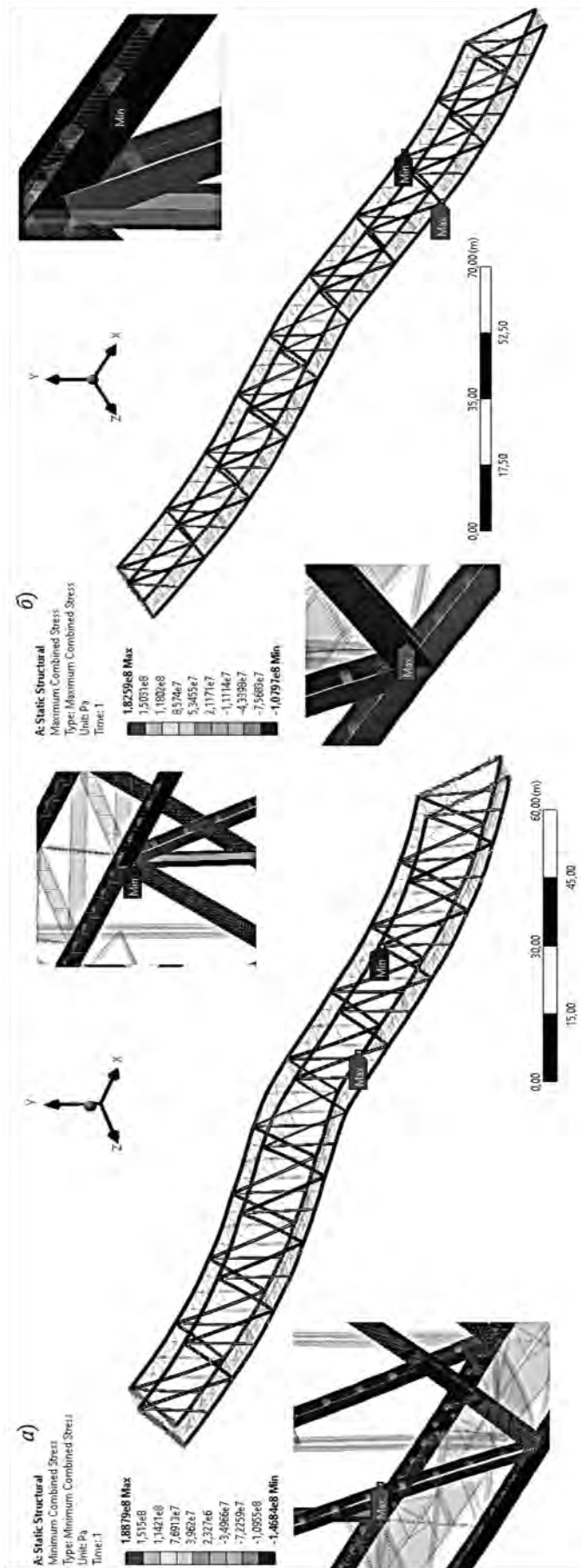


Рис. 2. Максимальные напряжения (*Combined Stress Maximum*) в стержнях фермы: *a* – базовый вариант; *b* – новый вариант

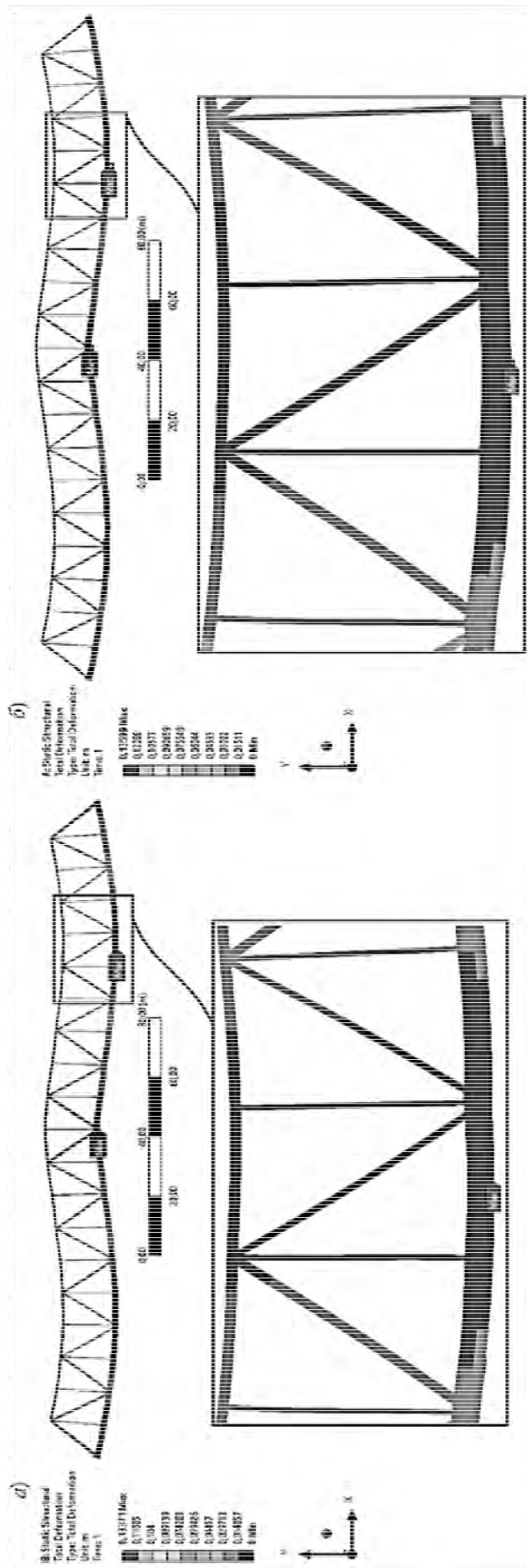


Рис. 3. Суммарные деформации (*Total Deformation Maximum*) фермы: а – базовый вариант; б – новый вариант

Оптимизация проводилась по методу MOGA (Multi-Objective Genetic Algorithm – многоцелевой генетический алгоритм). Метод MOGA является вариантом NSGA-II (Non-dominated Sorted Genetic Algorithm-II). Метод основан на концепциях контролируемой элитарности [4]. Он поддерживает множество целей и ограничений и направлен на поиск глобального оптимума – наиболее подходящего сочетания параметров входных данных, при которых будут соблюдены критерии оптимизации параметров.

В данном случае это минимизация массы в сочетании с уровнем напряжений, которые не должны превышать значений максимальных напряжений в базовой конструкции по Серии 3.501.2-166 [5].

На рис. 4 и 5 показаны результаты

оптимизации по напряжениям и деформациям стержней фермы (новый вариант конструктивной формы стержней после оптимизации).

Максимальные и минимальные напряжения, а также общие деформации несущих элементов предлагаемых конструктивных форм (табл. 4), уменьшились, по сравнению с деформацией элементов, стержни которых имеют коробчатое сечение.

Данные о стоимости изготовления металлоконструкций: базовой по Серии 3.501.2-166 и новой конструкции (после ее оптимизации) приведены в табл. 5 и отражают ориентировочную стоимость изготовления конструкции в заводских условиях, без учета затрат на транспортировку и сборку.

Табл. 4. Сводная таблица результатов расчета МКЭ после оптимизации по методу MOGA

Показатель	Серия 3.501.2-166	Новая конструкция	Δ , %
<i>Combined Stress Minimum</i> , МПа	-138,04	-127,81	-7,4
<i>Combined Stress Maximum</i> , МПа	188,37	182,66	-3,0
<i>Total Deformation Maximum</i> , м	0,13371	0,1256	-6,1
<i>Geometry Mass</i> , kg	794270	879540,42	10,7
<i>Примечание</i> – Δ – величина отклонения исследуемого параметра в новой конструкции от базовой, %; знак «-» перед числом указывает на снижение параметра			

Табл. 5. Стоимость изготовления металлоконструкции главной фермы (сравнение базового и нового вариантов конструкции)

В условных единицах

Показатель	Базовая конструкция	Новая конструкция
Стоимость листового металлопроката	348432,66	385839,34
Стоимость фасонного проката (труба)	0	26504,62
Стоимость сварочных операций: сварка стержней фермы сварка соединительных элементов	329437,11 –	– 19740,25
Стоимость высокопрочного соединения для пространственной фермы	46812,27	93624,54
Стоимость высокопрочного соединения для соединительных элементов	0	23611,22
Итого	724682,04	549319,96

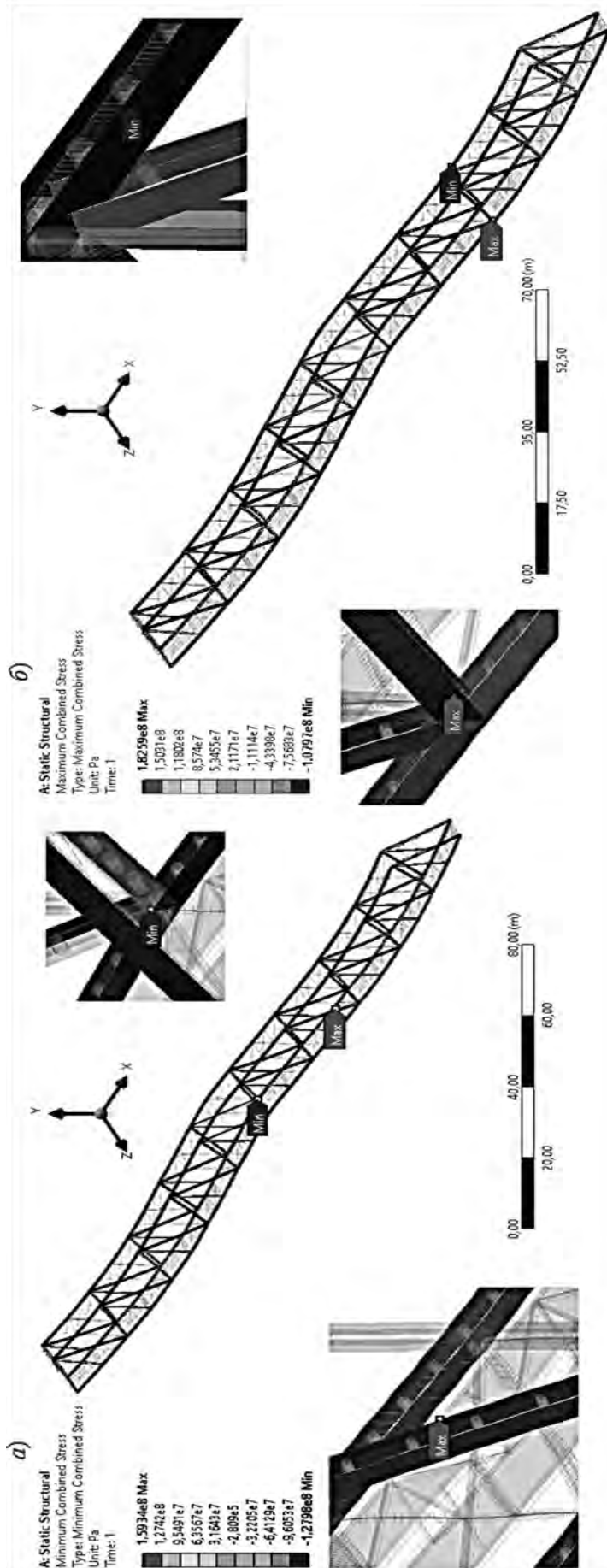


Рис. 4. Напряжения в стержнях новой конструктивной формы (после оптимизации): а – минимальные (Combined Stress Minimum); б – максимальные (Combined Stress Maximum)

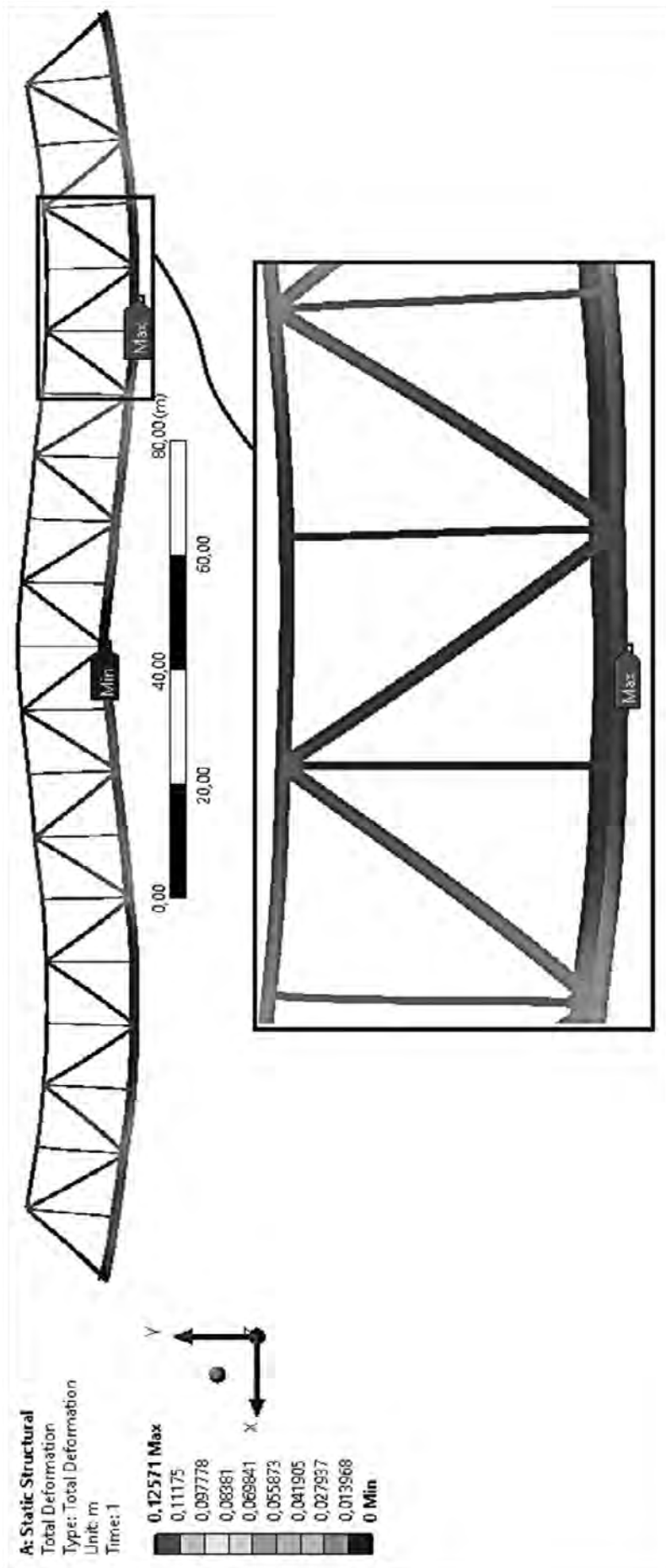


Рис. 5. Суммарные деформации (*Total Deformation Maximum*) в стержнях новой конструктивной формы (после оптимизации)

Масса конструкции увеличилась на 10,7 %, однако данное конструктивное решение не является окончательным, и в дальнейшем необходимо учесть не только статические нагрузки от железнодорожного состава, но и сочетание климатических и эксплуатационных нагрузок на исследуемую конструкцию.

Стоимость изготовления новой конструкции составляет 75,8 % от стоимости изготовления фермы по базовому варианту.

Выводы

1. Анализ напряженно-деформированного состояния конструкции в среде ANSYS показал, что предлагаемая новая конструкция уступает по НДС стандартной конструкции, вследствие того, что в расчетной схеме новой конструкции учтено совместное действие изгиба и растяжения-сжатия стержней фермы. Для улучшения показателей НДС, что позволит повысить несущую способность, требуется выполнить параметрическую оптимизацию геометрической формы стержней новой металлоконструкции пролетного строения.

2. С целью минимизации массы в сочетании с уровнем напряжений, которые не должны превышать значений максимальных напряжений в базовой конструкции, на основе комплекса ANSYS проведена параметрическая оптимизация геометрических характеристик предлагаемой конструктивной формы. В результате получена конструкция с улучшенными показателями напряженно-деформированного состояния (по сравнению со стандартной конструкцией).

3. Применение предлагаемых конструктивных решений позволит создавать несущие структуры стержневых металлических конструкций различных инженерных сооружений с оптимальной формой поперечных сечений несущих стержневых элементов с комбинированными сварными соединениями.

4. При использовании стержней новой конструктивной формы существенно снижаются (более, чем на 20 %) затраты на изготовление конструкции, по сравнению со стандартным конструктивным решением.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Конструктивные решения стержневых несущих элементов с комбинированными сварными соединениями для металлических пролетных строений / И. М. Кузменко [и др.] // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2023. – № 4. – С. 14–24.
2. **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.
3. **Адлер, Ю. П.** Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий: монография / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Наука, 1976. – 280 с.
4. **Fonseca, C. M.** Genetic Algorithms for Multi-Objective Optimization / C. M. Fonseca, P. J. Fleming // Formulation, Discussion and Generalization. Proc. of the 5th Intern. Conf. on Genetic Algorithms – San Mateo, California, 1993. – P. 416–423.
5. **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. – Москва: МПС СССР, 1991.

Статья сдана в редакцию 16 февраля 2024 года

Контакты:

kuzmenko_im43@mail.ru (Кузменко Игорь Михайлович);

onedimaz@mail.ru (Кузменко Дмитрий Олегович).

I. M. KUZMENKO, D. O. KUZMENKO

STRESS-STRAIN STATE OF SPATIAL LOAD-BEARING ELEMENTS OF A TRUSS WITH COMBINED WELDED JOINTS

Abstract

The results of the research on the stress-strain state of spatial load-bearing rod elements of a truss with combined welded joints are presented. Comparative data on VAT indicators for the rod elements in the basic metal structure of the main truss and the developed new structure are given. To improve the load-bearing capacity of the new structure, the geometric shape of the rods was optimized.

Keywords:

through metal structures, rod elements, sheet metal, combined welded joints, structural shape, finite elements, geometry optimization, parametric optimization.

For citation:

Kuzmenko, I. M. Stress-strain state of spatial load-bearing elements of a truss with combined welded joints / I. M. Kuzmenko, D. O. Kuzmenko // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2024. – № 2 (83). – P. 36–46.