



Research Article Received: June 6, 2024

Accepted: June 20, 2024

ISSN 2304-6295

### Published: June 29, 2024 Lightweight steel concrete trusses

Rybakov, Vladimir Aleksandrovich<sup>\*1</sup> Ogurtsov, Mikhail Vladimirovich<sup>2</sup> 0 Dentsel, Ilva Sergeevich<sup>2</sup> Tsvetkova, Anna Andreevna<sup>3</sup> D 😢

<sup>1</sup> Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia; fishermanoff@mail.ru (R.V.A);

<sup>2</sup> LLC «Stroypanel», Leningradskaya oblasť, Russia; ogurtsov@stroypanel.ru (O.M.V.); dentsel94@mail.ru (D.I.S);

<sup>3</sup> LLC «Sovbi», St. Petersburg, Russia; <u>annatsvetkova2014@mail.ru</u> (T.A.A.). Correspondence:\* email fishermanoff@mail.ru; contact phone +79118297767

### Keywords

Lightweight steel concrete structures, lightweight steel concrete trusses, foam concrete, strengthening

### Abstract:

The object of the study is lightweight steel concrete trusses consisting of light gauge steal profiles and foam lightweight cellular concrete filling. The goal of the study is to propose and substantiate a method of strengthening light gauge steel trusses. **Methods**. The technology based on filling the space between the elements of the truss with foam concrete "Sovbi" is proposed as a method of strengthening. Results. Numerical modelling of filling the space between the elements of the truss with «Sovbi» foam concrete showed that the structure is being unloaded. The factor of use of the material decreased to 0.87 when using foam concrete with the density of 200 kg/m<sup>3</sup> and to 0.74 when using the foam concrete with the density of 400 kg/m<sup>3</sup>. When using foam concrete with the density of 200 kg/m<sup>3</sup>, the deflections in the structure decreased by 17%, internal longitudinal forces in the elements of the truss decreased by 20%. When using foam concrete with the density of 400 kg/m<sup>3</sup>, displacement in the structure decreased by 27%, internal longitudinal forces in the elements of the truss decreased by 29%.

#### Introduction 1

Бурное развитие теории легких стальных тонкостенных конструкций (ЛСТК), вопросов их конечноэлементного моделирования [1,2], общей и местной устойчивости данного типа конструкций [3.4], редукции сечений ЛСТК-профилей [5]; их огнестойкости [6], сейсмостойкости [7] общих вопросов проектирования ЛСТК [8,9], многочисленные экспериментальные исследования различного типа конструкций ферм [10-12], колонн [13,14], в том числе с использованием комбинированных сечений [15,16], а также соединений ЛСТК-конструкций [17] и активное внедрение ЛСТК в практику строительства на протяжении последних десятилетий привело к появлению большого количества построек данного типа. К сожалению, ошибки при проектировании фундаментов и каркаса здания, ошибки при монтаже конструкций, а также такие запроектные воздействия, такие, как например, чрезмерно обильные снегопады в сочетании с зимними оттепелями, приводят к неравномерным осадкам основания и недопустимым прогибам в конструкции и ее аварийному состоянию.

Не все способы усиления стальных ферм, описанные, например, в [18], совместимы с ЛСТК-технологией. Более того, способ усиления ферм, основанный на увеличении сечения их отдельных элементов требует трудоемкого расчета и рассмотрения большого числа вариантов для выбора оптимального и пересчета редуцированных характеристик обновленного сечения.



Одним из способов совершенствования технологии ЛСТК, направленных на устранение таких недостатков тонкостенных профилей и наиболее вероятных причин выхода из строя ЛСТК-конструкций, как потеря общей и местной устойчивости элементов профиля и депланация сечений, является технология, основанная на заполнении пространства между профилями пенобетоном [19], пенобетоном с заполнителям на песке из пустыни (desert sand) [20] или полистиролбетоном [21].

К достоинствам композитных конструкций из стали и бетона можно отнести и повышение предела огнестойкости таких конструкций по сравнению со стальными [22–24]

Исследованию совместной работы ЛСТК и бетона посвящен ряд публикаций.

Работу балок из ЛСТК и бетона в зависимости от частоты расположения саморезов в балке исследовали Setyowulan D., Nuralinah D., Suryo E., Ramadhani S., Prabandari E [25], работу ферм - Thippeswami B., Waghmare S. Kumar S. [26].Технике моделирования балок их ЛСТК и бетона и сравнению результатов численного моделирования и натурного эксперимента посвящена работа коллектива авторов во главе с Rahnavard R[27].

Lisantono A., Wigroho H., Sari M. в [28] считают целесообразным использование конструкций из ЛСТК и легкого бетона в сейсмических районах, в связи с невысоким значением отношения веса к несущей способности.

Ранее в [19] нами было подтверждено, что использование пенобетона в легких стальных бетонных конструкциях (ЛСБК) позволяет повысить коэффициент условий работы конструкции. Факт повышения устойчивости композитных ЛСТК обоснован также в экспериментальном исследовании Güldür H., Baran E., Topkaya C [29], которые провели испытания образцов ферм из ЛСТК, сжатый пояс которых был заполнен бетоном.

Все вышесказанное позволяет сформулировать цель настоящего исследования: предложить способ усиления аварийных ЛСТК-конструкций основанный на заполнении пространства между профилями ЛСТК пенобетоном пониженной плотности (в дальнейшем - ЛСБК-технологии).

### 2 Materials and Methods

Рассмотрим способ усиления аварийной ЛСТК-фермы здания, общий вид которого представлен на рисунке 1. Фотографии аварийной ЛСТК-фермы представлены на рисунке 2



Fig. 1 – The overall view of the building in disrepair





a)

b)

Fig. 2 – The construction of the truss in disrepair

Фермы расположены с шагом 6м и имеют три пролета: крайний левый пролет 10м, два пролета по 12 метров. Шаг ферм 6 метров. Схема фермы представлена на рисунке 3.

Вследствие обильных снегопадов в декабре 2023 года, вкупе с оттепелями, снеговая нагрузка превысила проектное значение, а ошибки при учете геологических условий при проектировании фундамента привели к неравномерным осадкам: согласно исполнительной съемке смещение опоры по оси В составило 7 мм, опоры по оси Д1- 17мм, опоры по оси И - 22 мм.

В настоящее время ферма поддерживается временными подпорками.







Сечения элементов данной фермы представлены на рисунке 4. Сечение верхнего пояса состоит из двух стоечных профилей 250-50-16-1,5 и двух профилей 89-50-16-1,5, нижний пояс состоит из трех профилей 89-50-16-1,5, сечения стоек и раскосов состоят из двух профилей 89-50-16-1,5. В местах сопряжения нижнего пояса со стойками сечение усилено профилями 250-50-16-1,5.



# Fig. 4 – The cross-sections of the elements of the truss: a) top chord; b) bottom chord; c) diagonals d) reinforced bars

Замоделируем данную расчетную ситуацию в SCAD Office: учтем экстремальную снеговую нагрузку с помощью повышающего коэффициента 1.3, неравномерные осадки фундамента зададим с помощью функции «Заданные перемещения» и проведем расчет с учетом геометрической нелинейности. Результат расчета сечений в постпроцессоре «Сталь» представлен на рисунке 5.



Критическ	ий фактор
2,02 0,99	315
2 0,99 1,01	1
1.01 1.32	23

# Fig. 5 – The section utilization factor before strengthening with foam concrete (without consideration the loading sequence)

Проверим, достаточно ли мероприятий по очистке покрытия от снега и устранения неравномерных осадок фундамента для восстановления работоспособности фермы, для этого произведем имитацию ремонтных работ.

Зададим следующие стадии монтажа: исходная стадия, без снеговой нагрузки, возвращение фермы в проектное положение.

Результаты расчета перемещений, усилий и коэффициента использования сечений на третьей стадии монтажа представлены на рисунке 6.



Fig. 6 – The results of the calculation before strengthening with foam concrete ( considering loading sequence). a) Vertical displacements in the construction; b) Longitudinal forces in the construction; c) The section utilization factor

Неработоспособными элементами в данной ферме являются раскосы с площадью сечения A = 6.347см<sup>2</sup>.

Усилия в данных элементах составляют N= 263.47 кH, таким образом напряжения составят 415МПа, что превышает предел текучести стали C345 в 1.2 раза.

Разработаем способ усиления данной аварийной конструкции пенобетоном «Совби» с учетом [30] (рисунок 7).





Отера-section profile ПШ-50-1.2

Fig. 7 – The layout of omega-section profiles over the surface of the truss

В качестве несъемной опалубки будем использовать фиброцементные листы толщиной 8мм, которые будем крепить самонарезающими винтами Harpoon HD-R 4.8x16 к омега-профилям в шести точках (рисунок 9). Омега-профили ПШ-50-1.2, в свою очередь, разместим по всей площади фермы с шагом 600мм по высоте (Рисунок 8) и прикрепим их к элементам фермы саморезами Harpoon HD-R 5.5x25 [31]. В фиброцементных листах выполним отверстия Ø60мм через каждые 2м по длине фермы для подачи раствора пенобетона. В отдельных местах раскосов целесообразно выполнить отверстия Для возможности затекания пенобетона внутрь сечения раскоса.

Имеется возможность применять различные марки бетона от D200 до D1000, в зависимости от степени повреждения конструкции, с увеличением марки бетона увеличивается степень разгрузки усиливаемой конструкции.



Fig. 8 – Fragment 1 of fig. 7. The scheme of omega-section profiles layout





4.8x16

Fig. 8 – Fragment 1 of fig. 7. The fiber-cement sheets layout



Fig. 9 – The A-A cross-section



# 3 Results and Discussion

Сравним результаты усиления конструкции аварийной фермы с заполнением пенобетоном по двум вариантам – плотностью D200 и D400. Добавим в расчетную схему, рассмотренную в предыдущем разделе – еще одну стадию монтажа – заполнение пространства между стержнями фермы пенобетоном (рисунок 10). Будем моделировать пенобетон в виде пластинчатых конечных элементов с шагом 0.3м. Согласно [30]плотность пенобетона D200 – 200кг/м<sup>3</sup>, модуль упругости – 290МПа, плотность пенобетона D400 – 400кг/м<sup>3</sup>, модуль упругости – 960МПа.Толщина пластинчатых элементов – 140мм. Результаты расчета представлены на рисунках 11,12.



Fig. 10 – The calculation model after adding finite elements of foam concrete









. Fig.12 – The results of the calculation with D400 foam concrete: a) Vertical displacements in the construction; b) Longitudinal forces in the construction;c) The section utilization factor

Сведем полученные результаты в таблицу 1.

 Table 1. Comparison of calculation results before and after adding foam concrete to the calculation model

Состояние конструкции	Максималь- ные верти кальные перемеще ния, мм	Максималь- ные продольные усилия в стойках, раскосах, кН	Максималь- ные напряжения в стойках, раскосах МПа	Максималь- ный коэффициент использования сечения
До усиления пенобетоном	-20.78	-263.47	415	1.47
После усиления пенобетоном D200	-17.13	-212.8	335	0.87
После усиления пенобетоном D400	-15.16	-187.77	295	0.74

### 4 Conclusions

В результате исследования достигнуты следующие результаты:

1) предложены легкие сталебетонные фермы (ЛСБФ), состоящие из стальных тонкостенных оцинкованных профилей и монолитного пенобетона пониженной плотности от 200 кг/м<sup>3</sup> до 400 кг/м<sup>3</sup>, как способ усиления аварийных ферм на основе ЛСТК.

2) показано, что в результате применения пенобетона марки по плотности D200 для трехпролетной ЛСБФ с пролетами 10 и 12м перемещения в конструкции уменьшились на 17%,



внутренние продольные усилия в стойках и раскосах на 20%, коэффициент использования сечения – на 40%.

3) показано, что в результате применения пенобетона марки по плотности D400 для трехпролетной ЛСБФ с пролетами 10 и 12м перемещения в конструкции уменьшились на 27%, внутренние продольные усилия в стойках и раскосах на 29%, коэффициент использования сечения – на 50%.

# 5 Fundings

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23–29-00564, <u>https://rscf.ru/project/23-29-00564/</u>.

# 6 Conflict of Interests

The authors declare no conflict of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses, or interpretation of data; in the writing of the manuscript; or in the decision to publish the results.

### References

- 1 Lalin V. Rybakov V. Morozov S. (2012) The Study of Finite Elements for the Calculation of Thin-Walled Cold-Formed Metal Systems. *Magazine of Civil Engineering*, **1(27)**, 53-73. https://doi.org/10.5862/MCE.27.7.
- 2 Lalin V. Rybakov V. (2011)Finite Elements for Calculation Enclosure Structures Made of Thin Walled Lightweight Profiles. *Magazine of Civil Engineering*, **8(26)**, 69-80. https://doi.org/10.5862/MCE.26.11.
- 3 Silvestre N. Camotim D. (2004) Distortional Buckling Formulae for Cold-Formed Steel C and Z-Section Members: Part I—Derivation. *Thin-Walled Structures*. Vol. 42, **11**, 1567-1597. https://doi.org/10.1016/J.TWS.2004.05.001.
- 4 Lalin V. Rybakov V. Diakov S. Kudinov V. Orlova E. (2019) The Semi-Shear Theory of V.I. Slivker for the Stability Problems of Thin-Walled Bars. *Magazine of Civil Engineering*, **87(3)**, 66-79. https://doi.org/10.18720/MCE.87.6.
- 5 Rasmussen K. (2023) Stiffness Reduction of Cold-Formed Steel Structures Subject to Sectional Buckling and Yielding. *Journal of Structural Engineering*, Vol. 149, **11**, 23-35. https://doi.org/10.1061/JSENDH.STENG-12655.
- 6 D. Pronin A. Pekhotikov V. Pavlov T. Nazmeeva A. Zhuravlev. (2021) Specificity of Fire Resistance Tests of Building Structures Using Cold-Rolled Galvanized Profiles. Industrial and Civil Engineering, **10**, 30-35. https://doi.org/10.33622/0869-7019.2021.10.30-35.
- 7 Schafer B.W. (2016). Seismic Response and Engineering of Cold-Formed Steel Framed Buildings. *Structures*, **8**, 197-212. https://doi.org/10.1016/J.ISTRUC.2016.05.009.
- 8 Hancock J. (2003) Cold-Formed Steel Structures. *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 5, **4**, 473-487. https://doi.org/10.1016/S0143-974X(02)00103-7.
- 9 Tharmarajah G., Doren K. (2023) Cold Formed Steel for Residential Construction .Design Philosophy and Durability Concerns, *Preprints*, **2023090106**, 1-14. https://doi.org/10.20944/preprints202309.0106.v1.
- 10 Dawe, J.L., Liu, Y. and Li, J.Y. (2010) Strength and Behaviour of Cold-Formed Steel Offset Trusses. *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, **66**, 556–565. https://doi.org/10.1016/J.JCSR.2009.10.015.
- 11 Reda, M., Sharaf, T., ElSabbagh, A. and ElGhandour, M. (2019) Behavior and Design for Component and System of Cold-Formed Steel Roof Trusses. *Thin-Walled Structures*, Elsevier, **135**, 21–32. https://doi.org/10.1016/J.TWS.2018.10.038.
- 12 Pedreschi R. Sinha B. (2008) An Experimental Study of Cold Formed Steel Trusses Using Mechanical Clinching. *Construction and Building Materials*, Vol.22, **5**, 921-931. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.12.014.
- 13 Young B., Rasmussen K. Kim J. (2000) Inelastic Bifurcation of Cold-Formed Singly Symmetric Columns. *Thin-Walled Structures*, Vol. 36, **3**, 213-230. https://doi.org/10.1016/S0263-8231(99)00046-4.



- 14 Liao, F., Wu, H., Wang, R. and Zhou, T. (2017) Compression Test and Analysis of Multi-Limbs Built-up Cold-Formed Steel Stub Columns. *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, 128, 405–415. https://doi.org/10.1016/J.JCSR.2016.09.005.
- 15 Ananthi, G.B.G., Deepak, M.S., Roy, K. and Lim, J.B.P. (2021) Influence of Intermediate Stiffeners on the Axial Capacity of Cold-Formed Steel Back-to-Back Built-up Unequal Angle Sections. *Structures*, Elsevier, **32**, 827–848. https://doi.org/10.1016/J.ISTRUC.2021.03.059.
- 16 Roy, K., Mohammadjani, C. and Lim, J.B.P. (2019) Experimental and Numerical Investigation into the Behaviour of Face-to-Face Built-up Cold-Formed Steel Channel Sections under Compression. *Thin-Walled Structures*, Elsevier, **134**, 291–309. https://doi.org/10.1016/J.TWS.2018.09.045.
- 17 Ahmadi A. (2016) An Experimental Study on a Novel Cold-Formed Steel Connection for Light Gauge Open Channel Steel Trusses. *Journal of Constructional Steel Research*, **122**, 70-79. https://doi.org/10.1016/J.JCSR.2016.02.007.
- 18 Rodionov I. Safronov E. (2021) Reinforcement of Deformed Compressed Rods of Steel Trusses under Load (In Russian). *Urban Planning and Architecture*, Vol.11, **3(44)**, 26-31. https://doi.org/10.17673/Vestnik.2021.03.04.
- 19 Rybakov, V. (2023) Condition Load Effect Factor of Profile Steel in Lightweight Steel Concrete Wall Panels. *Construction of Unique Buildings and Structures*, **1(106)**, 10602. https://doi.org/10.4123/CUBS.106.2.
- 20 Yao, B., Shi, Y., Wang, W., Wang, Q. and Hu, Z. (2023) Flexural Behavior of Cold-Formed Steel Composite Floor Infilled with Desert Sand Foamed Concrete. *Buildings*. **13(5)**, 1217 https://doi.org/10.3390/buildings13051217.
- 21 Leshchenko M. V., Semko V. (2015) Thermal Characteristics of the External Walling Made of Cold-Formed Steel Studs and Polystyrene Concrete. *Magazine of Civil Enginreering*, **8**, 44-55. https://doi.org/10.5862/MCE.60.6.
- 22 Rybakov, V., Seliverstov, A., Vakhidov, O. (2021) Fire Resistance of Lightweight Steel-Concrete Slab Panels under High-Temperature Exposure. *E3S Web of Conferences*, **264**, 02003. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126402003.
- 23 Guosheng Xiang Danqing Song Huajian Li Yinlang Zhou Hao Wang Guodong Shen Zhifey Zhang. (2023) Preparation of Steel Slag Foam Concrete and Fractal Model for Its Termal Conductivity. *Fractals*, **7(8)**, 585. https://doi.org/10.3390/fractalfract7080585.
- 24 Shintani K. Takuya Y. Tomohito O. Toshihiko N.. Richard Liew. (2020) Effect of Steel-Fiber Reinforced Concrete on the Fire Resistance of Concrete-Filled Steel Tubular Columns under Simultanious Axial Loading and Double Curvative Bending. *SiF 2020 – The 11th International Conference on Structures in Fire*, 113–123. https://doi.org/10.14264/4767f7d
- 25 Setyowulan, D., Nuralinah, D., Suryo, E., Ramadhani, S. and Prabandari, E. (2024) The Collapse Behavior of Cold-Formed Steel Composite Beam Structure. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **1312**, 12032. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1312/1/012032.
- 26 Thippeswami, B., Waghmare, S. and Kumar, S. (2023) Experimental Study on Cold-Formed Steel–Concrete Composite Trusses. *Proceedings of the Indian Structural Steel Conference*, 2020 (Vol. 2), 157–165. https://doi.org/10.1007/978-981-19-9394-7\_12.
- 27 Rahnavard, R., Craveiro, H., Simões, R., Torabian, S. and Schafer, B. (2024) Understanding the Behavior of Built-up Cold-Formed Steel Lightweight Concrete (CFS-LWC) Composite Beams. *Proceedings of the Annual Stability Conference Structural Stability Research Council*, San Antonio, Texas, March 19-22, 2024. <u>https://www.researchgate.net/publication/379155554</u>
- 28 Lisantono, A., Wigroho, H. and Sari, M. (2012) Cold-Formed Steel-Concrete Beams. *Jurnal Teknik Sipil*, **19**, 115. <u>https://doi.org/10.5614/jts.2012.19.2.3</u>.
- 29 Güldür, H., Baran, E. and Topkaya, C. (2021) Experimental and Numerical Analysis of Cold-Formed Steel Floor Trusses with Concrete Filled Compression Chord. *Engineering Structures*, Elsevier, **234**, 111813. https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2020.111813.
- 30 STO [Organization Standard] 06041112.002-2018 Steel-Concrete Stuctures Made of Thermal Insulation Non-Autoclave Foam Concrete Profile Steel Cladded with Fiber Cement Sheets. Saint-Petersburg. 2018 <u>https://www.Sovbi.Tech</u>.
- 31 STO [Organization Standard]CTO 0065-83135335- 2014 Self-Tapping and Self-Drilling Screws for Wall and Roof Mounting Structures Made of Lightweight Gauge Steel. Moscow. 2014. https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293767/4293767433.pdf.