

Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ

Направление – Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей

УДК [UDC] 699.852

DOI 10.17816/transsyst20239430-45

© А.Э. Юницкий<sup>1,2</sup>, Р.А. Шаршов<sup>1</sup>, М.И. Цырлин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ЗАО «Струнные технологии»

<sup>2</sup>ООО «Астроинженерные технологии»

(Минск, Республика Беларусь)

## ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ОПОР РЕЛЬСО-СТРУННОЙ ПУТЕВОЙ СТРУКТУРЫ В ЦЕНТРЕ uSky В ШАРДЖЕ (ОАЭ)

В работе представлен расчет прочности общей схемы и узлов промежуточных опор рельсо-струнной путевой структуры в Центре uSky в Шардже (ОАЭ).

**Цель:** Расчет прочности промежуточных опор при воздействии комплекса нагрузок от путевой структуры, транспортного средства и ветровой нагрузки.

**Методы:** Расчет производился методом конечных элементов при помощи программ – Midas Gen и ANSYS.

**Результаты:** Анализ результатов расчета показал достаточную надежность всех элементов промежуточных опор.

**Ключевые слова:** рельсо-струнная путевая структура, uSky, промежуточная опора, конструкция, расчетная модель, прочность, напряжения.

Rubric 1. TECHNOLOGIES AND PROJECTS

Field – Design and construction of roads, subways, airfields, bridges and transport tunnels

© A.E. Unitsky, R.A. Sharshov, M.I. Tsyrlin

Unitsky String Technologies, Inc.

(Minsk, Republic of Belarus)

## EVALUATION OF STRENGTH OF INTERMEDIATE SUPPORTS OF STRING RAIL TRACK STRUCTURE AT uSky CENTER IN SHARJAH (UAE)

The paper presents strength analysis of the general arrangement and units of intermediate supports of the string rail track structure at the uSky Center in Sharjah (UAE).

**Aim:** Strength analysis of intermediate supports under the impact of a complex of loads from the track structure, vehicle and wind load.

**Methods:** The calculation was performed using the finite element method using Midas Gen and ANSYS programs.

**Results:** Analysis of the calculation results showed sufficient reliability of all elements of the intermediate supports.

**Key words:** string rail track structure, uSky, intermediate support, structure, analysis model, strength, stresses.

## ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ ПУТЕВОЙ СТРУКТУРЫ

Тестовый участок № 1 рельсо-струнной путевой структуры с гибким рельсом в Центре uSky в Шардже (ОАЭ) – инженерное сооружение, состоящее из трех пролетов эстакадной части. Эстакадная часть представляет из себя сваренный поперечными швами U-образный профиль с канатами, размещенными внутри него (далее по тексту – рельс). Эстакада закреплена на промежуточных опорах через шарнирные узлы и на анкерных опорах через жесткие элементы, длина центрального пролета составляет 200 м, двух крайних – по 100 м [1]. Анкерные опоры несут горизонтальную нагрузку от натяжения эстакадной части – канатов и U-образного профиля. Промежуточные опоры воспринимают вертикальную нагрузку от веса путевой структуры, транспортных модулей [2] и ветровые воздействия. Анкерные опоры тестовой трассы № 1 изготовлены из монолитного железобетона, промежуточные опоры – из круглых стальных труб с оттяжками (для улучшения дизайна опор).

Путевая структура предназначена для перемещения грузовых и пассажирских транспортных средств [3]; рассчитана для эксплуатации в условиях тропического климата.

Целью работы являлась оценка несущей способности промежуточных опор рельсо-струнной путевой структуры в Центре uSky в Шардже (ОАЭ).

## ОПИСАНИЕ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ

Для выполнения расчета строились две математические модели. Первая модель выполнена в пакете программного обеспечения Midas Gen 2018 v2.1 для проверки прочности и устойчивости принятых сечений требованиям [4] (Рис. 1), вторая – в пакете программного обеспечения Ansys 19.1 для проверки не типовых узлов и элементов конструкций (Рис. 2).

Модель № 1 в Midas Gen выполнена стержневыми элементами. Основное сечение опоры – труба 450x12 – обычные балочные элементы. Элементам заданы параметры стали S355 с модулем упругости 205 ГПа.

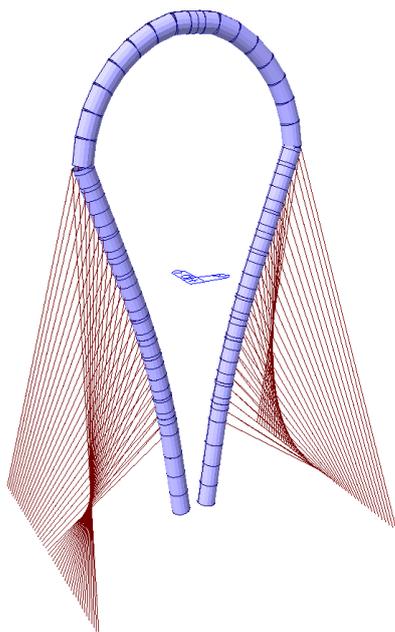


Рис. 1. Расчетная модель № 1



Рис. 2. Расчетная модель № 2

Оттяжки (канаты двойной свивки диаметром 8 мм) – элементы, работающие только на растяжение с приведенным сечением – 5,37 мм и модулем упругости 127 ГПа. Закрепления – по низу основного сечения жесткое защемление в двух плоскостях; канаты – шарнирное закрепление в уровне крепления к фундаменту. В уровне крепления седла к промежуточной опоре модель закреплена по перемещениям из плоскости основной несущей рамы конструкции.

Модель № 2 в Ansys выполнена полностью объемными конечным элементами, за исключением канатов оттяжек – они выполнены стержневыми элементами. Модули упругости элементов приняты также, как и в модели, выполненной в Midas Gen. Закрепления – по типу fixed support по фундаментным болтам, и опора типа compression only в уровне фундаментной пластины.

Узлы базы и крепления седла к промежуточной опоре показаны на Рис. 3 и Рис. 4.

Узел крепления седла представляет собой интерес с точки зрения строительной механики. В общем виде узел относится к фланцевым, с дополнительной центральной пластиной, на которую передается основная вертикальная нагрузка. Дополнительную жесткость в узле создает бетон, которым заполнены трубы, формирующие силовой каркас опоры. Также, в узле включены в работу короткие двутавровые балки – с одной стороны они приварены к пластинам фланцев изнутри, а с другой – передают изгибающие нагрузки на бетон, находящийся внутри опоры, обеспечивая прочность и жесткость узла, превосходящие все типовые варианты, возможные для размещения в заданных габаритах.

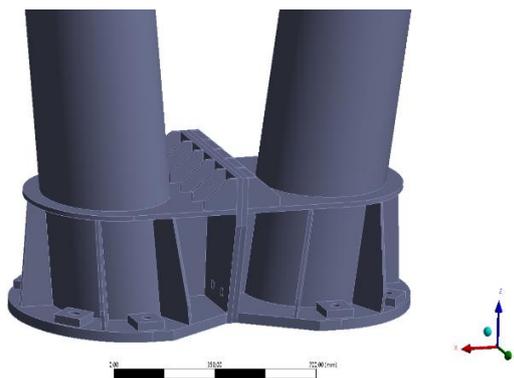


Рис. 3. Опорный узел опоры

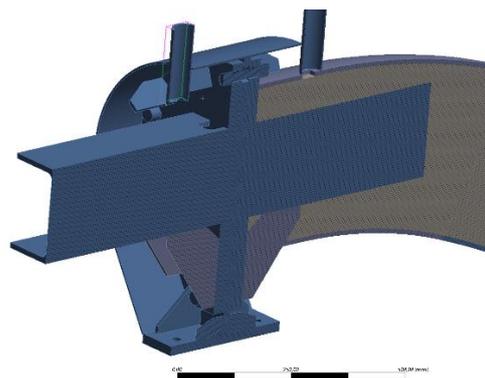


Рис. 4. Узел крепления седла к промежуточной опоре

В расчетной модели моделируется и создается начальное состояние конструкции. В качестве начального состояния рассматривалось равновесное состояние конструкции после натяжения всех вант, равномерно, на 8800 Н каждая при температуре + 35 °С. Такое начальное усилие позволит сохранить натяжение вант при расчетном сочетании нагрузок при + 80 °С и избежать избыточных деформаций и потери формы поверхности, создаваемой вантами.

### РАСЧЕТ КОНСТРУКЦИИ ПО ДЕФОРМАЦИЯМ МОДАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ, МОДЕЛЬ № 1

Максимальное значение вертикальной деформации промежуточной опоры в начальном состоянии наблюдается в верхней части трубы и составляет 10,6 мм (Рис. 5); максимальные значения горизонтальных деформаций приходятся в плоскости рамы и составляют 19,5 мм (Рис. 6).

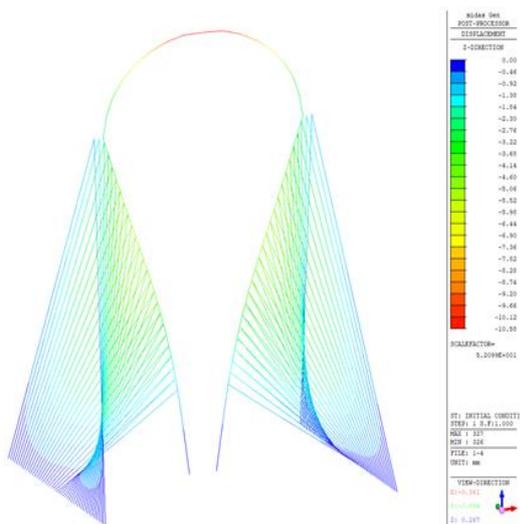


Рис. 5. Вертикальные деформации конструкции

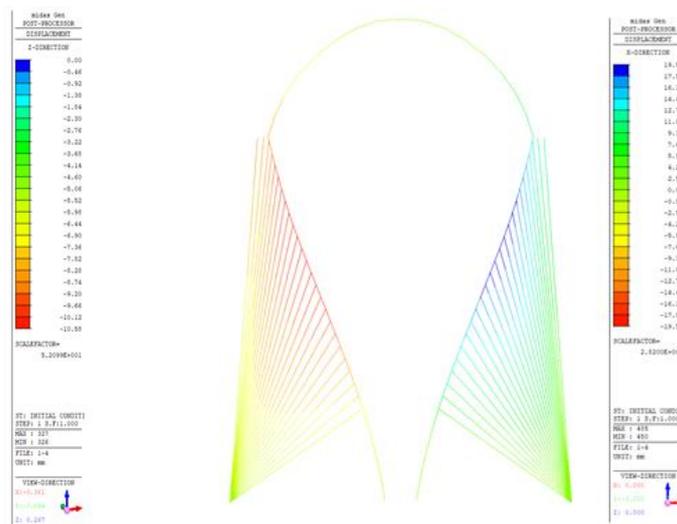


Рис. 6. Горизонтальные деформации в плоскости рамы

Максимальные перемещения соответствуют заданному перемещению конструкции от воздействия транспортного средства в середине пролета и составляют 25,0 мм; максимальное значение горизонтального перемещений верха опоры от максимального ветра в плоскости рамы – 7,6 мм. Деформации конструкции в верхней точке составляют 1/1370 от высоты опоры, в месте максимальных деформаций – 1/440 от высоты опоры (Рис. 7).



Рис. 7. Первая форма собственных колебаний, частота – 1,77 Гц

Первая частота собственных колебаний включает в себя 93,4 % модальной массы на частоте 1,77 Гц. Форма колебаний – преимущественно изгибная, кручение – минимальное. Кручение блокируется канатами оттяжек, которые дают значительную жесткость конструкции, кроме того, основное сечение рамы – труба-бетон, что дает огромную локальную жесткость в узлах.

## РАСЧЕТ КОНСТРУКЦИИ ПО ПРОЧНОСТИ, МОДЕЛЬ №1

Канат, принятый в конструкции – 8.1-Г-1-С-Н-1570 по ГОСТ 3070-88, с расчетным сопротивлением не менее 1570 МПа и разрывным усилием каната в целом ( $N_{t,Rd}$ ) не менее 30450 Н. Наихудшим сочетанием, при котором возникает максимальное разрывное усилие в оттяжке – при воздействии ветра под углом 45° к оси путевой структуры.

Продольные усилия в оттяжках ( $N_{ed}$ ): минимальное – 4554 Н; максимальное значение – 11213 Н.

Согласно пункту 6.2.3 [5] условие прочности для канатов имеет вид:  $\frac{N_{ed}}{N_{t.Rd}} \leq 1$ ; в данном случае:  $\frac{11213}{30450} = 0,37 \leq 1$  условие прочности выполняется. Коэффициент использования сечения составляет 0,87.

Максимальный момент возникает в месте передачи нагрузки от путевой структуры на конструкцию опоры и составляет 600 кН·м (Рис. 8); максимальные растягивающие усилия – в месте передачи нагрузки – от путевой структуры на конструкцию опоры и составляет 129 кН. Сжимающие усилия в месте передачи нагрузки от опоры на фундаменты – 558 кН (Рис. 9).

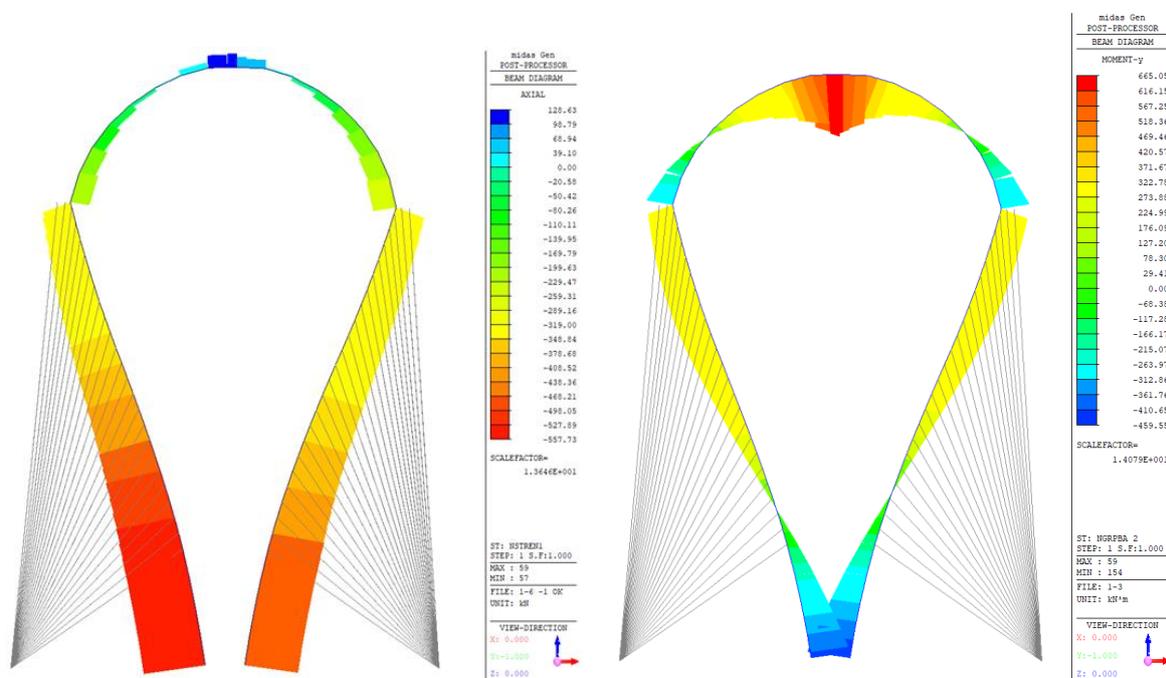


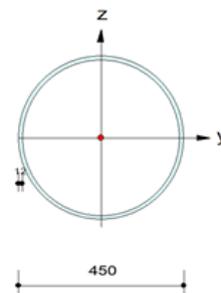
Рис. 8. Распределение продольных сил по конструкции промежуточной опоры

Рис. 9. Распределение моментов сил по конструкции промежуточной опоры

Исходя из проверок сечений, выполненных согласно [5] (Рис. 10), был сделан вывод о достаточной прочности сечений промежуточной опоры.

## 1. Design Information

Design Code : Eurocode3  
 Unit System : N, mm  
 Member No : 59  
 Material : S355 (No:1)  
 (Fy = 355.000, Es = 210000)  
 Section Name : O 450x12 (No:1)  
 (Built-up Section).  
 Member Length : 167.883



## 2. Member Forces

Axial Force Fxx = 161217 (LCB: 2, POS:I)  
 Bending Moments My = 665045340, Mz = 0.00000  
 End Moments Myi = 665045340, Myj = 632247185 (for Lb)  
 Myi = 665045340, Myj = 632247185 (for Ly)  
 Mzi = 0.00000, Mzj = 0.00000 (for Lz)  
 Shear Forces Fyy = 0.00000 (LCB: 3, POS:1/2)  
 Fzz = 206111 (LCB: 1, POS:J)

Outer Dia.	450.000	Wall Thick	12.0000
Area	16512.2	Asz	8256.11
Qyb	47997.0	Qzb	47997.0
Iyy	396268295	Izz	396268295
Iybar	225.000	Zbar	225.000
Wely	1761192	Welz	1761192
Iy	154.914	rz	154.914

## 3. Design Parameters

Unbraced Lengths Ly = 167.883, Lz = 167.883, Lb = 167.883  
 Effective Length Factors Beta\_y = 1.00, Beta\_z = 1.00  
 Equivalent Uniform Moment Factors Beta\_my = 1.00, Beta\_mz = 1.00

## 4. Checking Results

Slenderness Ratio  
 $KL/r = 44.2 < 200.0$  (Memb:164, LCB: 15)..... O.K  
 Axial Resistance  
 $Nsd/Nt_{Rd} = 161217/5328941 = 0.030 < 1.000$  ..... O.K  
 Bending Resistance  
 $Msd_y/M_{Rd_y} = 665045340/743145382 = 0.895 < 1.000$  ..... O.K  
 $Msd_z/M_{Rd_z} = 0/743145382 = 0.000 < 1.000$  ..... O.K  
 Combined Resistance (Tension+Bending)  
 $R_{max1} = (Msd_y/M_{ny\_Rd})^{\alpha} + (Msd_z/M_{nz\_Rd})^{\beta}$   
 $R_{ten} = Nsd/(A \cdot f_y / \gamma_{M1})$   
 $R_{bend} = Msd_y / (W_{ply} \cdot f_y / \gamma_{M0}) + Msd_z / (W_{plz} \cdot f_y / \gamma_{M0})$   
 $R_{max} = \text{MAX}[R_{max1}, R_{ten} + R_{bend}] = 0.925 < 1.000$  ..... O.K  
 Shear Resistance  
 $Vsd_y/V_{y\_Rd} = 0.000 < 1.000$  ..... O.K  
 $Vsd_z/V_{z\_Rd} = 0.105 < 1.000$  ..... O.K

Рис. 10. Проверка прочности сечений промежуточной опоры

## РАСЧЕТ УЗЛОВ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ ОПОРЫ

В составе конструкции промежуточной опоры рассматривалось два узла – узел основания и узел крепления путевой структуры к промежуточной опоре – как наиболее интересные с точки зрения работы конструкции. Работа нижнего узла анализировалась без учета бетона внутри основной трубы несущей конструкции, работа верхнего узла – только с учетом бетона – для обеспечения устойчивости формы сечения.

Оценка напряжений в стальных элементах выполнялась путем анализа величин эффективных напряжений (напряжений по Мизесу). Критерий максимального напряжения по Мизесу основывается на теории Мизеса-Хенки (Mises-Hencky), также известной как теория энергии формоизменения.

Для главных напряжений  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$  напряжение по Мизесу выражается как

$$\sigma_{Mises} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}{2}}$$

Максимальные средние напряжения по конструкции составляют 278 МПа при расчетном сопротивлении стали, из которой изготовлена труба – 355 МПа (Рис. 11).

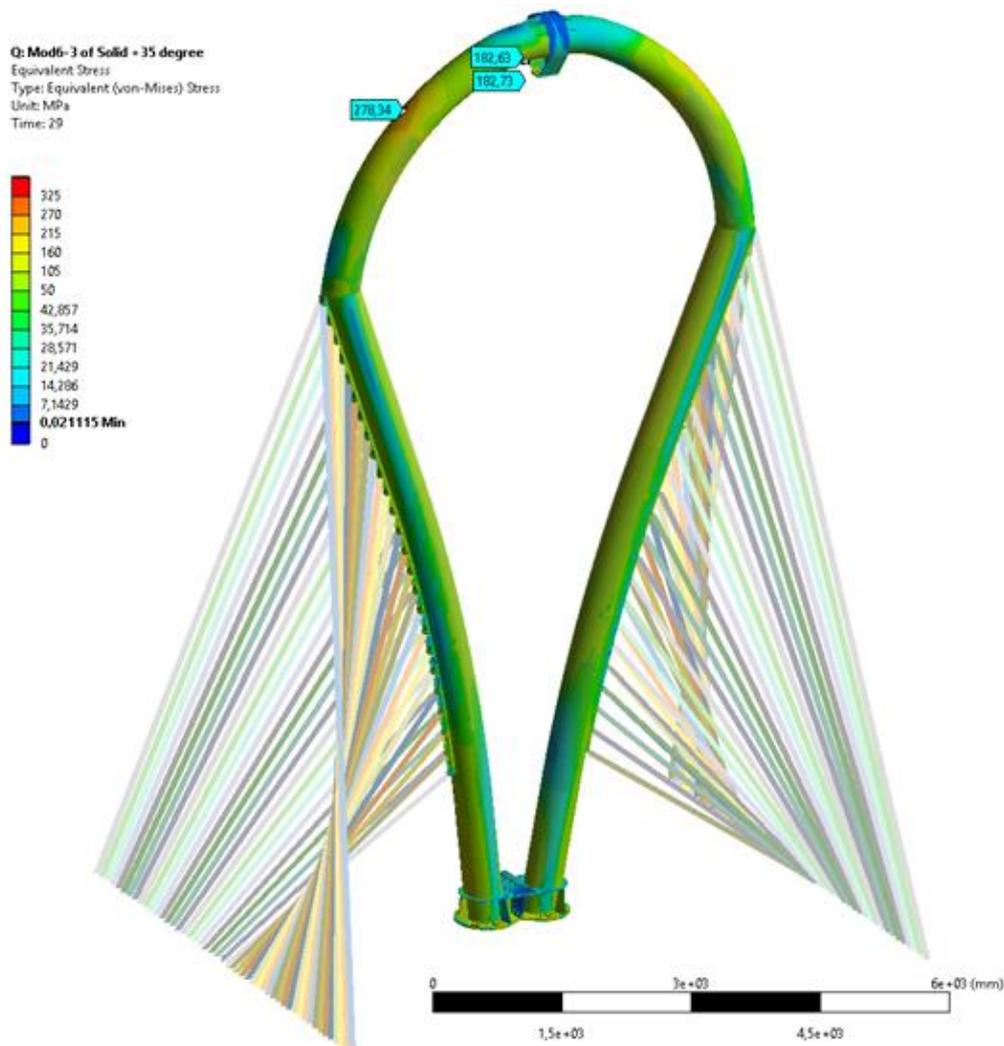


Рис. 11. Напряжения в конструкции по критерию Мизеса

### *Узел крепления путевой структуры к опоре.*

Узел крепления путевой структуры к опоре рассматривался с точки зрения прочности только с учетом наличия бетона внутри основной трубы опоры. Узел рассчитывался на экстремальное воздействие при максимальной вертикальной нагрузке от транспортного средства и путевой структуры. Задача решалась в два этапа – на первом шаге моделировалось предварительное натяжение болтов, на втором шаге прикладывалась расчетная нагрузка.

Максимальные напряжения в узле конструкции опоры составляют 347 МПа в точке (Рис. 12).

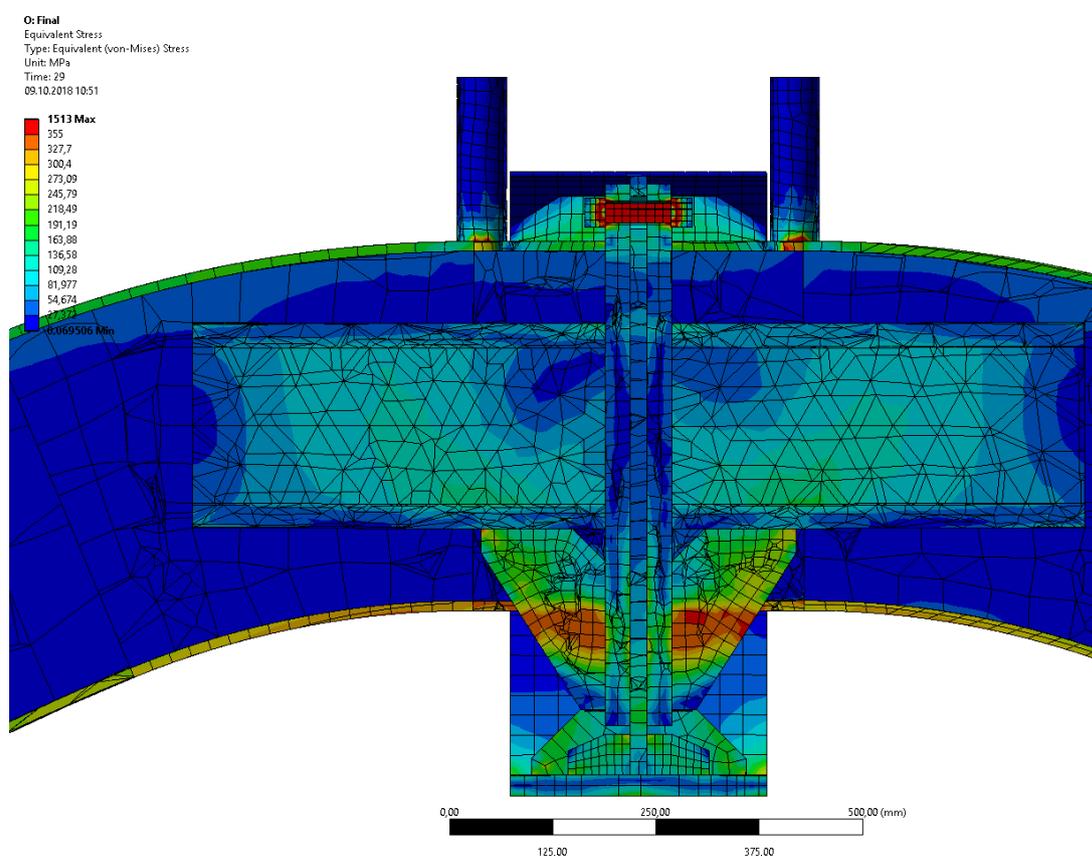


Рис. 12. Напряжения в узле конструкции опоры (разрез поперек опоры)

Максимальные напряжения в бетоне на главных площадках представлены на Рис. 13. Растяжение составляет 0,96 МПа, сжатие – 8,92 МПа. Расчетное сопротивление сжатию – не менее 25,0 МПа, расчетное сопротивление растяжению – не менее 1,8 МПа.

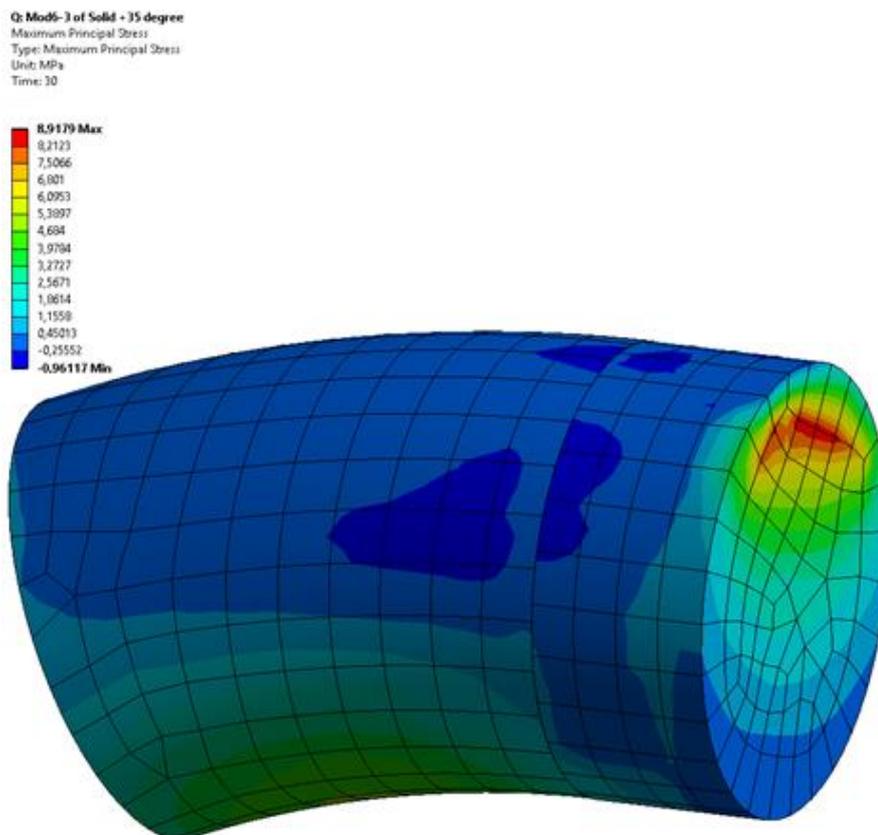


Рис. 13. Максимальные напряжения в бетоне на главных площадках  
(двухтавр условно не показан)

### *Узел основания*

Узел основания рассматривался без учета бетона внутри опоры. Задача решалась в два этапа – на первом шаге моделировалось предварительное натяжение болтов, на втором шаге прикладывалась расчетная нагрузка. Узел рассчитывался на экстремальное воздействие, при максимальной вертикальной нагрузке от транспортного средства и путевой структуры.

Напряжения в узле основания определялись по критерию Мизеса (Рис. 14, 15). Максимальные напряжения составляют 302 МПа в точке при расчетном сопротивлении не менее 355 МПа. Напряжения по болтам достигают 400 МПа, при прочности на разрыв – не менее 70 % от 1100 МПа, составляя 770 МПа.

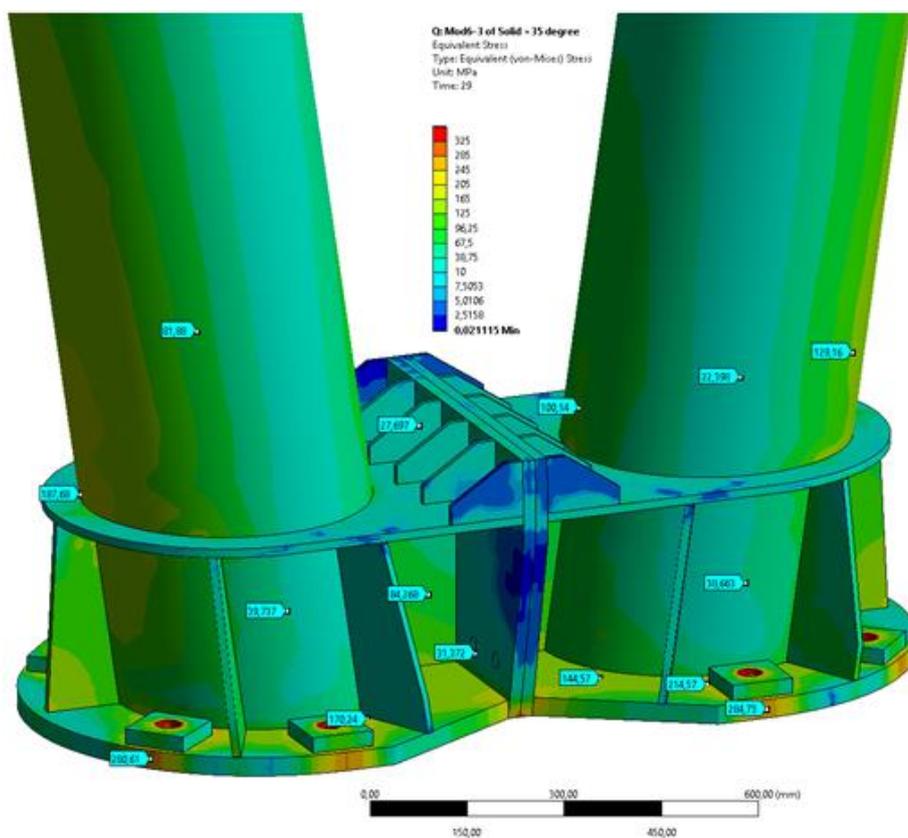


Рис. 14. Напряжения в узле основания

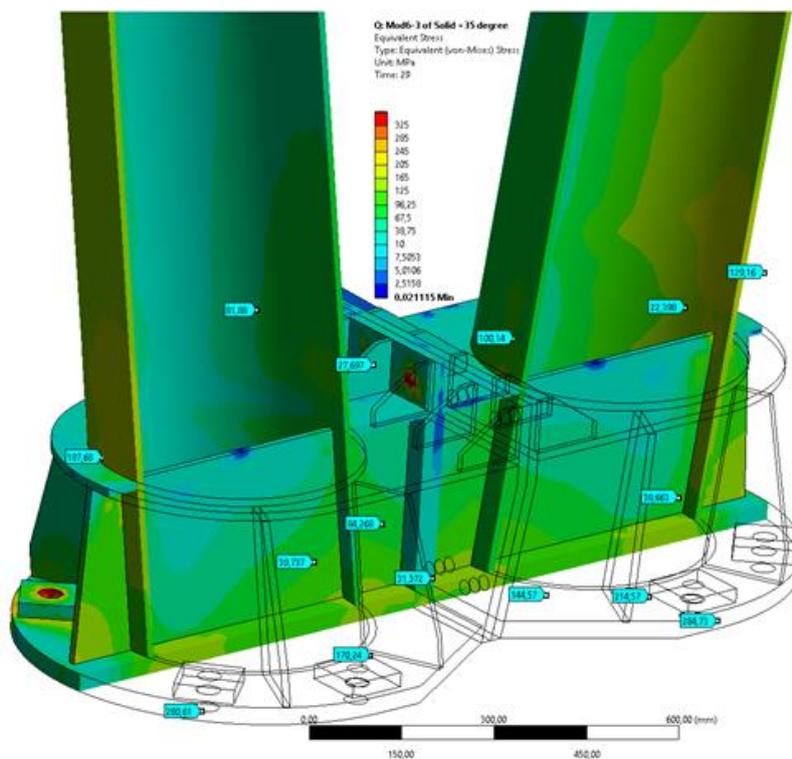


Рис. 15. Напряжения в узле основания (поперечное сечение трубы)

***Процесс создания необходимого начального состояния.***

Конструкция промежуточной опоры изначально рассматривалась как гибкая из-за недостаточной жесткости узла опирания по сравнению с верхней частью опоры, в которую передается нагрузка от путевой структуры. Для обеспечения необходимой частоты собственных колебаний и обеспечения жесткости конструкции проектировались оттяжки структуры и последовательность их натяжения (Рис. 16 и 17).

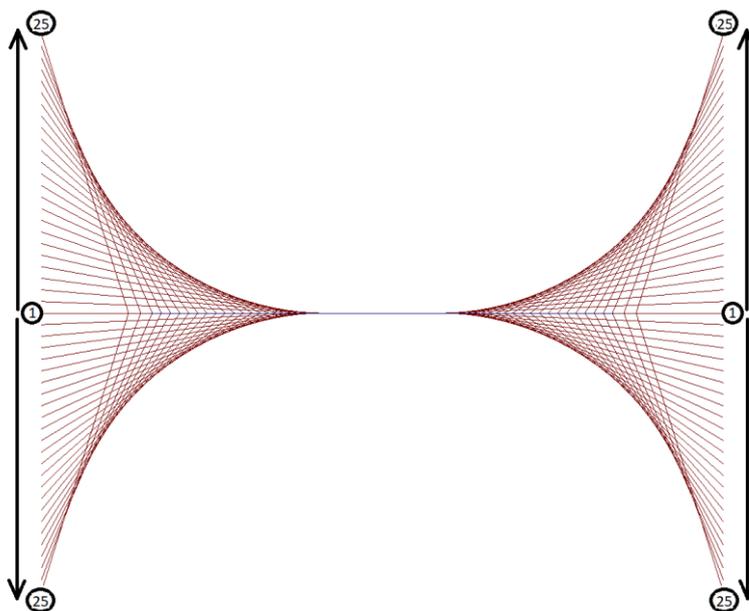


Рис. 16. План промежуточной опоры с указанием направления порядка натяжения



Рис. 17. Фасад опоры с указанием порядка натяжения

Натяжения производятся от центрального каната оттяжек (стоящей без угла в плане) до наиболее удаленного от нее. Такой порядок натяжения позволяет с наименьшей вероятностью получить отклонения в создании начального состояния промежуточной опоры для наиболее нагруженных оттяжек.

Канаты натягиваются по 4 шт. в диагональном порядке. Пример натяжения одного шага натяжения, состоящего из 4-х действий, показан на Рис. 18.

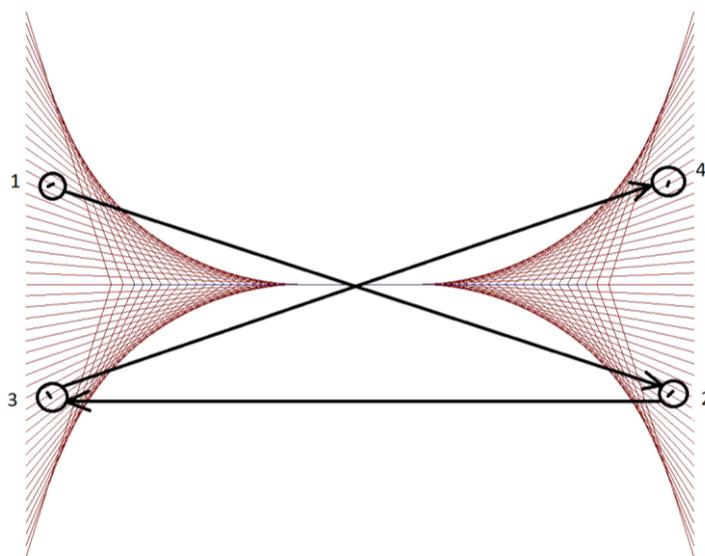
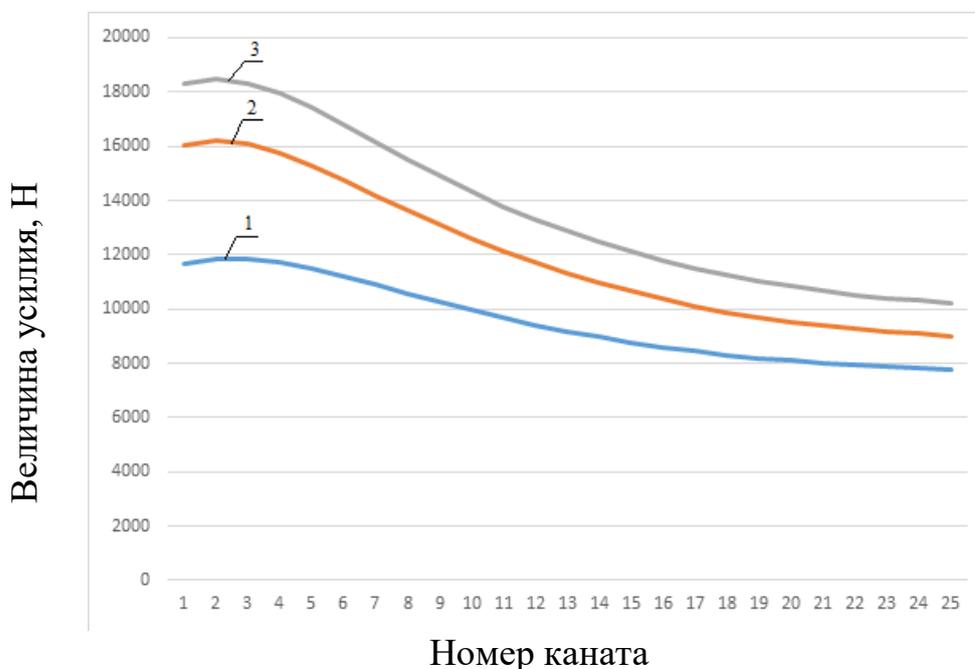


Рис. 18. Схема натяжения одного шага натяжения канатов

Величины натяжения канатов приведены на Рис. 19.



1 – при 0 °C; 2 – при +35 °C; 3 – при +70 °C

Рис. 19. Натяжения канатов, Н в зависимости от температуры и номера каната (оттяжки)

Представленные результаты позволили оценить прочность промежуточных опор при действии путевой структуры, транспортного средства, ветровой нагрузки.

Анализ результатов расчета показал высокую надежность конструкции промежуточной опоры, гарантирует безопасную эксплуатацию путевой структуры не менее 100 лет при круглогодичной эксплуатации с интервалом движения юнимобилia около 2 минут.

Выполненные расчеты были использованы при проектировании и строительстве тестового участка рельсо-струнной путевой структуры в Центре испытаний и сертификации uSky Transport в Шардже (ОАЭ) (Рис. 20).



Рис. 20. Гибкая рельсо-струнная путевая структура в Центре uSky Transport в Шардже

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе произведен расчет прочности промежуточных опор при воздействии путевой структуры, транспортного средства, ветровой нагрузки. Анализ результатов расчета доказывает высокую надежность конструкции промежуточных опор.

## Библиографический список / References

1. Юницкий А.Э., Хлебус А.С., Цырлин М.И. Оценка жесткости гибкого рельса и напряженно-деформированного состояния элементов рельсо-струнной путевой структуры в центре uSky в Шардже (ОАЭ) // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2022. – Т. 8. – № 3. – С. 45–62. [Yunitskii AE, Khlebus AS, Tsyrlin MI. Evaluation of flexible rail rigidity and stress-strain state of elements of string rail track structure at the uSky center in Sharjah (UAE). *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2022;8(3):45-62. (In Russ.)]. doi: 10.17816/transsyst20228345-62
2. Юницкий А.Э. Струнные транспортные системы: на Земле и в Космосе. – Силакросс: ПНБ принт, 2019. – 576 с. [Yunitskii AE. *Strunnye transportnye sistemy: na Zemle i v Kosmose*. Silakross: PNB print; 2019. 576 p. (In Russ.)]. Доступно по: <https://www.rulit.me/books/strunnye-transportnye-sistemy-na-zemle-i-v-kosmose-read-488548-1.html> Ссылка активна на: 26.09.2023.
3. Юницкий А.Э. Инновационные транспортно-инфраструктурные технологии uST / Альбом. – Минск: ЗАО «Струнные технологии», 2021. – 94 с. [Yunitskii AE. *Innovatsionnye transportno-infrastrukturnye tekhnologii uST*. Album. Minsk: Unitsky String Technologies, Inc.; 2021. 94 p. (In Russ.)]. doi: 10.20291/2311-164X-2022-2-3-7
4. ТКП EN 1992-1-1-2009. Еврокод 2. Проектирование железобетонных конструкций. Часть 1-1. Общие правила и правила для зданий. – Минск: Минстройархитектуры РБ, 2015. – 205 с. [TCCP EN 1992-1-1-2009. *Eurocode 2. Design of reinforced concrete structures. Part 1-1. General Building Rules and Regulations*. Minsk: Ministry of Construction and Architecture of the Republic of Belarus, 2015. – 205 p. (In Russ.)]. Ссылка активна на 21.11.2023. Доступно по: <https://studfile.net/preview/5617412/>
5. ТКП EN 1993-1-9-2009. Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций. Часть 1–9. Усталостная прочность. – Минск: Минстройархитектуры РБ, 2010. – 43 с. [TCCP EN 1993-1-9-2009. *Eurocode 3. Design of steel structures. Part 1–9. Fatigue strength*. Minsk: Ministry of Construction and Architecture of the Republic of Belarus, 2010. – 43 p. (In Russ.)]. Ссылка активна на 21.11.2023. Доступно по: <https://normy.by/tnpa/1/3402.pdf>

### Сведения об авторах:

**Цырлин Михаил Иосифович**, кандидат технических наук, ведущий специалист;  
eLibrary SPIN: 9548-6321; ORCID: 0000-0002-2983-3255  
E-mail: m.tsirlin@unitsky.com

**Юницкий Анатолий Эдуардович**, председатель совета директоров, генеральный конструктор;  
E-mail: a@unitsky.com

**Шаршов Роман Александрович**, начальник бюро;  
E-mail: r.sharshov@unitsky.com

**Information about the authors:**

**Michael I. Tsyrlin**, Candidate of Technical Sciences, Leading Specialist  
eLibrary SPIN: 9548-6321; ORCID: 0000-0002-2983-3255  
E-mail: m.tsirlin@unitsky.com

**Anatoli E. Unitsky**, Chairman of the Board of Directors and General Designer  
E-mail: a@unitsky.com

**Roman A. Sharshov**, Head of the bureau;  
E-mail: r.sharshov@unitsky.com

**Цитировать:**

Юницкий А.Э., Шаршов Р.А., Цырлин М.И. Оценка прочности промежуточных опор рельсо-струнной путевой структуры в центре uSky в Шардже (ОАЭ) // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2023. – Т. 9. – № 4. – С. 30–45. doi: 10.17816/transsyst20239430-45

**To cite this article:**

Unitsky AE, Sharshov RA, Tsyrlin MI. Evaluation of the strength of intermediate supports string-rail track structure at the uSky center in Sharjah (UAE). *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2023;9(4):30-45. doi: 10.17816/transsyst20239430-45