

DOI 10.15826/rjct.2025.1.003

УДК 624.014

Б. А. Раубе¹, С. В. Кудрявцев²

^{1,2} Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург, Россия

e-mail: ¹Raube2017@mail.ru, ²s.v.kudryavtsev@urfu.ru

ORCID: ² <https://orcid.org/0000-0001-8096-4421>

БОЛЬШЕПРОЛЕТНЫЕ ФЕРМЫ С ПОЯСАМИ ИЗ ДВУТАВРОВ С ГОФРИРОВАННОЙ СТЕНКОЙ

Аннотация. В статье представлены результаты комплексного исследования большепролетных ферм с поясами из двутавров с поперечно-гофрированными стенками. Основное внимание уделяется анализу прочностных характеристик и особенностей работы конструкций для I-IV снеговых районов.

Проводится сравнительный анализ серийного решения фермы с поясами из двутавров и решеткой из гнутосварных профилей и ферм с поясами из двутавров с гофрированной стенкой и решеткой из гнутосварных профилей. Представлены результаты конструктивного расчета для I-IV снеговых районов и результаты сравнения в контексте снижения материалоемкости и оптимизации производственного времени при сохранении необходимой несущей способности.

По полученным результатам построена сравнительная диаграмма зависимости металлоемкости поясов большепролетной ферм от пролета и снегового района, для случая поясов «К» двутавра и двутавра с гофрированной стенкой.

Ключевые слова: большепролетные фермы, гофрированная стенка, прочность, устойчивость, экономическая целесообразность, металлические конструкции

Для цитирования: Раубе Б. А. , Кудрявцев С. В. Большепролетные фермы с поясами из двутавров с гофрированной стенкой // Russian Journal of Construction Science and Technology. – 2025. – Т. 11. – № 1. – 1101003. – DOI 10.15826/rjct.2025.1.003.

B. A. Raube¹, S. V. Kudryavtsev²

^{1,2} Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

e-mail: ¹Raube2017@mail.ru, ²s.v.kudryavtsev@urfu.ru

ORCID: ² <https://orcid.org/0000-0001-8096-4421>

LARGE-SPAN TRUSSES WITH I-BEAM CHORDS WITH CORRUGATED WEB

Abstract. The article presents the results of a comprehensive study of long-span trusses with chords made of I-beams with corrugated webs. The main focus is on the analysis of strength characteristics and structural behavior for snow load regions I-IV.

A comparative analysis is performed between a conventional truss design with chords made of I-beams and a lattice of cold-formed welded profiles, and trusses with chords made of I-beams with corrugated webs and a lattice of cold-formed welded profiles. The results of structural calculations for snow load regions I-IV are presented, along with a comparison in terms of material consumption reduction and manufacturing time optimization while maintaining the required load-bearing capacity.

Based on the obtained results, a comparative diagram of the metal consumption of long-span

truss chords versus span length and snow load region was constructed, considering both conventional I-beam ("K" I-beam) chords and I-beams with corrugated webs.

Key words: large-span trusses, corrugated wall, strength, stability, economic feasibility, metal structures

For citation: Raube B. A., Kudryavtsev S. V. (2025) Large-span trusses with I-beam chords with corrugated web. Russian Journal of Construction Science and Technology. 11(1). 1101003. (In Russ.) DOI 10.15826/rjct.2025.1.003.

1. Введение

С развитием промышленной отрасли возникает необходимость в обеспечении гибкости внутреннего пространства зданий и сооружений. Одним из путей повышения гибкости является применение большепролетных конструкций, в частности большепролетных ферм. Ключевой особенностью большепролетных конструкций является значительная доля статической нагрузки, обусловленная их собственным весом [1–3]. Данная работа направлена на изучение применимости использования балок с гофрированной стенкой в качестве элементов больше-

пролетных ферм, с целью снижения металлоемкости покрытия при соблюдении прочностных характеристик.

Гофрированная балка представляет собой стальную конструкцию, состоящую из верхнего и нижнего поясов и соединяющей их тонкостенной металлической стенки, профилированной в поперечном направлении посредством гофрирования. Гофрирование стенки значительно повышает её устойчивость к поперечным деформациям при сохранении минимальной толщины металла, что позволяет достичь оптимального соотношения несущей способности и металлоемкости конструкции [4, 5]. Виды гофрировки представлены на рис. 1.

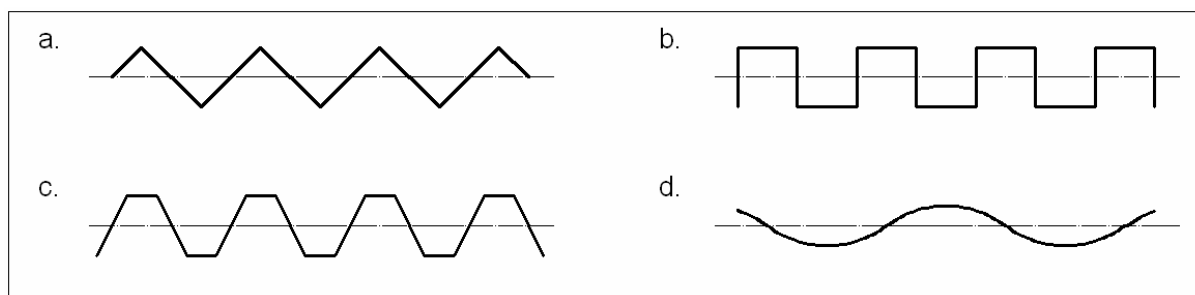


Рис. 1. Виды гофрировки стенки: *a* – треугольная; *b* – прямоугольная; *c* – трапециевидальная; *d* – синусоидальная

2. История современного проектирования балки с гофрированной стенкой

Исторические предпосылки применения гофрированных конструкций восходят к началу XX века, что подтверждается использованием гофрированных переборок на российских броненосцах типа "Бородино" (1901 г.). В указанных конструкциях применялись прямоуголь-

ные гофры, соединенные внахлест посредством двурядного заклепочного крепления. Проведенные гидравлические испытания продемонстрировали не только сохранение требуемых прочностных и жесткостных характеристик, но и достижение значительного (до 20%) снижения массогабаритных показателей конструкции [6]. Данный исторический опыт свидетельствует о давно признан-

ном технологическом потенциале гофрированных элементов в инженерных сооружениях.

Применения стальных балок с гофрированными стенками в мировой строительной практике имеет несколько этапов развития. Первые попытки внедрения таких конструкций относятся к 1930 годам, однако технические ограничения того периода, включая недостаточный уровень развития сварочных технологий и отсутствие специализированного производственного оборудования, препятствовали их широкому распространению



Рис. 2. Применение балок с гофрированной стенкой в мостостроении

3. Теоретические основы расчета балок с гофрированной стенкой в качестве поясов стропильной фермы

Методика расчета двутавров с гофрированными стенками на сегодняшний день представлена в нормах СП 294.1325800.2017 «Конструкции стальные. Правила проектирования» [12] и в учебном пособии [13].

Для элементов ферм, представленных двутаврами с гофрированными стенками, должны выполняться следующие условия прочности:

– для случаев внеузловой нагрузки на фермы, прочность сечения рассчитывается как для элементов при действии продольной силы с изгибом по формуле:

[7, 8]. Значительный прогресс в использовании данных конструктивных элементов наблюдался с начала 1960-х годов в Европе, где они нашли применение в стальных каркасах, а с 1980-х годов стали активно использоваться в мостостроении (рис. 1). Особого внимания заслуживает опыт Казахстана, где гофрированные балки получили широкое распространение в различных типах сооружений: от междуэтажных перекрытий в жилых многоэтажных зданиях до промышленных объектов и купольных конструкций административных зданий [9-11].

$$\frac{N}{A_n} \pm \frac{M_x}{I_x} \cdot y \pm \frac{M_y}{I_y} \cdot x \leq R_y \cdot \gamma_c; \quad (1)$$

– при центральном растяжении и сжатии сечение элемента должно удовлетворять условию:

$$\frac{N}{A_n R_y \gamma_c} \leq 1; \quad (2)$$

– центрально сжатые элементы должны также соответствовать условию устойчивости:

$$\frac{N}{\varphi A R_y \gamma_c} \leq 1; \quad (3)$$

– расчет прочности гофрированной стенки центрально-сжатых стержней выполняется по формуле:

$$\frac{Q_{fic}}{0,9 h_w t_w} \leq R_s \gamma_c; \quad (4)$$

На ряду с прочностью, для элементов фермы должны соблюдаться условия предельной гибкости:

$$\lambda \leq \lambda_u, \quad (5)$$

где λ_u – предельная гибкость элементов, определяемая по таблицам 32 и 33 [14].

4. Статический расчет большепролетных ферм

Габарит фермы и очертание решетки приняты по серии 11-2482 [15]. Фермы выполнены с поясами из двутавров с гофрированной стенкой и решеткой из гнутосварных профилей, опорные раскосы также представлены балкой с гофрированной стенкой. В отличие от ферм

по [15] сечение верхнего и нижнего поясов приняты одного сечения по всей длине пояса, что несомненно сказывается на упрощении изготовления и монтажа. Для сравнительного анализа были взяты фермы типоразмерами: 45, 51 и 54 метра (рис. 3, 4, 5 соответственно). Расчет производился для I-IV снеговых районов.

Статический расчет был произведен в ПК Лира 10.12. На основании результатов были подобраны сечения поясов ферм (табл. 1). Подбор элементов с гофрированной стенкой производился по сортаменту, приведенному в [13].

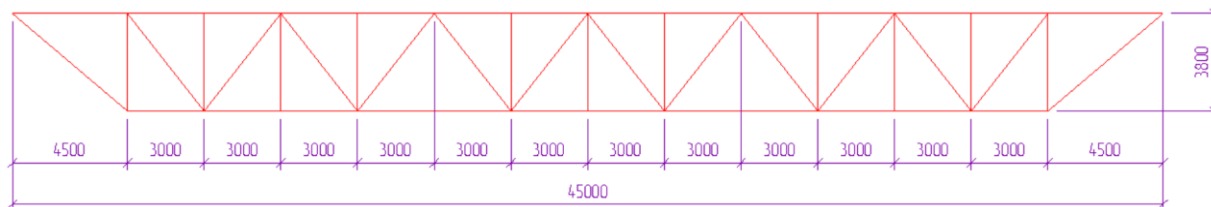


Рис. 3. Расчетная схема стропильной фермы длиной 45 метров

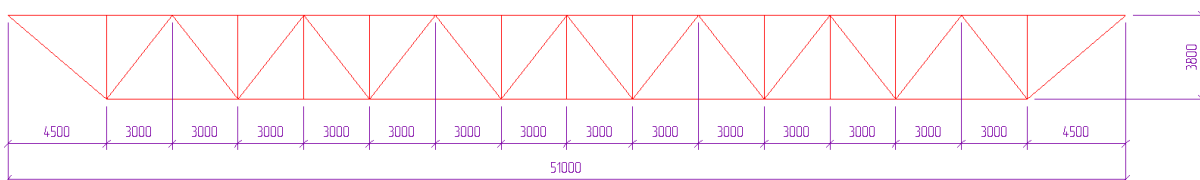


Рис. 4. Расчетная схема стропильной фермы длиной 51 метров

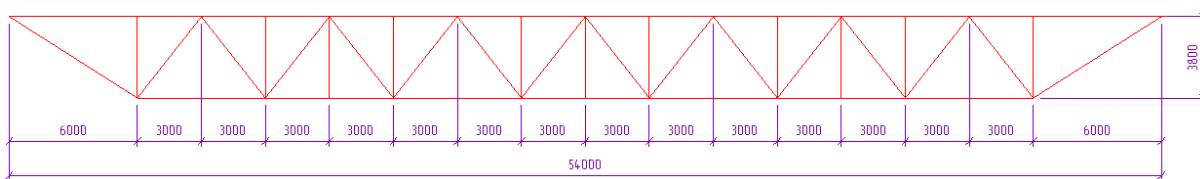


Рис. 5. Расчетная схема стропильной фермы длиной 54 метров

Таблица 1

Сечения поясов из гофрированных двутавров

Снеговой район	Пролет фермы, м	Элементы фермы	
		Верхний пояс	Нижний пояс
I	45	25BC	25BC
	51	30BC	25BC
	54	30BC	25BC
II	45	30BC	25BC
	51	30BC	30BC
	54	35BC	30BC
III	45	30BC	30BC
	51	35BC	35BC
	54	40BC	35BC
IV	45	35BC	30BC
	51	40BC	35BC
	54	40BC	40BC

5. Полученные результаты сравнения

На основании конструктивного расчета были получены сечения поясов ферм типоразмерами: 45, 51 и 54 метра,

для I–IV снеговых районов. Массы поясов гофрированных двутавров и двутавров «К» профиля приведены в таблице 2. На основании полученных результатов построены сравнительные диаграммы.

Таблица 2

Массы поясов из гофрированных двутавров

Снеговой район	Пролет фермы, м	Массы поясов фермы, т	
		Двутавры с гофрированной стенкой	Двутавры «К» профиля
I	45	5,39	5,84
	51	7,33	8,54
	54	7,85	10,28
II	45	6,39	6,66
	51	8,96	9,81
	54	11,41	10,98
III	45	7,67	7,48
	51	11,16	11,44
	54	13,48	12,69
IV	45	9,61	8,91
	51	13,04	12,55
	54	15	15,66

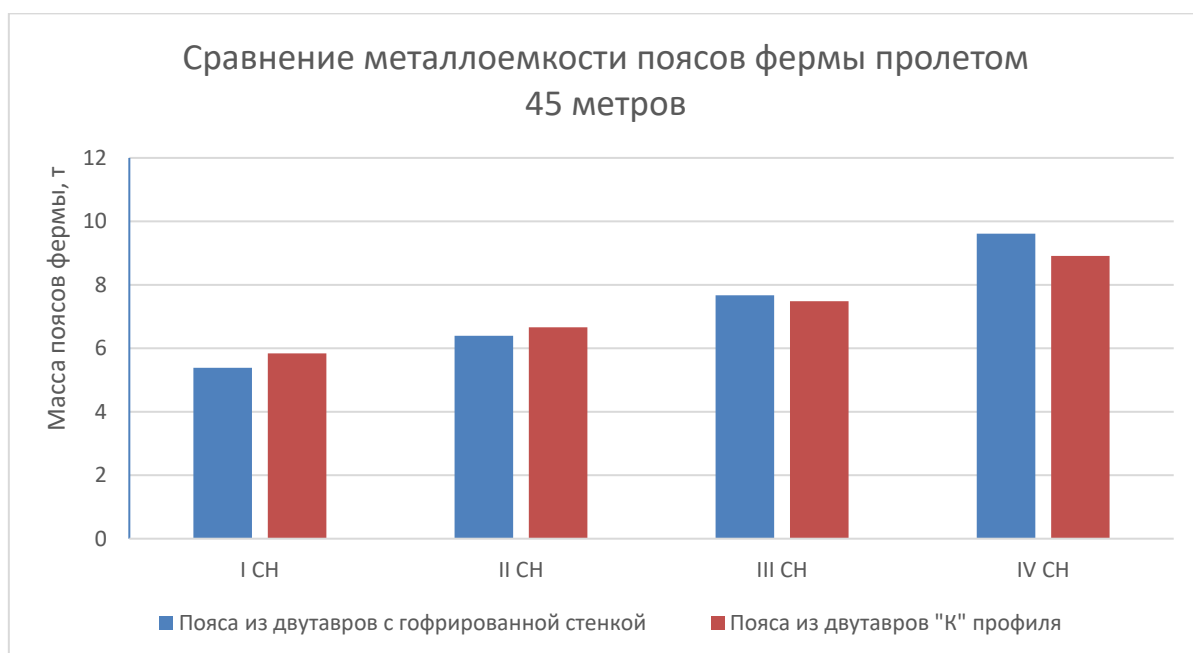


Рис. 6. Сравнительная диаграмма расхода стали на пояса фермы пролетом 45 м для I–IV снеговых районов

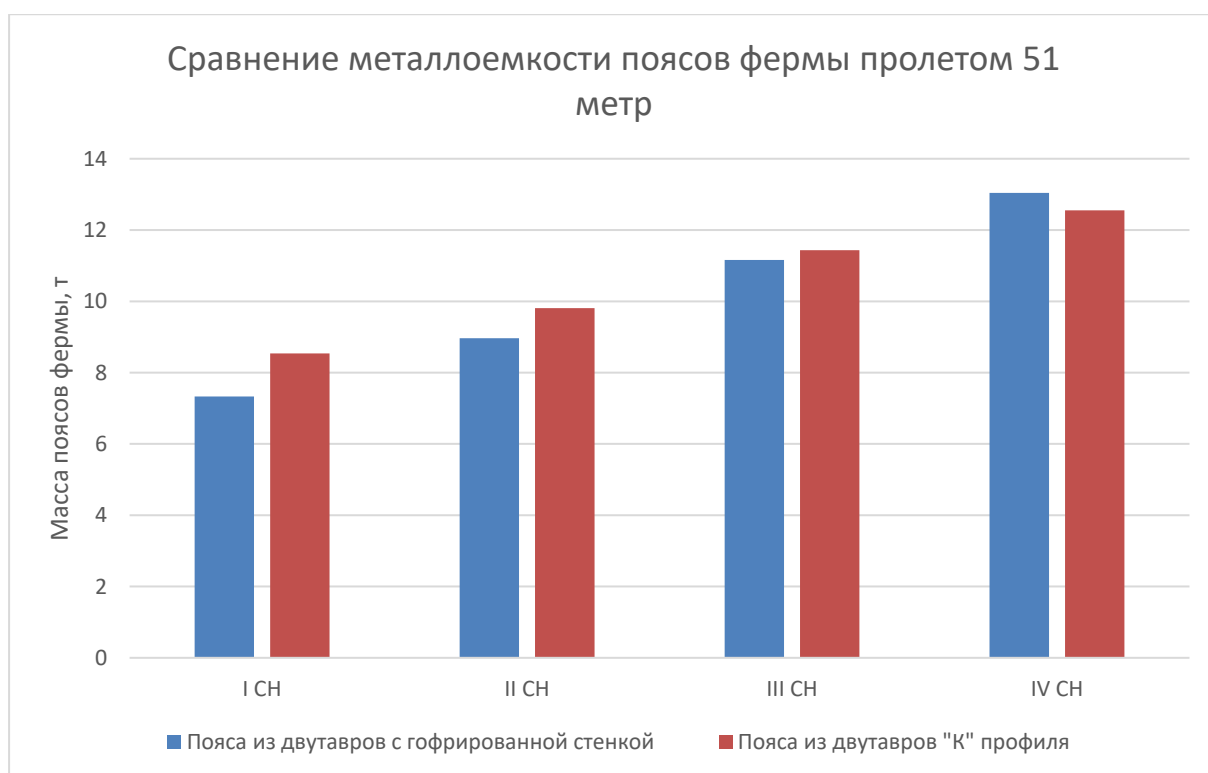


Рис. 7. Сравнительная диаграмма расхода стали на пояса фермы пролетом 51 м для I–IV снеговых районов

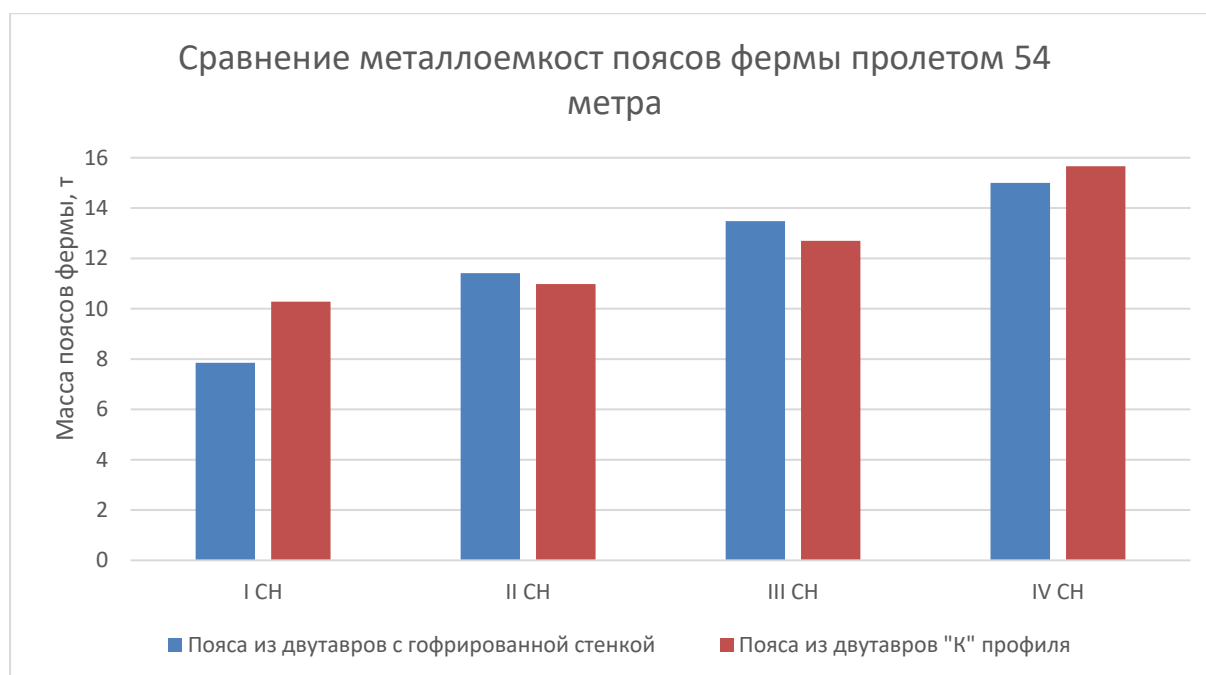


Рис. 8. Сравнительная диаграмма расхода стали на пояса фермы пролетом 54 м для I–IV снеговых районов

6. Заключение

На основании приведенного аналитического исследования можно сделать следующие выводы:

1. Внедрение балок с гофрированной стенкой в практику проектирования металлических каркасов рассматривается как перспективное направление повышения конструктивной эффективности, обеспечивающее существенное снижение металлоемкости за счет оптимизации распределения материала в сечении. Однако широкому применению данных конструктивных элементов препятствует недостаточная проработка методик их расчета, требующая дополнитель-

ных теоретических и экспериментальных исследований для установления достоверных расчетных зависимостей и критериев оценки несущей способности.

2. Применение двутавров с гофрированной стенкой в качестве поясов большепролетных ферм не так однозначно. В отдельных случаях удалось снизить металлоемкость поясов до 13,6%, но не для всех типоразмеров и снеговых районов. Стоит обратить внимание что в отличии от серии [15] сечение поясов из гофрированных двутавров приведено одной маркой по всей длине пояса, что также упрощает производство работ по изготовлению и последующий монтаж конструкций.

Список используемых источников

1. Васильев, А.А. Металлические конструкции: учеб. пособие для техникумов / А.А. Васильев. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Стройиздат, 1976. – 420 с.
2. Металлические конструкции: в 3 т.; Т. 2: Стальные конструкции зданий и сооружений (справочник проектировщика) / под общ. ред.: заслуженного строителя РФ, лауреата госуд. премии СССР В.В.Кузнецова (ЦНИИпроектстальконструкция им.Н.П.Мельникова). – Москва: Изд-во АСВ, 1998. – 512 с.: илл.
3. Металлические конструкции: учебник для строительных вузов; в 3 т.; Т.1: Элементы конструкций / В.В.Горев, Б.У.Оваров, В.В.Филипов и др.; под ред.: Горева В.В.. – 3-е изд., стер.. – Москва: Высшая школа, 2004. – 551 с.: ил.
4. Robra, J., Krasotina L.V. Bearing capacity of beams with sinusoidal corrugated webs with round and square

- holes // *Industrial and Civil Engineering*.–2019.–No12.–Pp11-17; DOI:10/33622/0869-7019-2019-12-11-17.
5. Sayed-Ahmed E.Y. Design aspects of steel I-girders with corrugated steel webs // *Electronic Journal of Structural Engineering*.–2007.–Vol7.–Pp27-40.
 6. Васильев А.Л., Глозман М.К., Павлинова Е.А., Филиппео М.В. Промышленные судовые гофрированные переборки / А.Л.Васильев [и др.] .– Л.: Судостроение,1964.-316 с.
 7. Zhang W., Li Y., Zhou Q.[et al.] Optimization of the structure of an H-beam with either a flat or a corrugated web.Part III Development and research on H-beams with wholly corrugated webs // *J.Materials Processing Technology*.-2000.-Vol101.Issue1.Pp119–123.
 8. Driver R.G., Abbas H.H., Sause R. Shearing behavior of corrugated web bridge girder // *Journal of Structural Engineering*.-2006.-Vol132 Issue2.Pp195–203.
 9. Siokola W. Wellstegträger. Herstellung und Anwendung von Trägern mit profiliertem Steg // *Stahlbau*.-1997.-No66.Pp595–605.
 10. De Hoop H.G. Girders with Corrugated Webs : магистерская диссертация / H.G.De Hoop; научный руководитель F.S.K.Bijlaard [и др.] .– Papendrecht : IV-Bouw & Industrie ,2003 .
 11. Дмитриева Т.С. Теория стальных I-балок с плоскими гофрированными стенками при ограниченном кручении / Т.Дмитриева , У.Кху-Кхуудей ,А.Лукина // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering : New Technologies and Special-Purpose Development Priorities ; Иркутск ,25 апреля 2019 года .– Иркутск : Institute of Physics Publishing ,2019 .– P012020 ; DOI:10/1088/1757-899X/667/1/012020.
 12. СП 294.1325800.2017. Конструкции стальные. Правила проектирования .—Москва ,2017.—167с.
 13. Кудрявцев С.В. Расчет и проектирование сварных двутавровых профилей с волнистыми стенками : учебно-методическое пособие для студентов , обучающихся по программам бакалавриата , магистратуры и специалитета по направлениям подготовки 08.И03.102804.1 «Строительство», 08.И05.101 «Строительство уникальных зданий и сооружений» - Екатеринбург : Издательство Уральского университета ,2017.—56с.
 14. 6. СП 16.13330.2017. Стальные конструкции (актуализированная редакция СНиП II-23-81): Стальные конструкции. Нормы проектирования .
 15. Стальные конструкции покрытий одноэтажных производственных зданий пролетами от 36 до 54 м с применением стального профилированного настила для районов с расчетными температурами минус 40°C и выше : выпуск 11^2482 [Электронный ресурс] // Meganorm.ru. URL: <https://meganorm.ru/index2/1/4293847/4293847180.htm/> (дата обращения 24 мая 2025).

References

1. Vasiliev, A.A. (1976). **Metal constructions: Textbook for technical schools** (2nd ed., revised and enlarged). Moscow: Stroyizdat.
2. *Metal constructions (Vol. 2): Steel structures of buildings and facilities (Designer's handbook)* / Edited by Honored Builder of the Russian Federation, Laureate of the State Prize of the USSR V.V. Kuznetsov (TsNIIPROEKTSTALCONSTRUCTION named after N.P. Melnikov). (1998). Moscow: ASV Publishing House.
3. *Metal constructions: Textbook for construction universities; Vol. 1: Elements of structures* / V.V. Gorev, B.Yu. Uvarov, V.V. Filippov et al.; Edited by Gorev V.V.. (2004). 3rd ed., corrected and reprinted. Moscow: Higher School.
4. Robra, J., & Krasotina, L.V. (2019). Bearing capacity of beams with sinusoidal corrugated webs with round and square holes. **Industrial and Civil Engineering**, 12, 11-17. <https://doi.org/10/33622/0869-7019-2019-12-11-17>
5. Sayed-Ahmed, E.Y. (2007). Design aspects of steel I-girders with corrugated steel webs. **Electronic Journal of Structural Engineering**, 7, 27–40.
6. Vasiliev, A.L., Glozman, M.K., Pavlinova, E.A., & Filippio, M.V. (1964). **Durable shipboard corrugated bulkheads**. Leningrad: Sudostroenie.
7. Zhang W., Li Y., Zhou Q., et al. (2000) Optimization of the structure of an H-beam with either a flat or a corrugated web. Part III Development and research on H-beams with wholly corrugated webs. **Journal Materials Processing Technology**, 101(1), 119–123.
8. Driver R.G., Abbas H.H., & Sause R. (2006) Shear behavior of corrugated web bridge girder. **Journal of Structural Engineering**, 132(2), 195–203.
9. Siokola W. Wellstegträger. Herstellung und Anwendung von Trägern mit profiliertem

- Steg. *Stahlbau*, 66, (1997), 595–605.
10. De Hoop H.G. (2003) Girders with Corrugated Webs [Master's thesis]. H.G. De Hoop; Scientific supervisor F.S.K. Bijlaard et al. Papendrecht : IV-Bouw & Industrie .
 11. Dmitrieva T. (2019) Study of steel I-beams with plate corrugated web at restrained torsion. T. Dmitrieva, U. Khu-Khuudei, A. Lukin // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. New Technologies and Special-Purpose Development Priorities. Irkutsk, 25 April. Irkutsk : Institute Physics Publishing, 2019. P012020 <https://doi.org/10.1088/1757-899X/667/1/012020>
 12. SP 294.1325800 (2017). *Steel structures: Design rules*. Moscow: Author's Edition.
 13. Kudryavtsev S.V. (2017) Calculation and design welding I-beams with wavy walls. Textbook-methodical manual for students studying under bachelor's degree programs in specialties 08.I03.I02804 "Construction", 08.I05.I01 "Construction unique buildings". Yekaterinburg : Ural University Press .
 14. SP 16.13330 (2017). *Steel Structures* (Updated edition SNIP II-23-81): Steel structures. Design standards.
 15. Steel structures covering single-story production buildings spanning from 36 to 54 m using profiled steel decking for areas with calculated temperatures below -40°C or higher : Release 11^2482 [Electronic resource] // Meganorm.ru. URL: <https://meganorm.ru/index2/1/4293847/4293847180.htm> / (Accessed May 24th 2025).

Получено: 26.05.25
Прошла рецензирование: 27.05.25
Принята к публикации: 21.07.25
Доступно он-лайн: 01.08.25

Received: 26.05.25
Revised: 27.05.25
Accepted: 21.07.25
Available on-line: 01.08.25