



Research Article

Received: June 6, 2024

Accepted: June 20, 2024

Published: June 29, 2024

ISSN 2304-6295

Lightweight gauge steel combined section beams

Rybakov, Vladimir Aleksandrovich*¹ Ogurtsov, Mikhail Vladimirovich² Dentsel, Ilya Sergeevich² Tsvetkova, Anna Andreevna³ ¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia; fishermanoff@mail.ru² LLC «Stroypanel», Leningradskaya oblast', Russia; ogurtsov@stroypanel.ru (O.M.V.); dentsel94@mail.ru (D.I.S)³ LLC «Sovbi», St. Petersburg, Russia; annatsvetkova2014@mail.ruCorrespondence:* email fishermanoff@mail.ru; contact phone [+79118297767](tel:+79118297767)

Keywords:

Lightweight thin-walled steel structures; Bending tests; Composite cross-section; Geometric characteristics; Reduction; Reducing; Combined profiles

Abstract:

The object of this study is beams made of lightweight thin-walled steel profiles of an open combined section with one axis of symmetry, consisting of three C-shaped profiles, under the action of a static transverse bending load without eccentricity. This work aims to identify the behavior of such beams when bending transversely and to substantiate the possibility of applying one of the methods of reducing cross sections for single profiles to calculation of beams of combines profiles. **Method.** An experimental study of bending behavior of a series of samples of such beams, which are hinged on both supports, under the action of a stepwise concentrated static load from a hydraulic jack is being conducted. **Results.** The deformation diagram obtained from the test results is compared with those calculated using various analytical and numerical methods. Based on the results obtained, it is shown that when bending transversely in the plane of symmetry beams of open combined section with one axis of symmetry work linearly up to 68% of the destructive load. It is proposed to use the method not considering reduction of the cross-section when calculating strength. It is proposed to use the methodology using the section reduction obtained according to the ARSS (Association for the Development of Steel Construction) manual when calculating stiffness. This method gives an error of 1.9%.

1 Introduction

Легкие стальные тонкостенные конструкции (ЛСТК) завоевали популярность во всем мире благодаря их долговечности [1], небольшому весу, не требующему дополнительного оборудования для монтажа конструкций на строительной площадке [2], высокой скорости монтажа, снижению нагрузок на фундамент от собственного веса конструкций здания и другим достоинствам.

Конструкциям из ЛСТК посвящены работы таких российских и зарубежных ученых, как Туснин А.Р [3], [4], Назмеева Т.В. [5], [6], K.J.R. Rasmussen [7], [8], а также авторов данного исследования [9], [10] и многих других.

Часто элементы ЛСТК ввиду конструктивных особенностей оказываются подвержены стесненному кручению и деформации, и в этом случае их расчет необходимо проводить с помощью теории тонкостенных стержней, основоположником которой является В.З. Власов [11]. Под тонкостенным стержнем понимается стержень, толщина которого много меньше размеров его поперечного сечения, которые, в свою очередь, много меньше длины стержня. На практике тонкостенными стержнями моделируются элементы ЛСТК, как правило, толщиной 0.6...3мм при

габаритах сечения, как правило, 100...350мм. Известно большое количество трудов по механике тонкостенных стержней, посвященных методам их расчета на устойчивость [12], [13], прочность [14], на статические [15] и динамические воздействия [16], [17], учету редукции сечений [18], геометрической нелинейности [19], [20], в том числе авторов данного исследования [21], [22], и многие другие.

Однако нормами, в том числе нормами проектирования Российской Федерации 260.1325800.2024 «Конструкции стальные тонкостенные из холодногнутых оцинкованных профилей и гофрированных листов» [23] (далее СП 260), рекомендуется конструктивно избегать стесненного кручения и депланации, в том числе на опорах.

Наиболее простым решением, обеспечивающим отсутствие эксцентриситета и, следовательно, крутящего момента и депланации, является применение симметричных комбинированных профилей открытого и замкнутого типов, представленных на рисунках 1-2. Профили открытого типа, к которым относится и рассматриваемый в настоящем исследовании профиль (рисунок 1, л) широко применяются в конструкциях, например, в качестве балок [24].

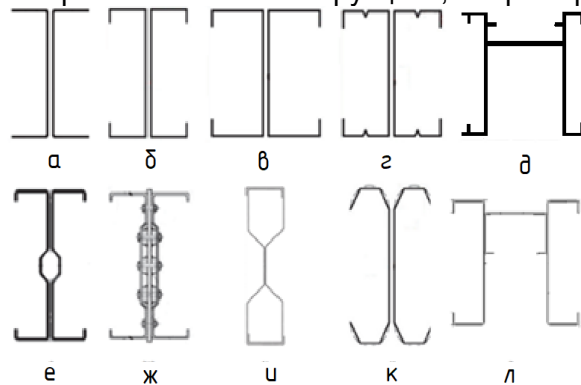


Fig. 1 - Open-type combined profiles

Еще одним видом составных профилей являются профили замкнутого типа (рисунок 2), которые в основном применяются в сжатых поясах ферм.

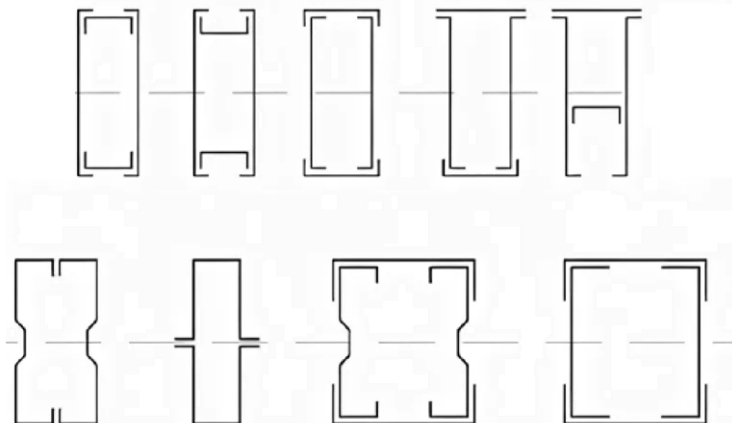


Fig. 2 - Closed-type combined profiles

Согласно СП 260 [23], в редких случаях могут быть использованы профили открытого и замкнутого сечений, представленные на рисунке 3.

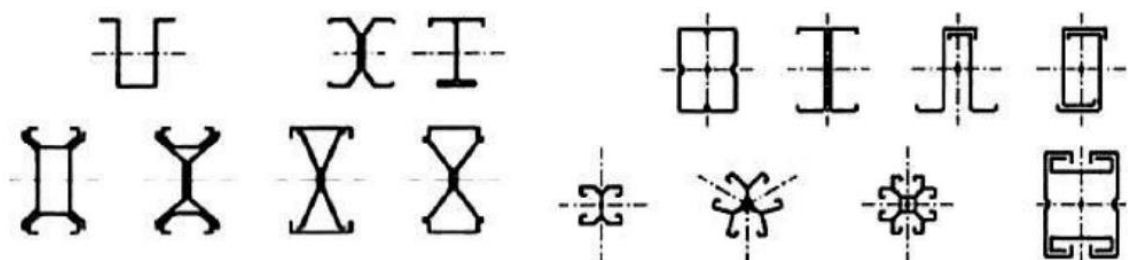


Fig. 3 - Rarely used combined profiles, SP 260

Комбинированные профили значительно расширяют область применения ЛСТК и позволяют возводить модульные здания, которые значительно увеличивают скорость строительства и вариативность архитектурных решений [25], а также малоэтажные здания - например, 2-3-этажные административные здания ССК «Звезда» в г. Большой Камень Приморского края Российской Федерации (рисунок 4).



Fig. 4 - Complex of 3-storey administrative buildings of the SSK "Zvezda" in Bolshoy Kamen, Primorsky Region, Russia

Отдельные исследования подтверждают, что характеристики комбинированных сечений не могут быть получены простым суммированием характеристик одиночных профилей [26], а прогнозируемые показатели таких профилей не всегда согласуются с методиками нормативных документов [27].

Сложность прогнозирования работы составных холодногнутых профилей заключается также в необходимости учета местной потери устойчивости сжатой части сечения [28] и эффектов геометрической нелинейности [29].

Ранее авторами настоящего исследования была изучена несущая способность сжато-изгибаемых элементов (колонн) [30], состоящих из вложенных друг в друга С-образных и направляющих профилей (рисунок 1,д). В результате проведенного исследования было получено, что критическая нагрузка, рассчитанная по формуле 7.7.3 СП 260 [23] соответствует значению, полученному экспериментально. Однако несмотря на широкое применение, составные балочные элементы исследованы не были.

Недостаток экспериментальных исследований составных сечений, применяемых именно в элементах балочного типа, используемых в качестве несущих в административных зданиях, обусловил необходимость настоящего исследования и его цель: выявление характера работы стальных тонкостенных комбинированных открытых профилей с одной осью симметрии при действии статической поперечной изгибающей нагрузки без эксцентриситета и обоснование возможности применения к их расчетам одного из способов редуцирования сечений для одиночных профилей.

В рамках данной цели решим следующие задачи:

- ступенчатое нагружение серии однопролетных шарнирно-опертых балок статической нагрузкой с фиксацией перемещений на каждом этапе;
- аналитический расчет с использованием геометрических характеристик нередуцированного сечения;
- аналитический расчет с использованием геометрических характеристик редуцированного различными способами сечения;
- численное моделирование эксперимента с использованием пластинчатых конечных элементов.

2 Materials and Methods

Проведем экспериментальное исследование составного сечения балки из стальных тонкостенных профилей (рисунок 5) с целью определения его несущей способности при действии изгибающего момента.

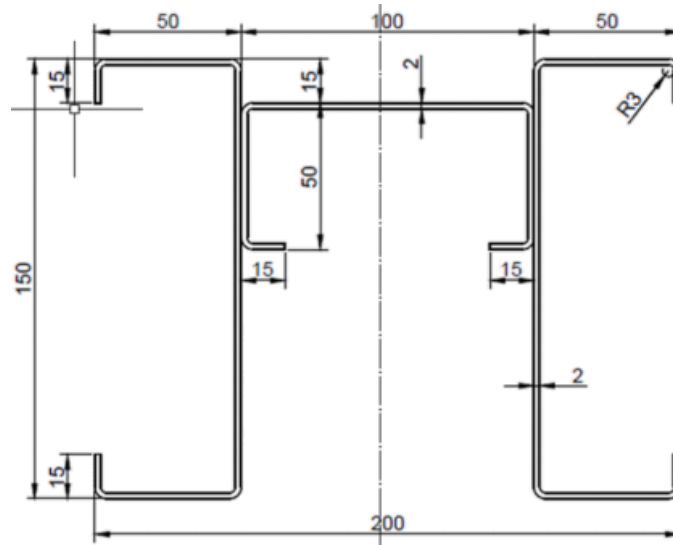


Fig. 5 - Dimensions and bindings of the cross-section elements of the test beam

Были испытаны балки типовой серии альбома технических решений ООО «Стройпанель» «Быстровозводимые модульные здания «Stroypanel-Frames», 2020 год. [31]. Профили ПС-150-2.0 и ПС-100-2.0 для составного сечения приняты по СТО-25.11.23-002-65536585-2017 «Профили стальные гнутые для производства зданий и сооружений по технологии ЛСТК». Предел текучести стали балки $R_y=280$ МПа, временное сопротивление $R_t=360$ МПа. В рассматриваемом сечении С-образный профиль (рисунок 7) 100x50x2, установленный между двумя профилями 150x50x2 выполняет следующие функции:

- 1) повышается общая устойчивость балки при изгибе;
- 2) повышается местная устойчивость при действии поперечной силы;
- 3) смещение профиля вверх позволяет предотвратить местную потерю устойчивости сжатых зон.

Следует обратить внимание на то, что балка работает не в составе панели (рис.6), а свободно, за счет свободного опирания на них основных панелей перекрытия.

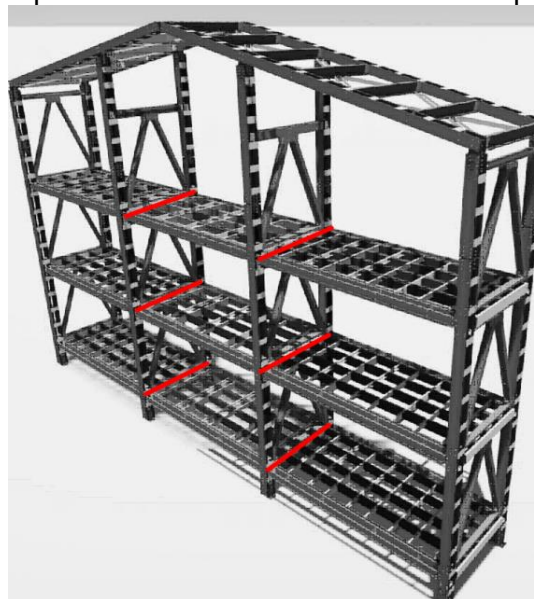


Fig. 6 - The location of the beams in the bond block of the administrative building

Схема испытаний представлена на рисунке 7. Балка опирается нижними полками на опоры цилиндрической формы с подложенными металлическими листами толщиной 6 мм, для исключения смятия (рисунок 8).

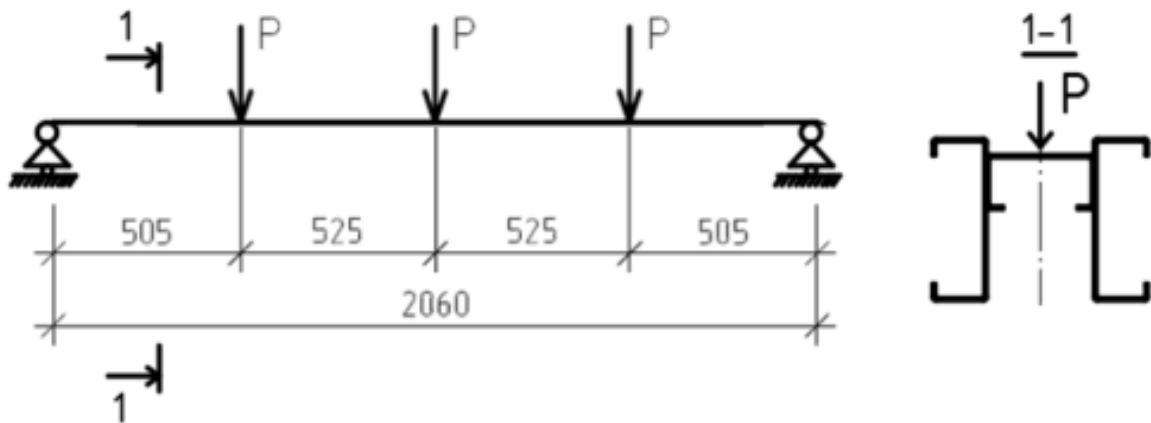


Fig. 7 - Scheme of the test

Приложим нагрузку с помощью трех гидравлических домкратов с равномерной подачей одинакового усилия на каждый. Нагрузка отцентрована по оси симметрии балки, что обуславливает отсутствие эксцентриситета приложения нагрузки, и, как следствие, стесненного кручения и деформации. Под домкраты поместим металлические пластины толщиной 20 мм для равномерной передачи нагрузки на полки балки (рисунок 8).

Испытания проведем путем ступенчатого нагружения с шагом нагрузки в 5 кН на домкрат, а далее, при подходе к предельным нагрузкам, шаг нагрузки сократим до 1 кН на каждый домкрат. На каждом шаге произведем измерение перемещений в середине балки и выявим предельную нагрузку.



Fig. 8 - Testing of the beam sample

3 Results and Discussion

Испытания показали, что средняя предельная нагрузка на 1 домкрат для рассматриваемой серии балок составляет 23 кН, при достижении которой полки в середине балки потеряли местную устойчивость вследствие действия сжимающих нормальных напряжений изгиба (рисунок 9).



Fig. 9 - Loss of load-bearing capacity of the beam

Полученные результаты испытаний представлены в таблице 1 и определены значения прогибов.

Table 1. Deflections of the tested beams

P, кН	Перемещения, см			
	Образец №1	Образец №2	Образец №3	Среднее
0	0	0	0	0
1	0.053	0.046	0.065	0.055
5	0.387	0.42	0.417	0.408
10	0.695	0.732	0.696	0.738
15	1.037	1.126	1.079	1.081
16	1.128	1.215	1.167	1.17
17	1.212	1.305	1.27	1.262
18	1.313	1.409	1.39	1.371
19	1.417	1.511	1.499	1.476
20	1.541	1.645	1.645	1.61
21	1.681	1.781	1.849	1.77
22	1.865	1.951	2.226	2.014
23	2.239	2.2		

Результаты прогибов сопоставим с аналитическим расчетом с использованием редуцированного сечения по СП 260 [23] и по Пособию по проектированию строительных конструкций малоэтажных зданий из стальных холодногнутых оцинкованных профилей под редакцией Назмеевой Т.В [32] (далее – Пособие АРСС).

Для определения прогиба аналитическим методом воспользуемся формулой для модели балки Тимошенко с учетом сдвиговых деформаций (1):

$$f = \frac{Fa}{48EI_x} \cdot (3l^2 - 4a^2) + \frac{\alpha}{AG} \cdot \frac{Fa(l-a)}{l}, \quad (1)$$

где E – модуль упругости материала балки; I_x – момент инерции сечения относительно горизонтальной оси, проходящей через центр тяжести сечения; A – площадь поперечного сечения балки; G – модуль упругости при сдвиге; α – численный коэффициент [33].

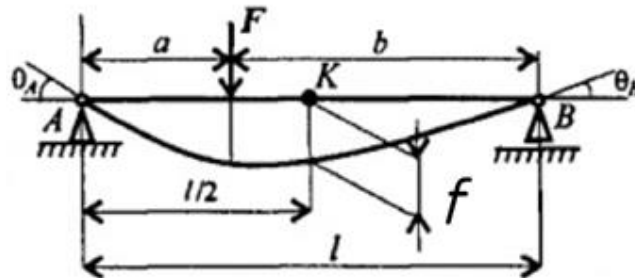


Fig. 10 - Deflection from the concentrated force applied at a distance a from the support

В соответствии с СП 260 [23] при расчете по I и II группам предельных состояний должны использоваться геометрические характеристики, в том числе момент инерции I_x эффективного (редуцированного) сечения балки.

Учтем редукцию элементов сечения по ширине, в соответствии с формулой п.7.3.1.7 СП260 [23] (2):

$$b_{ef} = \rho b, \quad (2)$$

где b_{ef} - эффективная ширина пластинки; ρ - коэффициент редукции; b – нередуцированная ширина пластинки.

Найдем коэффициенты редукции для стенки центрального профиля, полки и стенки крайних профилей (Таблица 2) по формулам (7.12-7.18) СП 260 [23] с учетом отгибов краев профилей.

Table 2. Determination of the reduction of the section by width

	Параметр	Элемент			
		1	2	3	4
ψ	1	-1.39	1		
k_σ	4	34.15	4	0.5	
σ_{cr} , МПа		268.8	1130.3	1191.6	1653.3
$\bar{\lambda}_p$		1.02	0.49	0.484	0.412
ρ		0.768	Не редуцируется		
b_{ef} , м		0.076			

Для определения редукции по толщине в сжатой полке с отгибом воспользуемся указаниями п. 7.3.2.7-7.3.2.9 СП 260 [23].

Геометрические характеристики сечения представлены в таблице 3.

Согласно методике Пособия АРСС [32] для определения геометрических характеристик сечения балки при изгибе необходимо привести сжатые полки с отгибами к нулевой толщине. Исключим данные элементы из расчета геометрических характеристик сечения и определим его геометрические характеристики (Таблица 3).

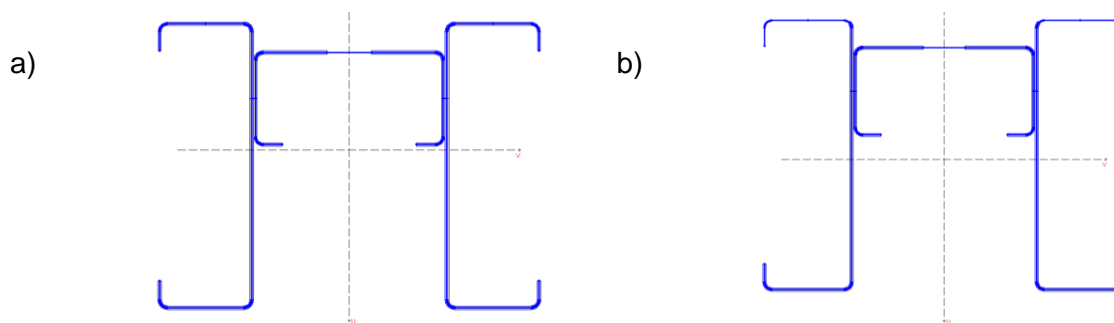


Fig. 11 - Reduced cross section: a – the reduction method according to SP260 [23] ; b – the reduction method according to The ARSS Guide [32]

Table 3. Geometrical parameters of the cross-section

Метод	Параметр				
	A, см ²	W _{v+} , см ³	W _{v-} , см ³	I _v , см ⁴	i _v , см
Полное сечение	14.907	67.731	48.572	424.300	5.335
Редукция по СП260 [23]	13.546	58.992	47.293	393.733	5.391
Редукция по пособию АРСС [32]	11.620	41.482	39.452	301.289	5.092

Помимо аналитического расчета проведем численный эксперимент в SCAD Office. Зададим стенки профилей пластинчатыми конечными элементами с шагом сетки 12.5мм, толщиной, соответствующей толщине профиля и приложим в трех точках сосредоточенную нагрузку. Расчетная схема численного эксперимента представлена на рисунке 13.

Также проведем численный эксперимент, учитывая сечения, получившиеся с использованием методик СП 260 [23] и Пособия АРСС [32], занизив модуль упругости в 104 раз участков сечения, толщина которых при редукции получилась равной нулю.

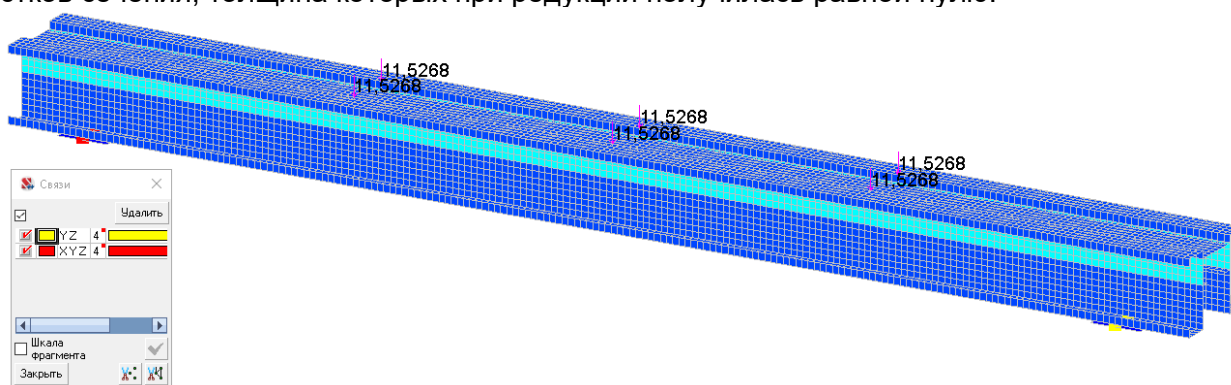


Fig. 12. Calculating scheme in SCAD Office

Для анализа полученных результатов построим диаграмму деформирования балок (рисунок 13).

Согласно Нормам проектирования Российской Федерации 20.133300.2016 «Нагрузки и воздействия» [34] предельный прогиб для рассматриваемой балки пролетом 2.06 м составляет $f_u=1.5$ см. На рисунке 14 предельный прогиб отмечен темно-красной вертикальной линией. Как видим, данное значение не было достигнуто при аналитическом расчете с использованием полного сечения и модели как балки Тимошенко, так и Бернулли-Эйлера; редуцированного по СП 260 [23] сечения.

Следует также отметить, что аналитический расчет с использованием полного сечения и модели балки Тимошенко привел к результатам значений прогибов, которые на 28.2% меньше значений прогибов, полученных экспериментально, аналитический расчет с использованием полного сечения и модели балки Бернулли-Эйлера привел к результатам значений прогибов,

которые на 33.3% меньше значений прогибов, полученных экспериментально. Таким образом, можно констатировать, что данные методы сильно завышают жесткость конструкции.

На линиях, полученных расчетным путем, засечками соответствующего цвета отмечена нагрузка, при которой достигается предел текучести.

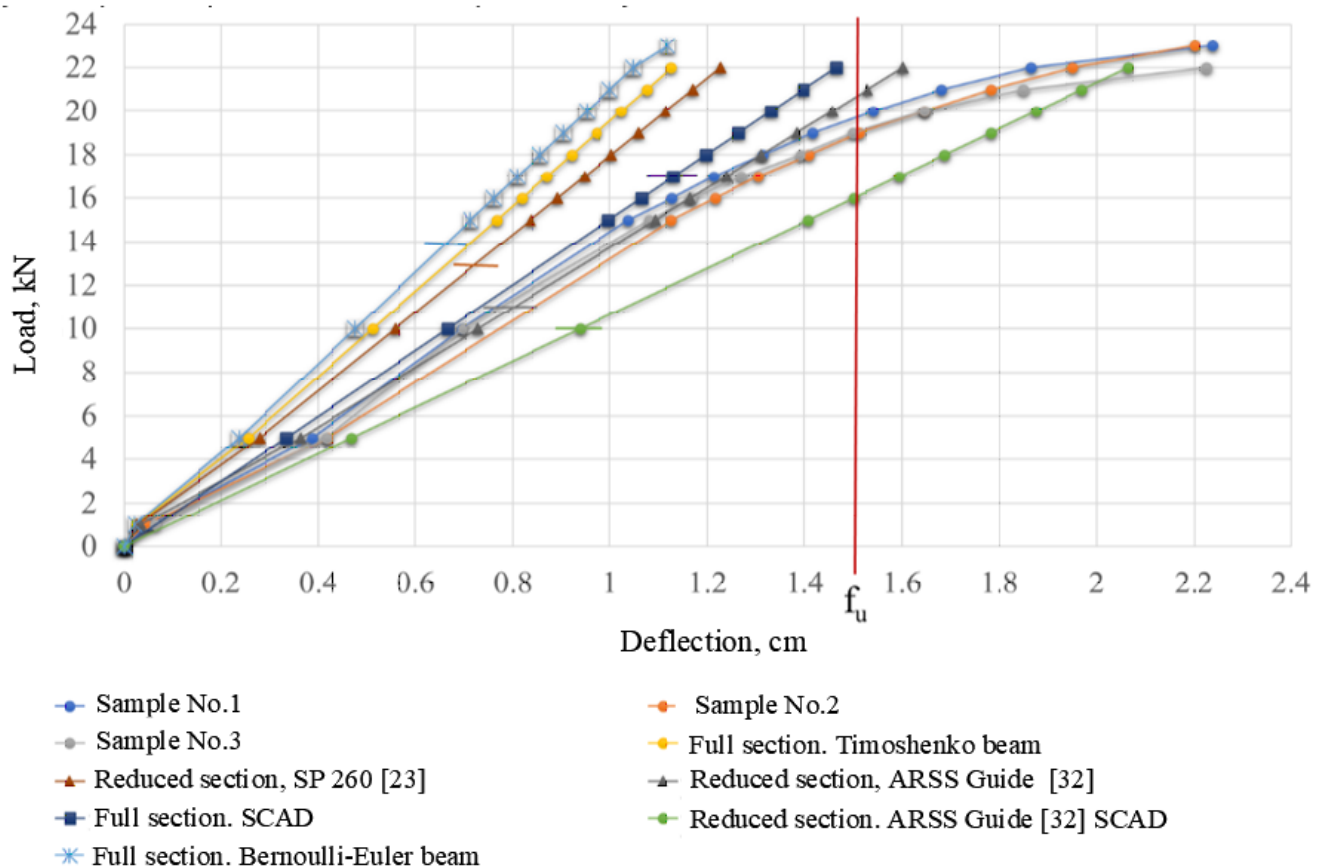


Fig. 13. Comparison of test results, numerical experiment and analytical calculation

Из диаграммы деформирования видно, что окончание линейной работы балок составляет 68% от разрушающей нагрузки.

В нелинейной зоне диаграммы деформирования численное моделирование с использованием редуцированного сечения по Пособию АРСС [32] дает погрешность 6.23% и указывает на ту точку, в которой происходит потеря несущей способности экспериментально по всем образцам, что говорит о том, что количество образцов, принятое в эксперименте, достаточно.

Далее определим степень применимости к балкам комбинированного сечения различных методик расчета на прочность и жесткость балок одиночного профиля.

При расчете жесткости в линейной зоне работы балок аналитический расчет с использованием редуцированного по методике Пособия АРСС [32] сечения дает погрешность 1.9%, что является наиболее точным. Редуцирование с использованием методики СП 260 [23] дает погрешность 21.8%, аналитический расчет с использованием полного сечения и модели балки Тимошенко дает погрешность 28.2%.

Таким образом можно рекомендовать для расчета перемещений использовать методику редуцирования сечений Пособия АРСС [32] в том случае, если нагрузки на балку не приводят к нелинейной работе конструкции.

При этом при расчете прочности по допускаемым напряжениям степень применимости указанных трех методик будет обратной. Засечками показаны значения, при которых достигается предел текучести балки при различных способах расчета. Как видно из графика, наиболее близкий результат к пределу текучести, соответствующему нагрузке 17.0 кН, дает модель нередуцированного сечения, в то время как использование редуцированного сечения, хоть и приближает диаграмму деформирования к экспериментальной, но дает существенное занижение расчетной несущей способности.



4 Conclusions

В результате исследования достигнуты следующие результаты:

- 1) Показано, что при поперечном изгибе в плоскости симметрии балочные профили открытого комбинированного сечения с одной осью симметрии работают нелинейно. Линейная часть работы составляет 68% от разрушающей нагрузки.
- 2) Предложено при расчете на жесткость использовать методику аналитического расчета по модели Тимошенко с использованием сечения, полученного по Пособию АРСС [32], при котором отбрасываются сжатые полки с отгибами. Данный способ дает погрешность 1.9 %.
- 3) Предложено при расчете на прочность использовать методику расчета без учета редукции сечения.
- 4) Результаты исследования внедрены в ООО «Стройпанель» при проектировании, изготовлении и монтаже конструкций ЛСТК жилого городка ССК «Звезда» в г. Большой Камень Приморского края Российской Федерации.

5 Fundings

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

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 Tharmarajah, G. and Van 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>
- 2 Shevtsov, S. and Astafeva, N. (2022) The Concept of Modular Construction on the Example of the Use of Light Metal Structures. *Engineering Research*, **№3(8)**, 30-37. <https://eng-res.ru/archive/2022/3/No8.pdf>
- 3 Tusnin, A. R. (2016) Finite Element for Calculation of Structures Made of Thin-Walled Open Profile Rods. *Procedia Engineering*, **150**, 1673-1679. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.149>
- 4 Tusnin, A.R. and Akhramochkina, T.I. (2020) Steel Reinforced Concrete Floors with the Use of Bent Steel Profiles. *Industrial and Civil Construction*, **5**, 10-14. <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2020.05.10-14>
- 5 Nazmeeva, T.V. and Vatin, N.I. (2016) Numerical Studies of Compressed Elements of a Cold-Bent C-Profile, Taking into Considering Initial Imperfections. *Magazine of Civil Engineering*, **62**,. 92–101. <https://doi.org/10.5862/MCE.62.9>
- 6 Pronin, D.G., Pekhotikov, A.V., Pavlov, V.V., Nazmeeva, T.V. and Zhuravlev, A.Yu. (2021) Features of Fire Resistance Tests of Building Structures Using Cold Formed Galvanized Profiles. *Industrial and Civil Construction*, **10**, 30-35. <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2021.10.30-35>
- 7 Abbasi, M., Rasmussen, K.J.R., Khezri, M. and Schafer, B.W. (2023) Computational Modelling of Built-up Cold-Formed Steel Columns and Parametric Studies. *Thin-Walled Structures*, **191**, 111035. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2023.111035>
- 8 Trouncer, A.N. and Rasmussen, K.J.R. (2014) Flexural-Torsional Buckling of Ultra Light-Gauge Steel Storage Rack Uprights. *Thin-Walled Structures*, **81**, 159-174. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2013.10.001>
- 9 Rybakov, V., Ha, Q., Gordeeva, A. and Urmanceva, K. (2021) The Stability of the Thin-Walled Perforated Compressed Elements. *Lecture Notes in Civil Engineering*, **141**, 420–432. https://doi.org/10.1007/978-3-030-67654-4_45
- 10 Zhuravov, K.A., Rybakov, V.A. and Nazmeeva, T.V. (2021) An Analysis of the Criteria for Evaluating the Efficiency and Optimization of Light Gauge Steel Structures. A Review. *AlfaBuild*,



- 2(17)**, 1-14. <https://alfabuild.spbstu.ru/article/2021.17.2/>
- 11 Vlasov, V.Z. (1961) Thin-Walled Elastic Beams. 2nd ed., Israel Program for Scientific Translation, Israel. <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1258660>
- 12 Bely, G.I. (2020) Analytical and Numerical Method for Calculating the Stability of Core Elements of Light Thin-Walled Steel Structures. *The Bulletin of Civil Engineers*, **4(81)**, 39-46. <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2020-17-4-39-46>
- 13 Ghersi, A., Landolfo, R. and Mazzolani, F.M. (1994) Buckling Modes of Double-Channel Cold-Formed Beams. *Thin-Walled Structures*, **19(204)**, 353-366. [https://doi.org/10.1016/0263-8231\(94\)90039-6](https://doi.org/10.1016/0263-8231(94)90039-6)
- 14 Bely, G.I. (2020) Improvement of the Engineering Methodology for Calculating the Strength of Core Elements of Light Steel Thin-Walled Structures. *The Bulletin of Civil Engineers*, **1(78)**, 72-81. <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2020-17-1-72-81>
- 15 Huang, Zh., Zhang, X. and Fu, X. (2020) On the Bending Force Response of Thin-Walled Beams under Transverse Loading. *Thin-Walled Structures*, **154**, 106807. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106807>
- 16 Uzikov, V.P. and Zavyalova, O.V. (2011) Consideration the Shear of the Median Surface When Calculating Thin-Walled Rods of an Open Profile for Static and Dynamic Impacts. *Bulletin of the Universities. Construction*, **1**, 69-75. https://aracy.pcf/files/documents/44-redaktor/nauka/izdaniya/nauch_potentsial/1/69-75.pdf
- 17 Cai, Y., Chen, H., Lv, X. and Chen, L. (2023) Dynamic Response of a Thin-Walled Curved Beam with a Mono-Symmetric Cross-Section under a Moving Mass. *Thin-Walled Structures*, **189**, 110941. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2023.110941>
- 18 Bely, G.I. (2016) The Effect of Section Reduction on the Stability of Core Elements of Structures Made of Paired Cold-Bent Thin-Walled Profiles. *The Bulletin of Civil Engineers*, **4(57)**, 57-63. <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2020-17-1-72-81>
- 19 Zhao, F., Bao, H. and Zhang, F. (2023) Geometrically Nonlinear Deformation Reconstruction of Based on Euler–Bernoulli Beam Theory Using a Nonlinear IFEM Algorithm. *Thin-Walled Structures*, **189**, 110884. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2023.110884>
- 20 Han, Q., Wu, Ch., Liu, M. and Wu, H. (2024) A Corotational Isogeometric Assumed Natural Strain Shell Element in Updated Lagrangian Formulation for General Geometric Nonlinear Analysis of Thin-Walled Structures. *Thin-Walled Structures*, **194**, 111311. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2023.111311>
- 21 Rybakov, V.A. and Jos, V.A. (2022) Bending Torsion of П-Shaped Thin-Walled Frames. *Construction of Unique Buildings and Structures*, **2(100)**, 10004. <https://doi.org/10.4123/CUBS.100.4>
- 22 Rybakov, V.A. (2022) The V.I. Slivker's Semi-Shear Theory Finite Elements Research for Calculation of Thin-Walled Closed Profile Rods. *AlfaBuild*, **4(24)**, 2403. <https://doi.org/10.57728/ALF.24.3>
- 23 SP [Code of Rules] 260.1325800.2016 Cold-formed thin-walled steel profile and galvanized corrugated plate constructions. Design rules. <https://docs.cntd.ru/document/456033922>
- 24 Marutyan, A.S (2019) Comparative Calculation of Optimal Parameters of Bent and Closely Bended Channel Profiles. *Structural Mechanics of Engineering Structures*, **15(6)**, 415-432. <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2019-15-6-415-432>
- 25 Kryzhanovsky, V. (2023) Modular Buildings in Modern Construction. *Engineering Research*, **1(11)**, 31-37. <https://eng-res.ru/archive/2023/1/No11.pdf>
- 26 Di, M. and Rasmussen, K. (2023) Test and Design of Cold-Formed Steel Closed Built-up Beams with Double Sigma Sections and Triple Lipped Channel Sections. *Thin-Walled Structures*, **192**, 111192. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2023.111192>
- 27 Prostekishina, D.A. (2020) Numerical Modeling of a Composite Section Element Made of Thin-Walled Profiles Taking into Account Initial Geometric Imperfections. *Bulletin of Civil Engineers*, **1(78)**, 82-86. <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2020-17-1-82-86>
- 28 Young, B., Rasmussen, K. and Kim J. (2000) Inelastic Bifurcation of Cold-Formed Singly Symmetric Columns. *Thin-Walled Structures*, **3(36)**, 213-230. [https://doi.org/10.1016/S0263-8231\(99\)00046-4](https://doi.org/10.1016/S0263-8231(99)00046-4)
- 29 Rasmussen, K. (2023) Stiffness Reduction of Cold-Formed Steel Structures Subject to Sectional Buckling and Yielding. *Journal of Structural Engineering*, **11(149)**, 23-35. <https://doi.org/10.1061/JSENDH.STENG-12655>



- 30 Dentsel, I.S, Bondar, V.T. and Rybakov V.A. Stress-Strain State of a Beam Made of Paired Nested Profiles. *Nedelya Nauki ICE: Collection of Materials of the National Conference*, 03-09 April 2023. Part 2.2023. Pp. 452-455. https://ice.spbstu.ru/userfiles/files/pdf_21_22/ISI-CHast-2--v-polnom-sbore.pdf
- 31 (2020) The LLC “Stroypanel” Album of Technical Solutions “Prefabricated Modular Buildings Stroypanel Frames”, 2020. <https://www.stroypanel.ru/>
- 32 SP [Code of Rules] 20.13330.2016 Loads and actions. <https://docs.cntd.ru/document/456044318>