



Research Article

Received: March 8, 2024

Accepted: March 22, 2024

Published: March 29, 2024

ISSN 2304-6295

Numerical analysis of composite truss

Mirsayapov, Ilshat Talgatovich¹ 
Pavlov, Maksim Nikolaevich¹ 

¹ Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation,
mirsayapovit@mail.ru (M.I.T); pavlov.m.n@bk.ru (P.M.N)

Correspondence: * email pavlov.m.n@bk.ru; contact phone [+79991553385](tel:+79991553385)

Keywords:

Structures of building; Composite truss; Truss; Steel concrete; Investigation of the stress-strain state; Ansys

Abstract:

The object of research of the study is the bearing capacity of a composite truss. This work aims to analyze the stress-strain state at the site of the bending moment and at the edge of the support brace. To determine the nature and site of destruction, considering the physical nonlinearity of concrete and steel, to determine forces, deflections, and deformations. **Method.** The Ansys software package is used to assess the stress-strain state, and nonlinear diagrams of materials based on the most modern theories of calculations of concrete and steel are used. **Results.** Stresses and relative deformations in a reinforced concrete slab and in elements of a metal truss are illustrated. Deflections of the composite truss have been determined. The height of the compressed zone of the composite truss is determined. The character of the dehumidification is determined based on the physical nonlinear operation of concrete and steel. The advantages of the studied section are described.

1 Introduction

Одна из тенденции архитектуры 1990–2024 гг. [1]-[4] является пространство в зданиях и сооружениях, свободных от опор, перекрытое большепролетной конструкцией. Популярными конструкциями покрытия – это металлические фермы совместно с профилированным настилом или сборными ребристыми плитами. В Российской Федерации мало уделяется внимания композитным (сталежелезобетонным) фермам. Одним из часто применяемых сечений в строительстве является металлическая ферма, на которую опирается железобетонная плита по профилированному листу. Совместная работа верхнего пояса фермы и железобетонной плиты обеспечивается с помощью гибких упоров.

Исследование композитных ферм актуально [5]-[6] тем, что конструкция имеет множество преимуществ. Например, бетон в плите эффективно работает на сжатие и обладает высокой огнестойкостью. Сталь в металлической ферме эффективно работает на растяжение. Арматура эффективно работает на сжатие и растяжение и способен компенсировать прочность в растянутой зоне бетона. Так же к преимуществам композитных ферм можно отнести высокую жесткость благодаря решетчатой структуре, которая состоит из поясов, раскосов и стоек.

Исследованием поведения трубчатой композитной фермы моста в области отрицательного момента занимались: Бейчен Пу, Суйхун Чжоу, Юнцзянь Лю, Бинь Лю, Лэй Цзян. Описан новый тип композитной фермы, выполнен физический эксперимент и численные исследования прочности композитной фермы. Описано напряженно-деформированное состояние элементов композитной фермы. Определена область применения композитной фермы нового типа [7].

Исследованием совместной работы металлической фермы и железобетонной плиты занимались: Мачачек Йозеф, Чарват Мартин. Выполнены численные исследования при возрастающем уровне нагрузки сдвиговых усилий, изучены температурные эффекты и ползучесть

Mirsayapov I.; Pavlov M.

Numerical analysis of composite truss;

2024; *Construction of Unique Buildings and Structures*; 111 Article No 11106. doi: 10.4123/CUBS.111.6



бетона. Исследованы напряжения узлов соединений в области верхнего пояса фермы и влияние этих напряжений на железобетонную плиту [8]-[9].

Исследованием прочности в зоне действия изгибающего момента композитных стропильных ферм занимались: Лишэн Ло, Сяофэн Чжан. Выполнен физический эксперимент, численные и аналитические исследования несущей способности. Представлены графики зависимостей прочность-изгиб. Предложен метод расчета, основанный на степени сдвиговых усилий между металлической стропильной фермой и железобетонной плитой [10].

Исследованием соединений в композитных мостовых ферменных конструкциях занимались: Го-ань Инь, Фа-синь Динь, Хаи-бо Ван, Ю Бай, Сюэ-мэй Лю. Выполнен физический эксперимент и численные исследования прочности соединений металлических раскосов в тело бетона. Представлены графики зависимостей нагрузка-напряжения. Описан характер разрушения исследуемых соединений. Представлены рекомендации по проектированию соединений исследуемого типа [11].

Исследованием соединений в композитной ферме занимались: Адбельхамид Бушаир, Ян Бужнак, Патриция Дюратна. Выполнены численные исследования влияний параметров диаметра материала, расположения соединительных элементов. Представлены графики зависимостей перемещения-усилия [12].

Исследованием прочности композитных ферменных балок занимались: Ян Буйнак, Петер Михалек, Веслав Баран, Збигнев Перковский. Выполнен физический эксперимент и численные исследования прочности балок и элементов, обеспечивающие совместную работу металлической фермы и железобетонной плиты. Представлены графики зависимостей прочность-перемещения. Представлены рекомендации по проектированию композитных ферм [13]-[16].

Исследованием напряженно-деформированного состояния композитной фермы занимались: Джоэл Мартинс, Синевал Перьера Младший, Эллен Ксавьер, Луис Нейва, Арлин Сарманьо. Выполнен физический эксперимент и численные исследования прочности композитной фермы. Описан характер разрушения композитной фермы. Представлены график зависимости напряжений-деформаций [17].

Исследованием напряженно-деформированного состояния композитной фермы занимались: Аугусто О. Б. Сильва, Ньютон О. П. Жуниор, Жуан А. В. Рекена. Выполнены численные исследования, предложен ручной метод расчета композитной фермы [18]-[19].

Анализ научных публикаций показывает, что одна из проблем композитных ферм – это обеспечение совместной работы металлической фермы и железобетонной плиты. В большинстве случаев совместную работу обеспечивают гибкие упоры. В практике проектирование по конструктивным требованиям невозможно расположить достаточное количество гибких упоров для обеспечения полной совместной работы металлической фермы и железобетонной плиты.

Авторы предлагают рассмотреть сечение, в котором верхний пояс из сварного таврового элемента заделывается на уровне верхнего армирования в железобетонную плиту. Совместная работа обеспечивается трением между сталью и бетоном, то есть адгезии материалов. В таком случае железобетонная плита раскрепляет верхний пояс металлической фермы и усиливает сопротивление сжимающим усилиям. Элементы раскосов и стоек соединяются к верхнему поясу фермы через косынки путем сваривания элементов. Аналогично соединяется нижний пояс к раскосам и стойкам. Нижний пояс, раскосы выполнены из равнополочного уголкового сечения. Данное решение позволяет отказаться от гибких упоров для обеспечения совместной работы и горизонтальных связей для раскрепления верхнего пояса фермы, что приводит к экономии на материале и строительно-монтажных работах.

Таким образом, цель авторов заключается в исследовании напряженно-деформированного состояния композитной фермы численным методом. Выполнить анализ и определить элементы и участки разрушения с учетом физической нелинейности деформирования бетона, металлической фермы и арматуры. Определить несущую способность композитной фермы. Сравнить несущую способность с металлической фермой, где в качестве настила используется профилированные листы или сборные железобетонные плиты.

2 Materials and Methods

В качестве исходных данных для исследования принято сечение на (рис. 1) металлическая ферма из стали С345 геометрические характеристики представлены в (табл. 1). Железобетонная

плита толщиной 200 мм из класса бетона В25, армированная сеткой диаметром 12 мм класс А500С. Общая высота сечение 1900 мм.

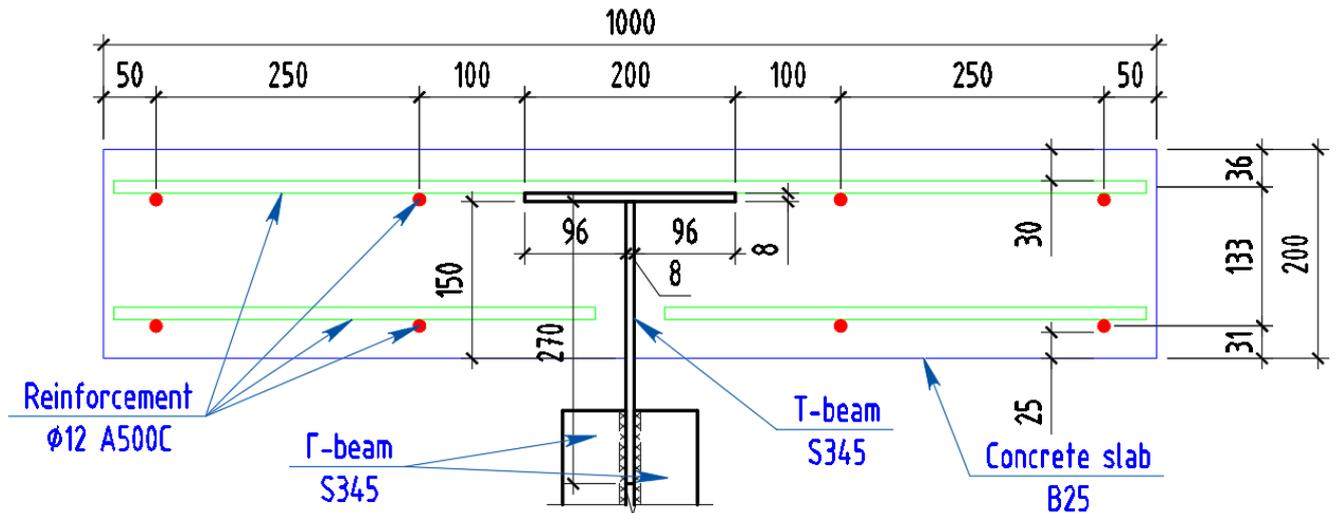


Рис. 1 – Исследуемое сечение фрагмент верхнего пояса

Fig. 1 – The section under study is a fragment of the upper belt

Таблица. 1 – Принятые сечения металлической фермы

Table. 1 – Accepted sections of the metal truss

Элементы фермы	Сечение, мм	Площадь сечения А, см ²
Верхний пояс	Тавр 200x160x8	28.8
Нижний пояс	Парный уголок равнополочный 80x5	8.63x2=17.26
Опорные раскосы	Парный уголок равнополочный 80x5	8.63x2=17.26
Раскосы	Парный уголок равнополочный 60x6	6.92x2=13.84
Стойки	Парный уголок равнополочный 50x5	4.8x2=9.6

Расчетная схема (рис. 2) представляет собой ферму, опертую на две опоры шарнирно. Нагрузка приложена на железобетонную плиту равномерно по всей длине.

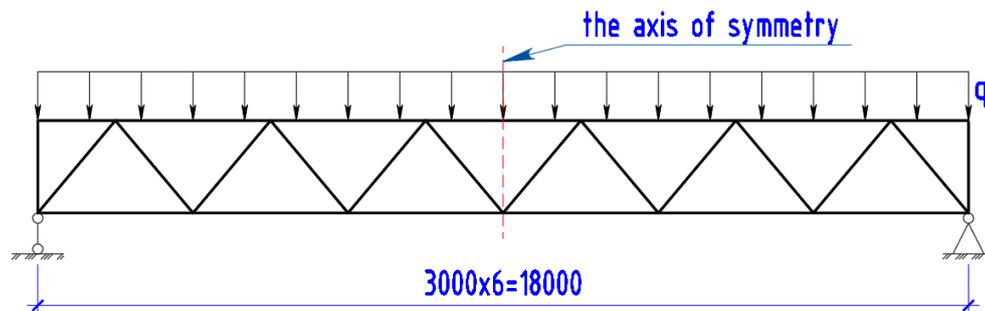


Рис. 2 – Расчетная схема фермы

Fig. 2 – The design scheme of the truss

Расчетная модель (рис. 3) собрана в SpaceClaim ПК Ansys [ansys.com]. Для облегчения модели и более быстрого расчета за моделирована половина композитной фермы.

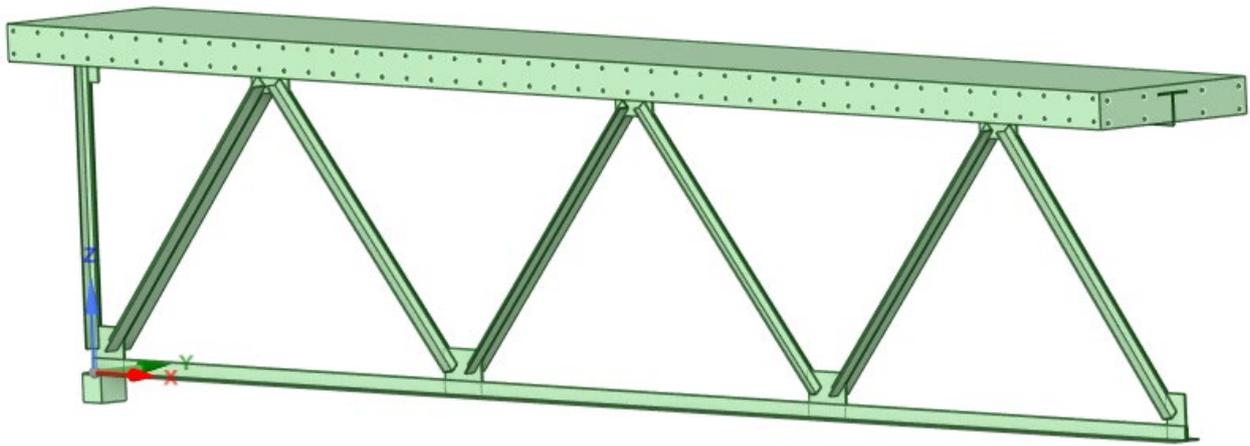


Рис. 3 – Расчетная модель в SpaceClaim
Fig. 3 – Calculation model in SpaceClaim

Характеристики материалов приняты нелинейными.

Для бетона принята диаграмма работы в соответствии с диаграммой деформации бетона на сжатие и растяжение предложенная академиком Н.И. Карпенко [20] (рис. 4). В ПК Ansys [ansys.com] задана теория прочности и пластичности Menetrey-Willam модель разрушения бетона HSD 6 (Hardening-Softening and Dilatation). Заданы нормативные значения класс бетона В25 (рис. 5).

Для стали принята кусочно-линейная диаграмма в соответствии с приложением В1. Свод правил стальные конструкции 16.13330.2017 [21] (рис. 6). Заданы нормативные значения стали С345 (рис. 7).

Для арматуры принята двухлинейная диаграмма в соответствии с пунктом 6.2.14. Свод правил бетонные и железобетонные конструкции 63.13330.2018 [22] (рис. 8). Заданы нормативные значения класс арматуры А500С (рис. 9).

Для тумбочек, которые имитируют опоры, задана линейная работа стали.

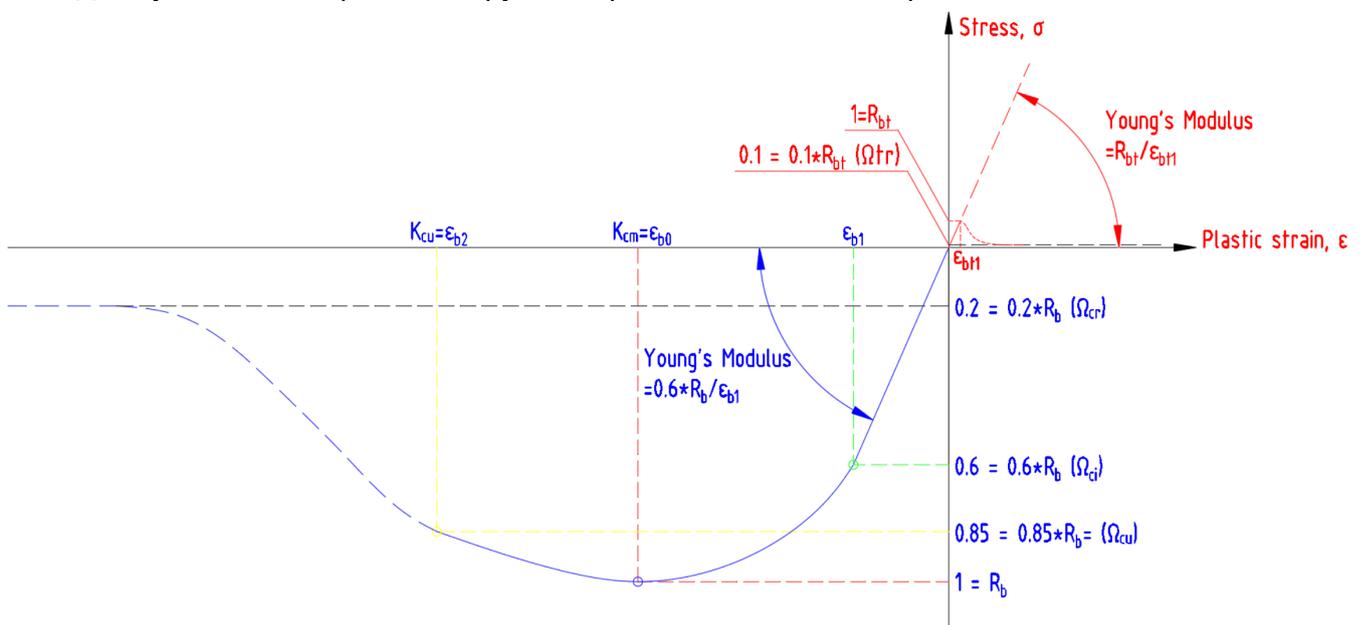


Рис. 4 – Экспоненциальная диаграмма работа бетона, адаптированная к теории Менетри-Виллама

Fig. 4 – Exponential diagram of concrete performance, adapted to the Menetrey-Willam theory

Properties of Outline Row 4: B25_V3				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	2400	kg m ⁻³	
4	Isotropic Elasticity			
5	Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio		
6	Young's Modulus	30000	MPa	
7	Poisson's Ratio	0,2		
8	Bulk Modulus	1,6667E+10	Pa	
9	Shear Modulus	1,25E+10	Pa	
10	Menetrey-Willam			
11	Menetrey-Willam Base			
12	Uniaxial Compressive Strength	18,5	MPa	
13	Uniaxial Tensile Strength	1,55	MPa	
14	Biaxial Compressive Strength	22,2	MPa	
15	Dilatancy Angle	13	degree	
16	Softening			
17	Active Table	Exponential		
18	Plastic Strain at Uniaxial Compressive Strength	0,0015008		
19	Plastic Strain at Transition from Power Law to Exponential Softening	0,0028584		
20	Relative Stress at Start of Nonlinear Hardening	0,6		
21	Residual Relative Stress at Transition from Power Law to Exponential Softening	0,85		
22	Residual Compressive Relative Stress	0,2		
23	Mode 1 Area Specific Fracture Energy	155,55	N m ⁻¹	
24	Residual Tensile Relative Stress	0,1		

Рис. 5 – Характеристики бетона, заданные в ПК Ansys
 Fig. 5 – Concrete characteristics, specified in the PC Ansys

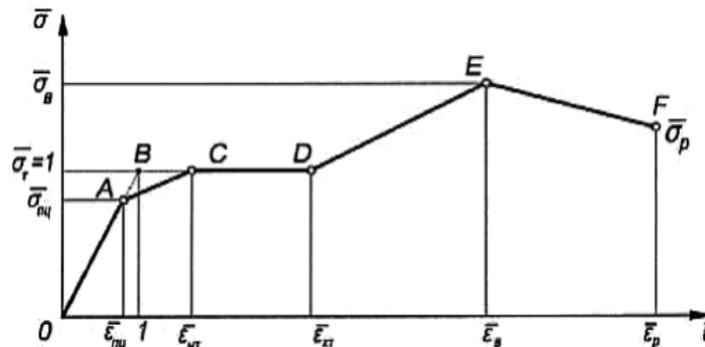


Рис. 6 – Кусочно-линейная диаграмма работы стали
 Fig. 6 – Piecewise linear diagram of steelwork

Properties of Outline Row 5: S345				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	7850	kg m ⁻³	
4	Isotropic Elasticity			
5	Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio		
6	Young's Modulus	2E+05	MPa	
7	Poisson's Ratio	0,3		
8	Bulk Modulus	1,6667E+11	Pa	
9	Shear Modulus	7,6923E+10	Pa	
10	Multilinear Isotropic Hardening	Tabular		
11	Scale	1		
12	Offset	0	MPa	

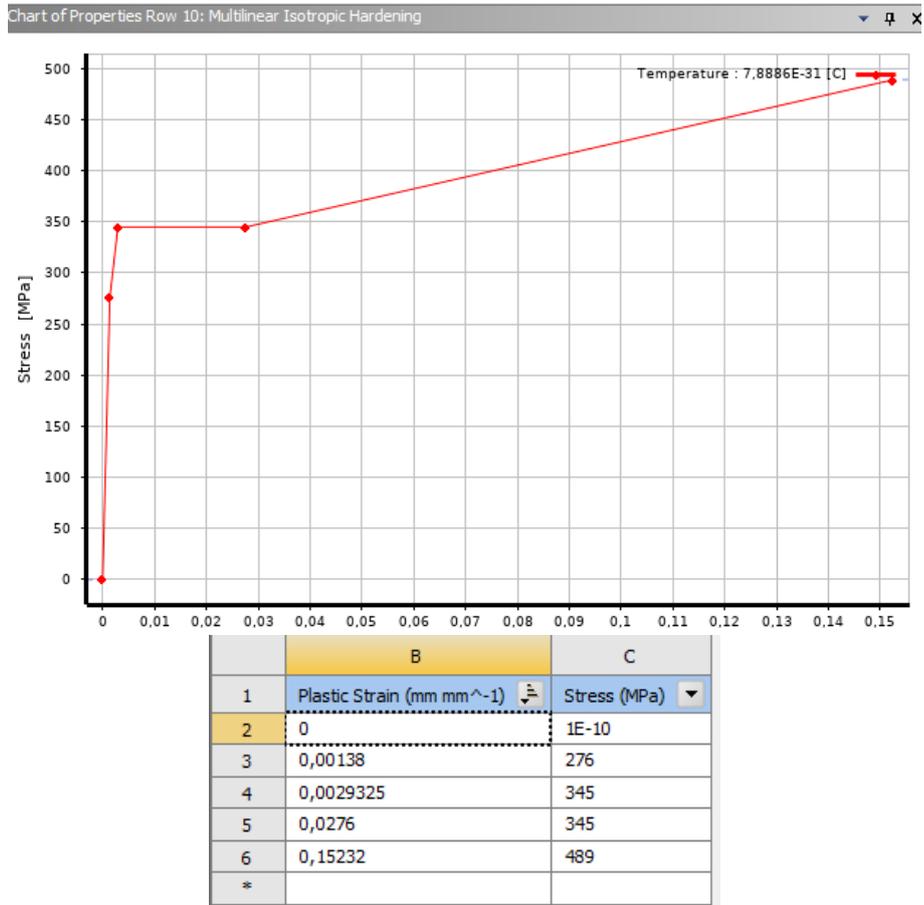


Рис. 7 – Характеристики стали, заданные в ПК Ansys
 Fig. 7 – Steel characteristics specified in the PC Ansys

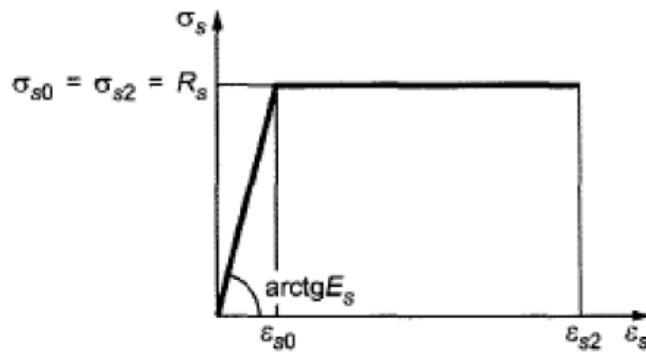


Рис. 8 – Двухлинейная диаграмма работы арматуры
 Fig. 8 – Two-line diagram of the reinforcement

Properties of Outline Row 3: A500C

A	B	C	D	E
Property	Value	Unit		
Material Field Variables	Table			
Density	7850	kg m ⁻³		
Isotropic Elasticity				
Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio			
Young's Modulus	2E+05	MPa		
Poisson's Ratio	0,3			
Bulk Modulus	1,6667E+11	Pa		
Shear Modulus	7,6923E+10	Pa		
Multilinear Isotropic Hardening	Tabular			
Scale	1			
Offset	0	MPa		

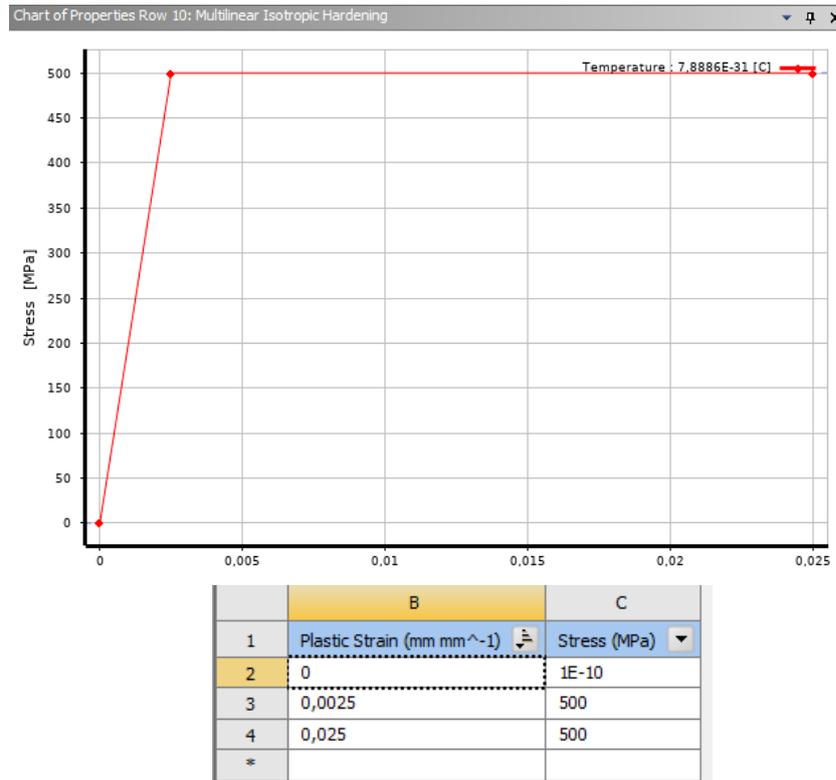


Рис. 9 – Характеристики арматуры, заданные в ПК Ansys
Fig. 9 – Reinforcement characteristics specified in the PC Ansys

Приняты следующие контакты между элементами сечения: 1) между тумбочкой и нижним поясом фермы значение «Frictional» с коэффициентом 0.5 [23] для имитации шарнирной опоры; 2) между железобетонной плитой и частью верхнего пояса фермы, которая заделана в плиту значение «bonded» то есть трение между элементами отсутствует за счет обжатия и адгезионных свойств материалов; 3) между стальными элементами значение «bonded».

Приняты следующие граничные условия: 1) на нижнюю поверхность опор задана «Fixed Support» моделирует жесткую заделку; 2) на боковые грани железобетонной плиты поперек фермы задан «Displacement» которая ограничивает перемещение по Y.

На первом шаге задается загрузка от собственного веса конструкции значение «Standard Earth Gravity». На втором шаге задается равномерно распределенная нагрузка по всей поверхности железобетонной плиты значение «Force» с силой по 225000 N.

Для моделирования симметрии задано значение «Symmetry region» на торец сечения по оси симметрии (рис. 2).

Для анализа результатов необходимо вывести следующие данные: 1) Normal Stress (нормальные напряжения); 2) Stress Equivalent (von-Mises) (эквивалентные напряжения); 3) Equivalent Total Strain (относительные деформации); 4) Total Deformation (полные деформации); 5) Shear Stress (касательные напряжения); 6) Force Reaction (опорная реакция) [24].

3 Results and Discussion

Отказ сечение зафиксирован на 0.95 секунде после начала испытания численной модели. Несущая способность составила $P_{ult} = (225000 \cdot 2) \cdot 0.95 = 427500 \text{ N} = 43.6 \text{ т}$. Общие деформации (рис. 10) вертикальные перемещение в момент отказа сечения составляет 93.1 мм.

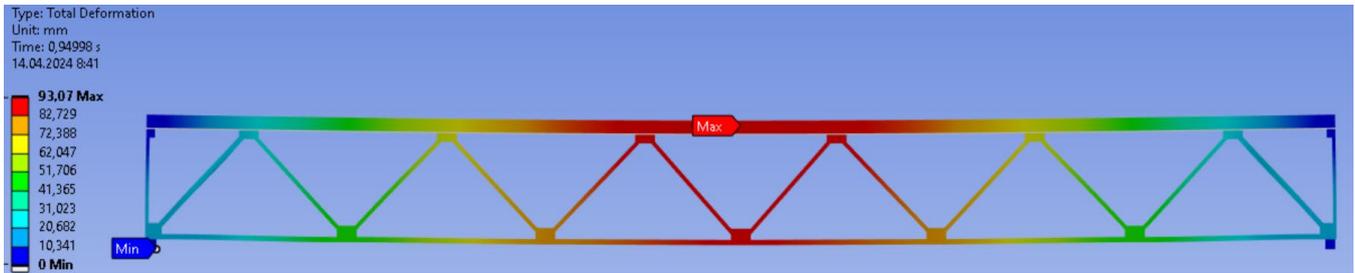


Рис. 10 – Прогиб композитной фермы
Fig. 10 – Deflection of the composite truss

Рассмотрим участок действия нормальных напряжений посередине пролета.

Нормальные напряжения в железобетонной плите (рис. 11). В сжатой зоне 13.45 МПа, что не превышает сопротивление бетона на сжатие $R_{b,n}=18.5$ МПа. В растянутой зоне 1.534 МПа, что не превышает сопротивление бетона на растяжение $R_{bt,n}=1.55$ МПа.

Относительные деформации в железобетонной плите (рис. 12). В сжатой зоне 0.00041 мм/мм, что не превышает максимально допустимые относительные деформации $\varepsilon_{b2} = 0.0035$ мм/мм. В растянутой зоне 0.000187 мм/мм, что превышает максимально допустимые относительные деформации $\varepsilon_{bt2} = 0.00015$ мм/мм.

Эквивалентные напряжения по фон Мизесу (рис. 13). В растянутой зоне 319.72 МПа, что не превышает значение сопротивление стали для упругой работы $R_y=345$ МПа. В сжатой зоне 63.63 МПа, в косынке 108.7 МПа.

Относительные деформации (рис. 14) В растянутой зоне составляют 0.00396 мм/мм, что превышает значение упругой работы стали 0.00138 мм/мм, в косынке 0.0011 мм/мм.

На основании полученных результатов можно представить расчетную модель следующим образом (рис. 15). Пренебрежем вклад арматуры в несущую способность сечения.

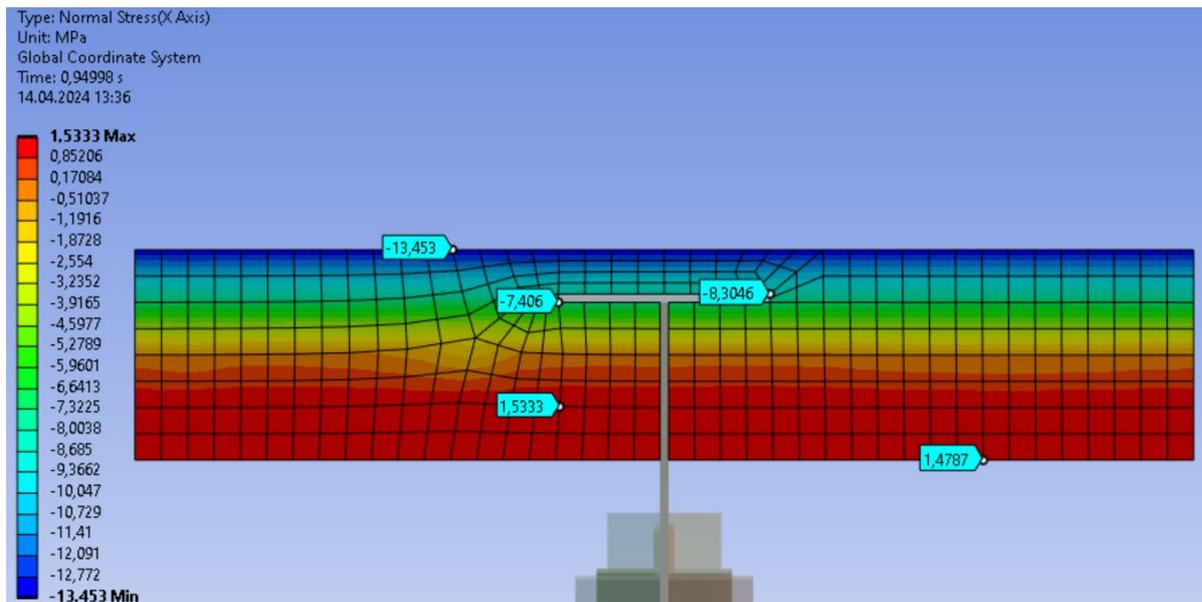


Рис. 11 – Нормальные напряжения
Fig. 11 – Normal stress

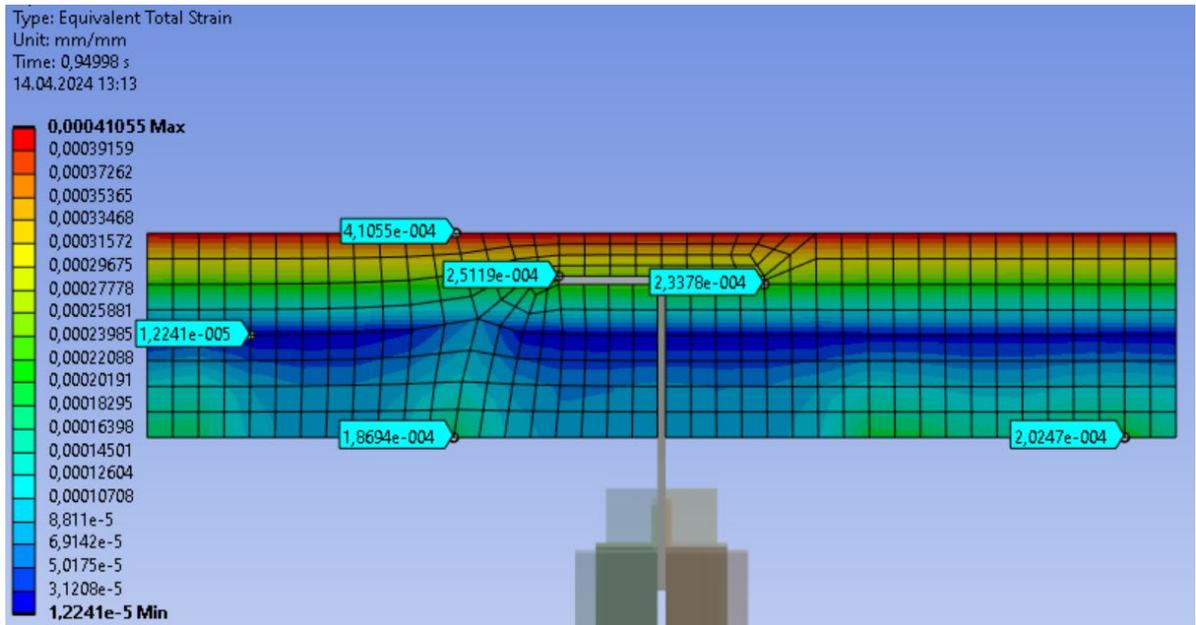


Рис. 12 – Относительные деформации
 Fig. 12 – Equivalent strain

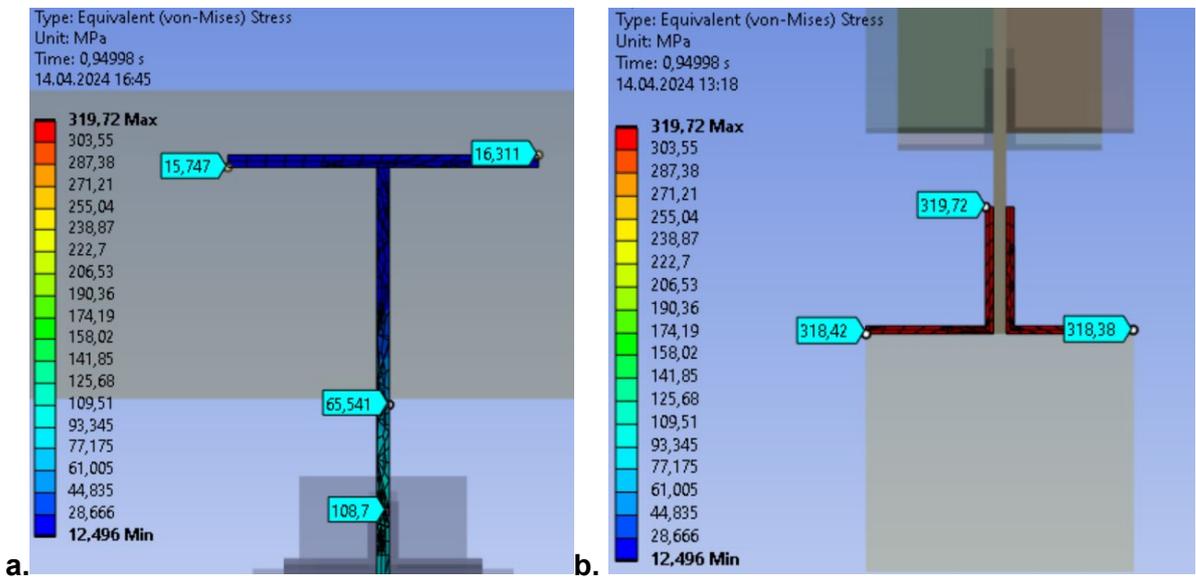


Рис. 13 – Эквивалентные напряжения (а – верхний пояс, б – нижний пояс)
 Fig. 13 – Stress Equivalent (a – upper belt, b – lower belt)

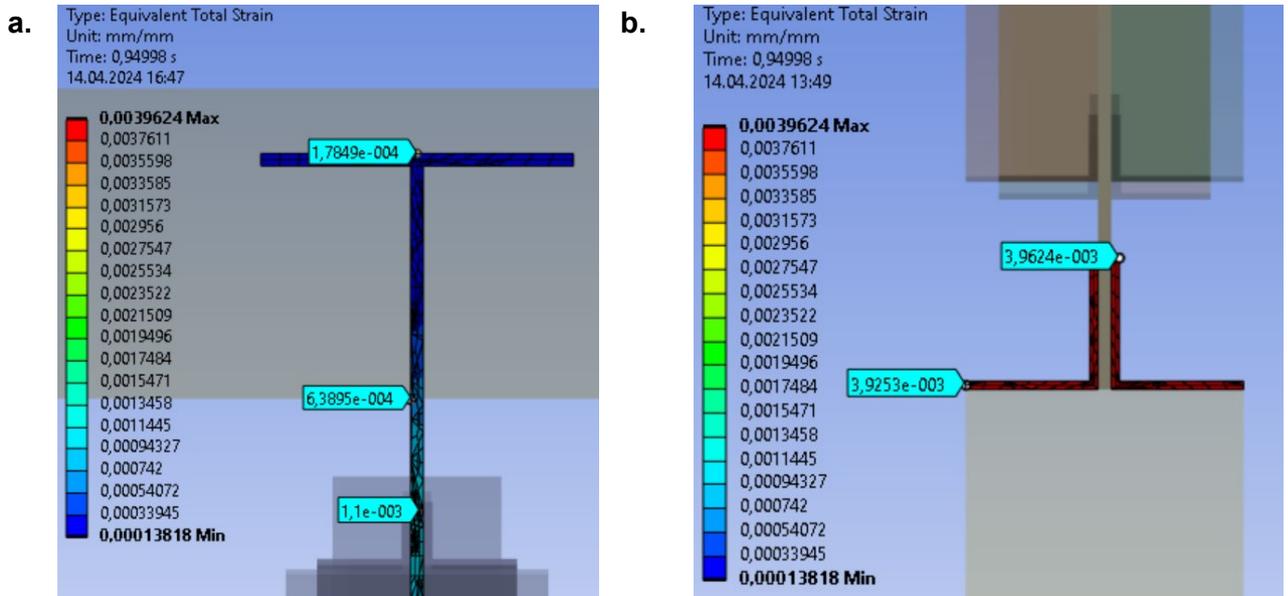


Рис. 14 – Относительные деформации (а – верхний пояс, б – нижний пояс)
 Fig. 14 – Equivalent strain (a – upper belt, b – lower belt)

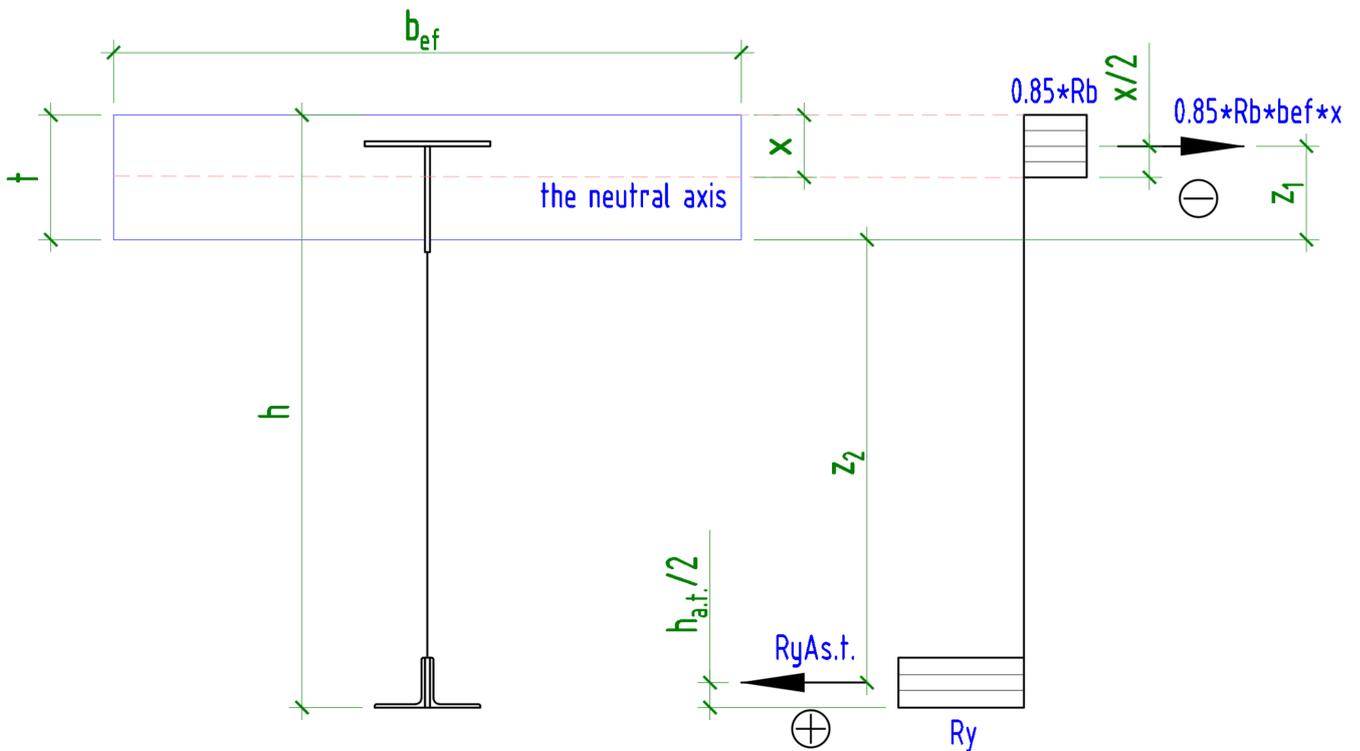


Рис. 15 – Расчетная схема для определения изгибающего момента
 Fig. 15 – Calculation scheme for determining the bending moment

Выражение для определения предельного изгибающего момента будет иметь следующий вид:

$$M_{ult} = 0.85 \cdot R_b \cdot b_{ef} \cdot x \cdot \left(t - \frac{x}{2}\right) + R_y \cdot A_{s.t.} \cdot \left(h - t - \frac{h_{a.t.}}{2}\right) \quad (1)$$

Рассмотрим участок на расстоянии 1500 мм от опоры.

Нормальные напряжения в железобетонной плите (рис. 16). В сжатой зоне 5.43 МПа, что превышает сопротивление бетона на сжатие $R_b, n=18.5$ МПа. В растянутой зоне 1.08 МПа, что не превышает сопротивление бетона на растяжение $R_{bt}, n=1.55$ МПа.

Относительные деформации в железобетонной плите (рис. 17). В сжатой зоне 0.003 мм/мм, что не превышает максимально допустимые относительные деформации $\varepsilon_{b2} = 0.0035$ мм/мм. В растянутой зоне 0.000032 мм/мм, что не превышает максимально допустимые относительные деформации $\varepsilon_{bt2} = 0.00015$ мм/мм.

Эквивалентные напряжения по фон Мизесу (рис. 18). В растянутой зоне 55.06 МПа, что не превышает значение сопротивления стали для упругой работы $R_y=345$ МПа. В сжатой зоне (включая косынку) 341.05 МПа.

Относительные деформации (рис. 19). В растянутой зоне составляют 0.000552 мм/мм, что не превышает значение упругой работы стали 0.00138 мм/мм. В сжатой зоне (включая косынку) 0.004586 мм/мм, что превышает значение упругой работы стали 0.00138 мм/мм.

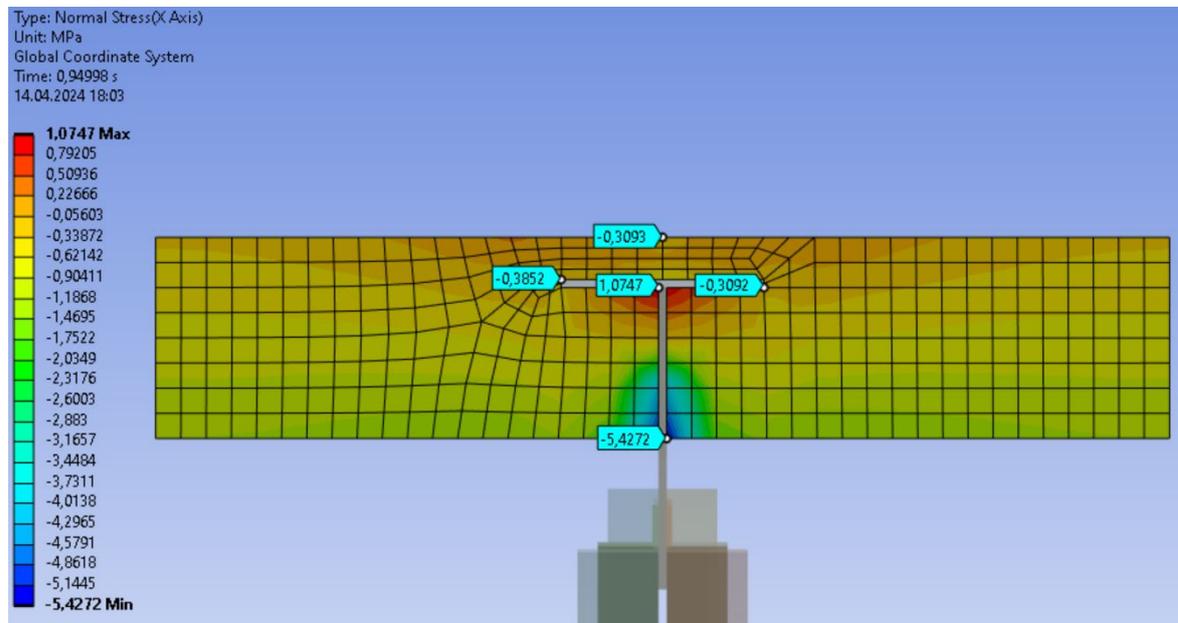


Рис. 16 – Нормальные напряжения
Fig. 16 – Normal stress

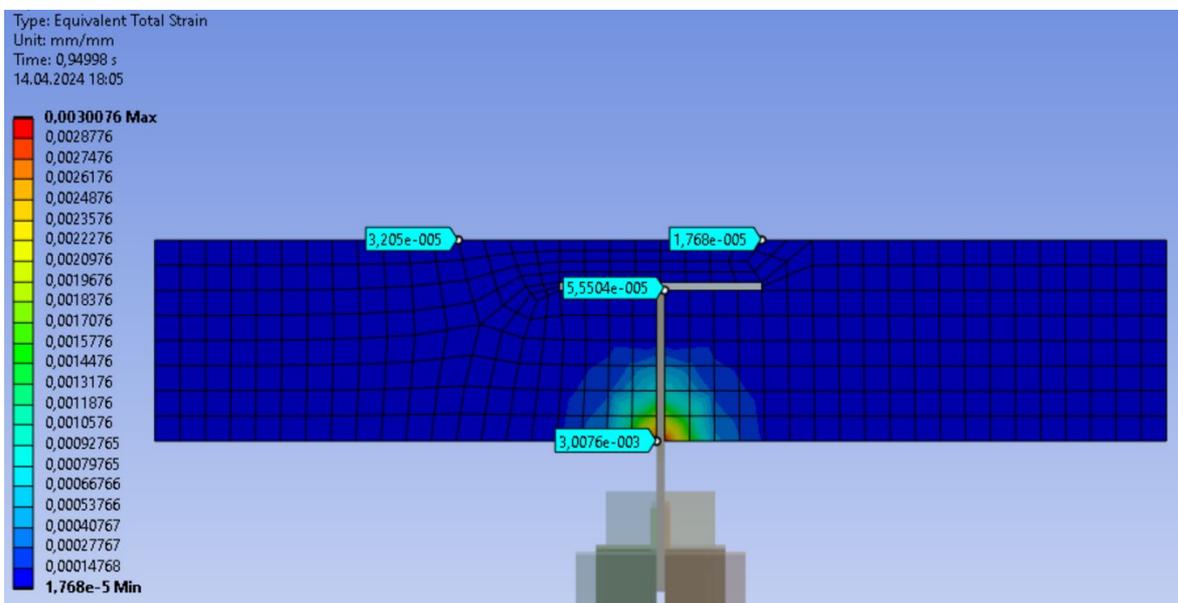


Рис. 17 – Относительные деформации
Fig. 17 – Equivalent strain

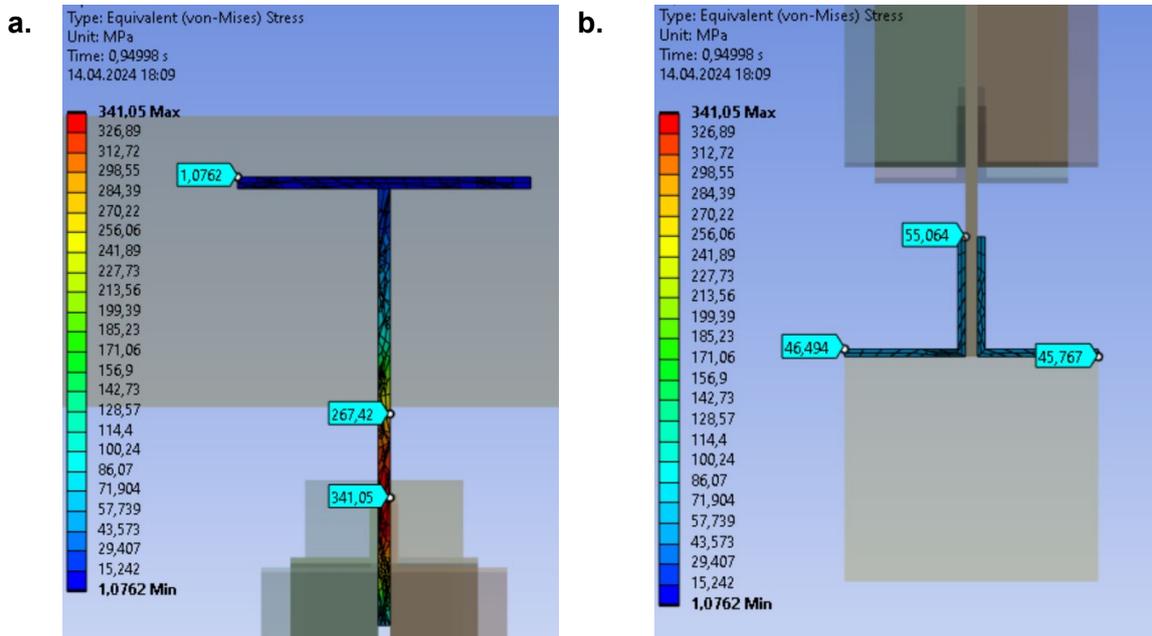


Рис. 18 – Эквивалентные напряжения (а – верхний пояс, б – нижний пояс)
Fig. 18 – Equivalent strain (a – upper belt, b – lower belt)

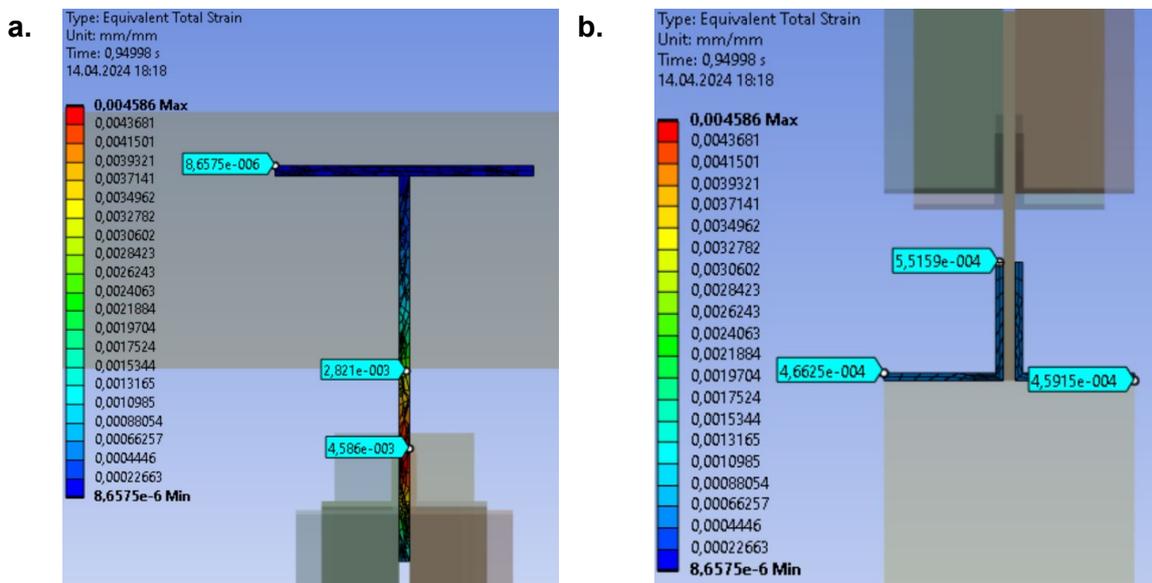


Рис. 19 – Относительные деформации (а – верхний пояс, б – нижний пояс)
Fig. 19 – Equivalent strain (a – upper belt, b – lower belt)

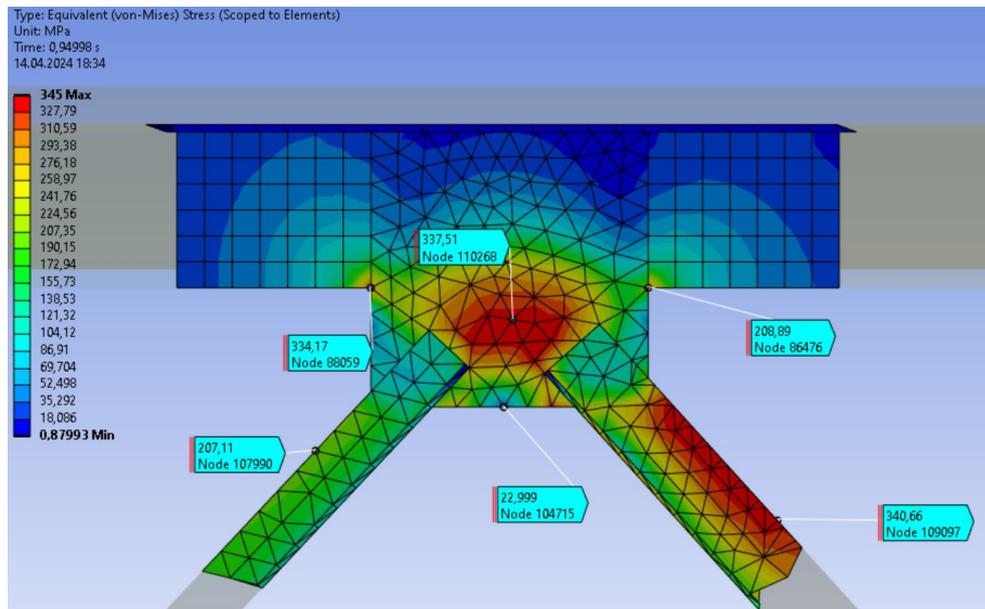


Рис. 20 – Эквивалентные напряжения в узле над опорным раскосом
Fig. 20 – Equivalent stresses in the node above the support brace

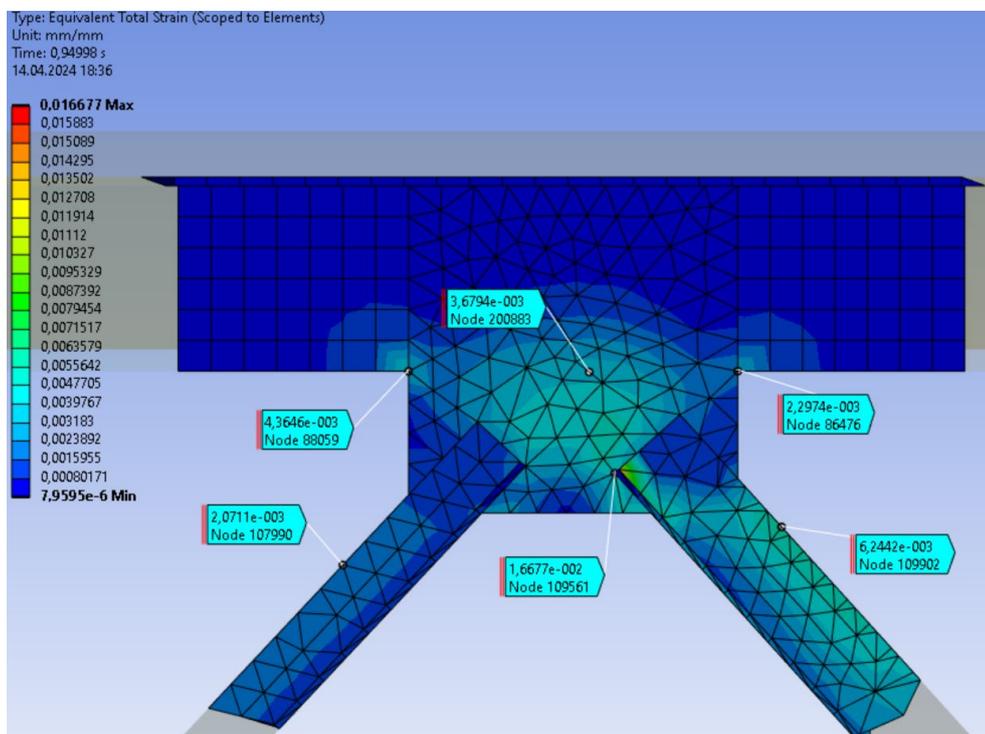


Рис. 21 – Относительные деформации в узле над опорным раскосом
Fig. 21 – Equivalent strain in the node above the support brace

На основе анализа напряженно-деформированного состояния композитной фермы можно сделать вывод, что отказ сечения происходит на участке опорного раскоса вследствие потери устойчивости. Остальные раскосы работают упруго. Нижний пояс фермы находится на площадке текучести. Тавровое сечение, разгружено работает упруго и обеспечивает совместную работу с железобетонной плитой. Железобетонная плита работает по неразрезной схеме вдоль фермы. В растянутой зоне бетона усилия воспринимает арматура.

Предельный изгибающий момент, воспринимаемый композитной фермой численным методом в ПК Ansys [ansys.com] $M_{ult,a} = 1163.8 \text{ кН} \cdot \text{м}$. По формуле (1) $M_{ult} = 1224.36 \text{ кН} \cdot \text{м}$. Несущая способность по нелинейной деформационной модели $M_{ult,ндм} = 1190.98 \text{ кН} \cdot \text{м}$. Расхождения в полученных результатах определение несущей способности композитной фермы в пределах 5%. Наибольшие расхождения с результатами по формуле (1) произошло в следствии



недоиспользовании несущей способности на сжатие железобетонной плиты в расчете ПК Ansys [ansys.com].

Для сравнения несущей способности выбраны: 1) исследуемая композитная ферма; 2) металлическая ферма совместно с профилированным настилом [25]; 3) металлическая ферма совместно с железобетонными сборными плитами [26].

Расчет для 2 и 3 образца выполнен в упругой поставке сечения и характеристики материалов заданы такие же, как у исследуемого сечения. Несущая способность 2-го образца $P_{ult} = 28.8 \cdot 1.22 = 35.14$ т. Несущая способность 3-го образца $P_{ult} = 28.8 \cdot 1.15 = 33.12$ т.

Из анализа несущей способности видно, что исследуемая композитная ферма в 1.24 раза превосходит ферму 2-го образца и в 1.31 раза ферму 3-го образца.

Можно сказать, что при использовании композитной фермы: 1) увеличивается несущая способность; 2) происходит экономия материалов, не требуется установка гибких упоров и других элементов для обеспечения совместной работы фермы и железобетонной плиты; 3) происходит экономия материалов, не требуются горизонтальные связи для раскрепления верхнего пояса фермы.

4 Conclusions

На основании проведенных исследований композитной фермы позволили прийти к следующим выводам:

1. Описаны достоинства предложенного варианта композитной фермы. На основе напряженно-деформированного состояния определен характер разрушения сечения, который происходит при потере устойчивости опорного раскоса.

2. Проанализировано напряженно-деформированное состояние. Применены актуальные теории поведения бетона и стали. Определена высота сжатой зоны сечения.

3. Предложены эпюры нормальных напряжений на участке изгибающего момента для исследуемой композитной фермы.

4. Выполнено сравнение с известными металлическими фермами с разными настилами.

5. Авторами намечены дальнейшие исследования: рекомендации по оптимальному конструированию сталежелезобетонной фермы, испытания сил сцепления между сталью и бетоном.

5 Conflict of Interests

The authors declare that there is no conflict of interest. The authors made equivalent contributions to the publication.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

References

1. Biryukov V.V., Zabalueva T.R., Zaharov A.V. (2011) Long span multistorey sport buildings design. *Architecture and construction of Russia*, **9**, 12-19 <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16949127>
2. Biryukov V.V., Zabalueva T.R., Zaharov A.V. (2012) Long-span multistorey buildings under conditions of dense urban development. *Industrial and Civil Engineering*, **11**, 46-49 <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18189468>
3. Terekhov I. A. (2019) Analysis of space-planning and structural systems in large-span buildings. *Education and science in Russia and abroad*, **5 (51)**, 401-408 <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37026953>
4. Zabalueva T.R. (2023) Architectural and structural problems of modern museum construction. *Construction Materials and Products*, **6 (1)**, 29-42 <https://www.doi.org/10.58224/2618-7183-2023-6-1-29-42>
5. Vinogradova N.A., Shvets G. A. (2020) Studies of bending structures of composite steel and reinforced concrete (review). *FEFU: school of engineering bulletin*, **1 (42)**, 114-127 <http://www.doi.org/10.24866/2227-6858/2020-1-12>



6. Kibireva Iu. A. (2018) The use of steel-concrete structures. *Ekologiya and Stroitelstvo*, **2**, 27-34 <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35433638>
7. Beichen Pu, Xuhong Zhou, Yongjian Liu, Bin Liu, Lei Jiang (2021) Mechanical behavior of concrete-filled rectangular steel tubular composite truss bridge in the negative moment region. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, **8** (5), 795-814 <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2021.09.002>
8. Josef Machacek, Martin Charvat (2014) Study on shear connection of bridge steel truss and concrete slab deck. *Journal of Civil Engineering and Management*, **23** (1), 105-112 <https://doi.org/10.3846/13923730.2014.976258>
9. Josef Machacek, Martin Charvat (2013) Design of Shear Connection between Steel Truss and Concrete Slab. *Procedia Engineering*, **57**, 722-729 <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.04.091>
10. Lisheng Luo, Xiaofeng Zhang (2019) Flexural Response of Steel-Concrete Composite Truss Beams. *Hindawi*, 1-15 <https://doi.org/10.1155/2019/1502707>
11. Guo-an Yin, Fa-xing Ding, Hai-bo Wang, Yu Bai, Xue-mei Liu (2016) Connection Performance in Steel-Concrete Composite Truss Bridge Structures. *Asce*, **22** (3), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0001006](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001006)
12. A. Bouchair, J. Bujnak, P. Duratna (2012) Connection in Steel-Concrete Composite Truss. *Procedia Engineering*, **40**, 96-101 <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.062>
13. Peter Michalek, Jan Bujnak (2019) Experimental and theoretical study of composite trusses. *Transportation Research Procedia*, **40**, 815-822 <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.07.115>
14. Jan Bujnak, Peter Michalek, Zbigniew Perkowski (2019) Experimental and Theoretical Research of Composite Truss Behaviour. *Ernst & Sohn*, **3**, 265-270 <https://doi.org/10.1002/cepa.1054>
15. Jan Bujnak, Peter Michalek, Wieslaw Baran (2018) Experimental and theoretical investigation of composite truss beams. *MATEC Web Conf*, **174**, <https://doi.org/10.1051/mateconf/201817404001>
16. Jan Bujnak, Zbigniew Perkowski (2016) Performance study of composite truss. *Contemporary achievements in civil engineering*, 165-172 <https://doi.org/10.14415/konferencijaGFS.2016.015>
17. J. D. Martins, S. E. Pereira Junior, E. M. Xavier, L. H. A. Neiva, and A. M. C. Sarmanho (2021) Experimental and numerical analysis of composite steel and concrete trusses. *Rev. IBRACON Estrut. Mater*, **14** (2), <https://doi.org/10.1590/S1983-419520210002000010>
18. Augusto O. B. Silva, Newton O. P. Júnior, and João A. V. Requena (2015) Numerical Modeling of a Composite Hollow Vierendeel-Truss. *IACSIT International Journal of Engineering and Technology*, **7** (3), 176-182 <https://www.doi.org/10.7763/IJET.2015.V7.788>
19. Augusto O. B. Silva, Newton O. P. Júnior, and João A. V. Requena (2013) Composite hollow truss with multiple vierendeel panels. *Rem Revista Escola de Minas*, **66** (4), 431-438, <https://www.doi.org/10.1590/S0370-44672013000400005>
20. Karpenko N.I. General models of reinforced concrete mechanics. Moscow. 413 p, <https://search.rsl.ru/ru/record/01001746353?ysclid=lv4219hvng274322270>
21. SP 16.13330.2017. Steel structures. <https://docs.cntd.ru/document/456069588>
22. SP 63.13330.2018. Concrete and reinforced concrete structures. General provisions. <https://docs.cntd.ru/document/554403082>
23. Vasiliev V.N., Anishchenkov V.M., Boyko M.M. Experimental research methodology the joint work of the steel element and concrete on the surfaces of their contact. *Vestnik Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture*. **4**(27), 217-225. http://vestnik-donnasa.ru/?page_id=28
24. Mirsayapov Ilshat., Apkhadze G., Simakov V. (2023) Numerical analysis of nonlinear behavior of reinforced concrete structures on solid models. Monograph. *Kazan State University of Architecture and Engineering*, 211 p. <https://elibrary.ru/fwgpiq>
25. Gimranov L.R. (2010) Spatial rigidity of single-storey multi-span lightweight buildings using profiled flooring with a corrugation height of 153 mm. *Kazan State University of Architecture and Engineering*. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19331102>
26. Krasnoshchekov Yu.V. (2018) Design of structural systems of floors and coatings. Monograph. *Infra-Engineering Publishing House*. Moscow-Vologda. 186 p. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37163315>
27. SP 266.1325800.2016. Steel-reinforced concrete structures. Design rules. <https://minstroyf.gov.ru/upload/iblock/809/266.pdf>
28. Karpenko N.I., Radaykin O.V (2017) About construction of concrete deformation diagrams at uniaxial short-time tension/compression with the use of the damage deformation criterion. *Bulletin of Civil Engineers*, **6**, 71-78. <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2017-14-6-71-78>

Mirsayapov I.; Pavlov M.

Numerical analysis of composite truss;

2024; *Construction of Unique Buildings and Structures*; **111** Article No 11106. doi: 10.4123/CUBS.111.6



29. Kuznetsov I. L., Gainetdinov R. G. (2021) New Central Node of the Upper Belt of the Pitched Truss. *Scientific Journal of Construction and Architecture*, **1 (61)**, 11-17
<https://doi.org/10.36622/VSTU.2021.61.1.001>

30. Kuznetsov I. L., Gainetdinov R. G., Khairullin L. R. (2021) A polygonal arch of two types of unified elements. *Academic Bulletin of URALNIIPROEKT RAASN*, **3 (50)**, 65-69
<https://doi.org/10.25628/UNIIP.2021.50.3.011>