



УДК 624.014.2

DOI 10.25628/UNIIP.2024.61.2.008

КУДРЯВЦЕВ С. В., БЕЛЯЕВА З. В., ВЭЙХАН Ч., ПЭНЬЮЭ Ч.

Особенности стальных подкрановых балок с треугольно-гофрированной стенкой

**Кудрявцев
Сергей
Владимирович**

кандидат технических наук, доцент, Институт строительства и архитектуры, Уральский федеральный университет (УрФУ), Екатеринбург, Российская Федерация

e-mail: s.v.kudryavtsev@urfu.ru



**Беляева
Зоя
Владимировна**

кандидат технических наук, заведующий кафедрой, Институт строительства и архитектуры, Уральский федеральный университет (УрФУ), Екатеринбург, Российская Федерация

e-mail: z.v.beliaeva@urfu.ru



**Чжао
Вэйхан**

аспирант, Институт строительства и архитектуры, Уральский федеральный университет (УрФУ), Екатеринбург, Российская Федерация

e-mail: zhaoweihang0311@gmail.com



**Чжао
Пэньюэ**

аспирант, Институт строительства и архитектуры, Уральский федеральный университет (УрФУ), Екатеринбург, Российская Федерация

e-mail: penieue.chzhao@urfu.ru

Показана возможность применения стальных сварных двутавровых профилей с тонкой гофрированной стенкой в качестве подкрановых балок под мостовые краны легкого (1К–3К) и среднего (4К, 5К) режимов работы грузоподъемностью до 12,5 т, эксплуатируемых в производственных зданиях пролетом до 30 м. Проведены расчеты прочности, устойчивости и деформативности конструкций с гофрированной стенкой. Приведено сравнение предлагаемых конструктивных решений с имеющимися типовыми решениями сварных подкрановых балок с плоскими стенками. Даны рекомендации по применению подкрановых балок с гофрированной стенкой.

Ключевые слова: гофрированные стенки, подкрановые балки, прочность, устойчивость, мостовые краны, режим работы, производственные здания, металлические конструкции.

*Kudryavtsev S. V., Belyaeva Z. V., Weihang Z., Pengyue Z.
Features of steel crane runway beams with triangularly corrugated web*

The possibility of using steel welded I-sections with a thin corrugated web as crane runway beams for overhead cranes of light (1K–3K) and medium (4K, 5K) operating modes with a lifting capacity of up to 12.5 tons, operated in industrial buildings with a span of up to 30 m, is shown. Calculations of the strength, stability and deformability of structures with a corrugated web were carried out. A comparison of the proposed design solutions with existing standard solutions for welded crane runway beams with flat webs is provided. Recommendations for the applying of crane runway beams with corrugated webs are given.

Keywords: corrugated webs, crane runway beams, strength, stability, overhead cranes, operating mode, industrial buildings, steel structures..

Введение

Комплекс подкрановых конструкций необходим для передвижения мостовых кранов в промышленном здании и включает в себя: непосредственно сами подкрановые балки, тормозные балки и фермы с тормозными листами, узлы крепления балок к колоннам, крановый рельс с креплениями его к подкрановой балке, а также крановые упоры в торцах здания. Как правило, в современном строительстве применяются стальные сплошные сварные подкрановые балки. В России еще в 1970–1980-е гг. разработано несколько типовых серий для изготовления таких конструкций¹.

В последнее время в строительстве, в том числе промышленных зданий, существует устойчивая тенденция на снижение металлоемкости как отдельных несущих конструкций, так и каркасов зданий в целом [1–3; 5–7; 13]. Многие заводы металлоконструкций освоили выпуск облегченных металлических конструкций, в том числе сварных профилей с гофрированной стенкой^{2,3}. Активно

1 Типовая серия 1.426.2–7, вып. 3. Балки пролетом 6 и 12 м разрезные под краны общего назначения грузоподъемностью до 50 т. Чертежи КМ. М.: ЦНИИпроектстальконструкция, 1989. 91 с.

2 ТУ 5261-002-77304466-2011. Балки двутавровые с поперечно-гофрированными стенками. Технические условия. Екатеринбург: ООО «Мечел-Сервис», 2011. 35 с.

3 ТУ 5283-010-85420077-2014. Сварные двутавровые профили с волнистыми стенками. Технические условия. Екатеринбург: ООО «Силур», 2014. 41 с.



Иллюстрация 1. Подкрановые балки с гофрированной стенкой пролетом 12 м в процессе монтажа. Фото: 1980-е гг. Автор Ю. С. Максимов [5]



Иллюстрация 2. Каркас производственного здания, выполненный из конструкций с гофрированной стенкой. Подкрановые балки пролетом 6 м. Фото: 1990-е гг. Автор Ю. С. Максимов [5]

развивается нормативная база, необходимая для внедрения конструкций с гофрированной стенкой в практику строительства, — за несколько последних лет разработаны и введены в действие как нормы их проектирования⁴, так и требования к изготовлению⁵, а также сортамент основных типоразмеров профилей⁶.

Вместе с тем профили с гофрированной стенкой применяются, как правило, лишь для изготовления конструкций, находящихся под воздействием статических нагрузок (балок и ригелей покрытия и перекрытия, колонн каркасов и т. п.) [1–8; 9; 12; 14; 15]. Их использование для изготовления подкрановых балок интересно, в первую очередь, не тем, что дает возможность сэкономить металл и снизить металлоемкость конструкции, а тем, что в одном потоке и на одном оборудовании можно изготавливать весь каркас промышленного здания из сварных сечений, одинаковых в конструктивном отношении. При этом, разумеется, область применения конструкций с гофрированной стенкой, как и любых других легких металлических конструкций, ограничивается небольшими промышленными зданиями с кранами легкого и среднего режимов работы и небольшой грузоподъемности, а таких объектов в настоящее время возводится подавляющее большинство [1–3].

4 СП 294.1325800.2017. Конструкции стальные. Правила проектирования. М.: Стандартинформ, 2017. 158 с.

5 ГОСТ Р 70006–2022. Двутавры стальные сварные с поперечно-гофрированной стенкой для строительных конструкций. Технические условия. М.: Российский институт стандартизации, 2022. 14 с.

6 ГОСТ Р 70571–2022. Двутавры стальные сварные с поперечно-гофрированной стенкой для строительных конструкций. Сортамент. М.: Российский институт стандартизации, 2023. 42 с.

Идея использовать балки с гофрированной стенкой в качестве подкрановых конструкций не нова. Некоторые проектные работы и натурные испытания по данной теме проводились еще в 1980-е и 1990-е гг. в структуре ЦНИИпроектстальконструкция [5]. Были возведены отдельные опытные образцы подкрановых балок пролетом 6 м и 12 м с гофрированной стенкой под краны грузоподъемностью до 32 т среднего режима работы, которые благополучно эксплуатируются до настоящего времени (Иллюстрации 1, 2).

Цель настоящего исследования — показать потенциальную возможность применения профилей с гофрированной стенкой для использования в качестве подкрановых балок. При этом, разумеется, необходимо принимать во внимание имеющиеся недостатки подобных конструкций, которые особенно сильно могут проявляться при их использовании в качестве подкрановых конструкций, а именно:

- так называемый эффект «гармошки» [3–5], или эффект «аккордеона», как принято его обозначать в англоязычной литературе [9–16], т. е. неспособность изогнутой тонкой стенки воспринимать нормальные усилия в продольном направлении (вдоль балки);
- влияние поперечных сил, действующих в сечении, на общий прогиб конструкции [3; 5], что особенно важно именно для подкрановых балок, так как их прогибы очень жестко ограничены технологическими факторами;
- худшая по сравнению с обычными балками с плоской стенкой местная устойчивость сжатого верхнего пояса из-за больших свесов пояса в вершинах гофров [3; 5].

В настоящее время в России для изготовления несущих строительных конструкций применяются, как правило, профили с треугольно- и синусоидально-гофрированными стенками. Использование последних в конструкциях подкрановых балок, по нашему мнению, малоцелесообразно и возможно лишь под краны небольшой грузоподъемности (не более 5 т) легкого режима работы (1К–3К) при пролетах здания до 24 м, т. е. в тех случаях, когда в качестве кранового рельса допускается использовать не специализированный крановый рельс КР70 или железнодорожный рельс Р43, а квадратный профиль 50×50 мм. Это объясняется тем, что при синусоидальном профиле гофрирования высота волны гофра составляет лишь около 40 мм (от 40 мм до 43 мм в зависимости от толщины стенки 2...3 мм). По действующим строительным нормам, эксцентриситет передачи сосредоточенной нагрузки на пояс балки не должен превышать половины высоты гофра, что для синусоидально-гофрированной стенки составляет не более 20 мм. Расчетный же эксцентриситет передачи крановой нагрузки принимается⁷ в размере не менее 20% от ширины подошвы кранового рельса и для специализированных крановых рельсов КР70 составляет как минимум 24 мм.

Для треугольно-гофрированных стенок это ограничение легко преодолимо, поскольку технология их производства позволяет выполнять гофры высотой 50 мм, 60 мм, 70 мм и более при необходимости. Кроме того, треугольно-гофрированные стенки могут быть выполнены толщиной от 2 мм до 10 мм, что значительно расширяет область их применения в различных конструкциях, позволяя выполнять устойчивые гофрированные стенки большой высоты до 4 м [5].

Базой настоящего исследования послужили типовые стальные подкрановые балки¹, на основе которых разработаны новые решения таких конструкций с гофрированной

7 СП 16.13330.2017. Стальные конструкции. М.: Стандартинформ, 2017. 140 с.

стенкой (Иллюстрация 3). При этом высоты балок с гофрированной стенкой были приняты равными типовым решениям (Таблица 1). Для стенки и поясов всех балок принята сталь класса С255. Для стенки принят треугольный профиль гофрирования с параметрами гофров $a \times f = 150 \times 60$ мм.

Определение геометрических характеристик сечений

Из-за неспособности тонкой гофрированной стенки воспринимать нормальные усилия в продольном направлении в инженерных расчетах при определении геометрических характеристик таких сечений вклад стенки, как правило, игнорируется [3–5; 13]. Таким образом, расчетные геометрические характеристики сварного двутаврового сечения с гофрированной стенкой могут быть найдены по следующим формулам:

$$A = b_{f1}t_{f1} + b_{f2}t_{f2} + t_w h_w \left(\sqrt{a^2 + f^2} \right) / a$$

— площадь поперечного сечения;

$$I_x = b_{f1}t_{f1}y_1^2 + b_{f2}t_{f2}y_2^2 - \text{момент инерции относительно оси } x;$$

$$W_{x1} = I_x / (y_1 + 0,5t_{f1}),$$

$W_{x2} = I_x / y_2 + 0,5t_{f2}$ — моменты сопротивления соответственно верхнего и нижнего пояса относительно оси x ;

$$I_y = t_{f1}b_{f1}^3 / 12 - \text{момент инерции относительно оси } y;$$

$$W_y = t_{f1}b_{f1}^2 / 6 - \text{момент сопротивления относительно оси } y.$$

Следует отметить, что при расчете подкрановых балок на горизонтальные усилия в геометрические характеристики сечения включается лишь верхний пояс, на который непосредственно передается нагрузка, и тормозная конструкция. В настоящем исследовании тормозные конструкции условно не учитываются.

Нагрузки и расчетные усилия в подкрановой балке

Для расчета подкрановых балок с гофрированной стенкой в настоящей работе приняты краны грузоподъемностью $Q = 5$ т, $Q = 10$ т и $Q = 12,5$ т легкого (1К–3К) и среднего (4К, 5К) режимов работы. База (расстояние между опорными катками) для всех кранов принята $A = 5000$ мм, габарит моста крана $B = 6000$ мм.

Максимальное нормативное давление на колесо принято: $P_{\max} = 7,5$ т

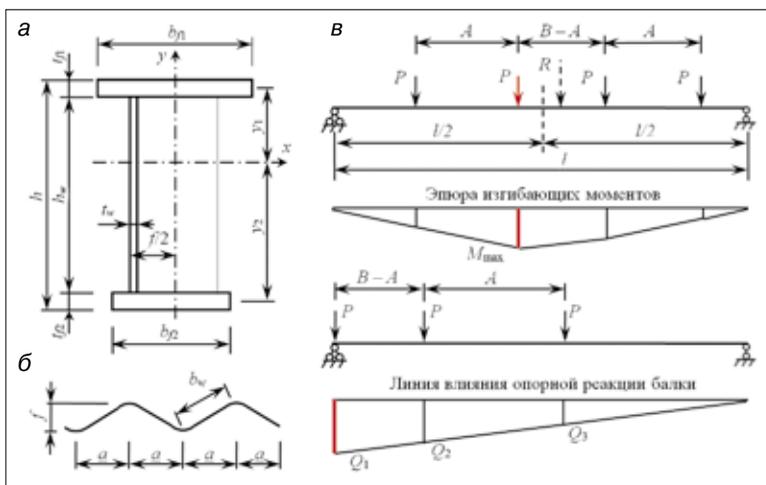


Иллюстрация 3: а — поперечное сечение балки с гофрированной стенкой; б — геометрические параметры гофрированной стенки; в — схема определения расчетных усилий в подкрановой балке. Авторы: С. В. Кудрявцев, З. В. Беляева, Ч. Вэйхан, Ч. Пэньюэ

Таблица 1. Характеристики рассматриваемых конструкций

Пролет, м	Кран, Q, т	Сечение балки			Вес, кг	%	
		Марка	Верхний пояс	Стенка			Нижний пояс
6	5	Б1 ¹	320x10	640x6	200x10	445	100
		Б1а	250x8	640x6	200x8	370	83
		Б2	250x10	640x3 гофр.	200x8	291	65
	10	Б1 ¹	320x10	640x6	200x10	445	100
		Б1б	280x10	640x6	200x8	408	92
		Б3	300x12	640x3 гофр.	200x10	361	81
12	12,5	Б1 ²	320x10	640x6	200x10	445	100
		Б1с	320x12	640x6	250x10	500	112
		Б4	300x14	640x3 гофр.	300x10	437	98
	5	Б5 ³	400x12	1040x8	250x10	1529	100
		Б5а	300x12	1040x8	250x8	1369	90
		Б6	300x12	1040x3 гофр.	300x8	883	58
10	Б5 ³	400x12	1040x8	250x10	1529	100	
	Б5б	360x12	1040x3	250x8	1437	94	
	Б7	360x14	1040x3 гофр.	360x8	1064	70	
	Б5 ²	400x12	1040x8	250x10	1529	100	
12,5	Б5с	400x14	1040x8	280x10	1633	107	
	Б8	400x16	1040x3 гофр.	400x12	1373	90	

Примечание: 1 — типовое сечение с избыточной несущей способностью; 2 — типовое сечение с недостаточной несущей способностью; 3 — не обеспечена местная устойчивость сжатого пояса типового сечения.

Таблица 2. Расчетные усилия в подкрановых балках

Пролет балки, м	Грузоподъемность крана Q, т	Для расчета по первой группе предельных состояний			Для расчета по второй группе предельных состояний	
		M_x , т·м	M_y , т·м	Q_{\max} , т	M_x^n , т·м	M_y^n , т·м
6	5	23,13	0,45	16,8	11,25	0,27
	10	32,39	0,8	23,52	15,75	0,47
	12,5	47,81	1,0	34,72	23,25	0,58
12	5	55,26	1,07	22,22	28,2	0,66
	10	77,37	1,9	31,1	39,48	1,17
	12,5	114,21	2,38	45,91	58,28	1,46

для крана $Q = 5$ т; $P_{\max} = 10,5$ т для крана $Q = 10$ т; $P_{\max} = 15,5$ т для крана $Q = 12,5$ т.

Рассмотрены случаи подкрановых балок пролетом 6 м и 12 м. Коэффициенты надежности по нагрузке, коэффициенты динамичности и коэффициенты сочетания нагрузки от двух

мостовых кранов приняты по действующим нормам⁸.

Максимальные расчетные изгибающие моменты в сечениях подкрановых балок определялись при самом

⁸ СП 20.13330.2016, с изм. № 1, № 2, № 3, № 4. Нагрузки и воздействия. М.: Стандартинформ, 2022. 102 с.

неблагоприятном положении одного и двух мостовых кранов по методу Винклера, т. е. при таком положении, когда равнодействующая всех сил, находящихся на балке, и ближайшая к ней сила равноудалены от середины пролета балки. При этом наибольший изгибающий момент возникает под силой, ближайшей к середине пролета балки (Иллюстрация 3). Результаты определения расчетных усилий в сечениях балок приведены в Таблице 2.

Проверка прочности подкрановой балки с гофрированной стенкой

Для подкрановых балок с гофрированной стенкой, так же как и для обычных балок с плоской стенкой, должны быть выполнены следующие условия прочности поясов соответственно верхнего и нижнего:

$$M_x/W_{x1} + M_y/W_{y1} \leq R_y \gamma_c, \tag{1}$$

$$M_x/W_{x2} \leq R_y \gamma_c, \tag{2}$$

где M_x и M_y – расчетные изгибающие моменты в подкрановой балке в вертикальной и горизонтальной плоскостях соответственно;

W_{x1} и W_{y1} – моменты сопротивления сечения в уровне верхнего пояса балки;

W_{x2} – момент сопротивления сечения в уровне нижнего пояса балки;

R_y – расчетное сопротивление материала пояса по пределу текучести;

γ_c – коэффициент условий работы конструкции.

Стенка подкрановой балки находится в условиях сложного напряженного состояния, и ее прочность оценивается из выражения

$$\sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x \sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2} \leq 1,15 R_y \gamma_c, \tag{3}$$

где $\sigma_x = \frac{M_x}{I_x} y$ – нормальные напряжения в стенке на уровне поясного шва;

$\sigma_y = \gamma_f \gamma_{f1} P_{max} / (t_w l_{ef})$ – нормальные напряжения в гофрированной стенке, перпендикулярные продольной оси балки и вызываемые местным давлением колеса крана;

$\tau_{xy} = \gamma_f \gamma_{f1} P_{max} / (0,9 t_w h_w)$ – касательные напряжения в гофрированной стенке под колесом крана.

При проверке прочности балок с плоской стенкой было обнаружено, что для кранов грузоподъемностью 12,5 т размеры типовых балок не удовлетворяют действующим требованиям⁷ и их прочность не обеспечивается. По-видимому, это связано с ужесточением требований к определению расчетных усилий в подкрановых балках в действующих нормах в 2010 г. Так, были увеличены коэффициент надежности по крановой нагрузке и коэффициент динамичности на 10% по сравнению с действовавшими на момент разработки типовых серий в 1980-е гг. В связи с этим в настоящей работе предложены оптимизированные сечения типовых подкрановых балок с плоской стенкой, соответствующие требованиям действующих норм по прочности, устойчивости и деформативности (Таблица 1).

Проверка местной устойчивости сжатых поясов подкрановой балки с гофрированной стенкой

Особенностью элементов с гофрированной стенкой является худшая, по сравнению с классическими решениями с плоской стенкой, местная устойчивость сжатого пояса [3; 5]. Это объясняется тем, что при смещении стенки с продольной оси пояса вследствие ее гофрирования увеличиваются свесы сжатого пояса, он становится более гибким, а значит, менее устойчивым на локальных участках.

Расчетный свес сжатого пояса балки с гофрированной стенкой определяется из выражения

$$b_{ef} = 0,5(b_f + 0,7f), \tag{4}$$

где b_f и f – геометрические размеры сечения (Иллюстрация 1).

При этом гибкость свеса сжатого пояса ограничена так же, как и для балок с плоской стенкой, условием $b_{ef}/t_f \leq 15$.

При проверке местной устойчивости поясов типовых балок с плоской стенкой обнаружено, что некоторые типоразмеры поясов не удовлетворяют действующим требованиям⁷ и местная устойчивость их сжатых поясов не обеспечивается. В связи с чем в настоящей работе предложены оптимизированные сечения типовых подкрановых балок с плоской стенкой, соответствующие требованиям действующих норм по прочности, устойчивости и деформативности (Таблица 1).

Особенности определения прогибов балок с гофрированной стенкой

Поперечные силы, действующие в сечении балки с гофрированной стенкой, существенно влияют на ее деформативные свойства – увеличивают прогиб по сравнению с балкой с плоской стенкой, находящейся в тех же условиях [3; 5].

Расчетный относительный вертикальный прогиб подкрановой балки с гофрированной стенкой должен удовлетворять условию

$$(f/l)_x = \frac{5}{48} \cdot \frac{M_x^n l}{EI_x} + \frac{Q_{max}^n}{4Gh_w t_w} \leq [f/l]_x, \tag{5}$$

где $E = 206\,000$ МПа и $G = 78\,000$ МПа – модуль упругости и модуль сдвига стали соответственно;

$[f/l]_x = 1/400$ – предельный вертикальный прогиб подкрановых балок при мостовых кранах легкого и среднего режимов работы (1К–6К), ограниченный технологическими требованиями.

Расчетный относительный горизонтальный прогиб подкрановой балки с гофрированной стенкой должен удовлетворять условию

$$(f/l)_y = \frac{5}{48} \cdot \frac{M_y^n l}{EI_y} \leq [f/l]_y, \tag{6}$$

где $[f/l]_y$ – предельный горизонтальный прогиб подкрановых балок, ограниченный технологическими требованиями.

Предельные горизонтальные прогибы подкрановых балок при кранах легкого режима работы (1К–3К) ограничиваются величиной 1/500, а при кранах среднего режима работы (4К–6К) – величиной 1/1 000. В рамках настоящего исследования влияние тормозных конструкций подкрановых балок условно не учитывалось. Все подобранные сечения балок удовлетворяют требованиям по деформативности без учета тормозных конструкций при работе кранов легкого режима работы (1К–3К), а с учетом тормозных конструкций и при работе кранов среднего режима работы (4К, 5К). Эксплуатация подкрановых балок без специальных тормозных конструкций при кранах среднего режима работы (4К и более) недопустима вне зависимости от типа стенки балки.

В настоящей работе выполнено сравнение металлоемкости подкрановых балок с гофрированной и плоской стенками (Иллюстрация 4, 5).

Заключение

Анализируя полученные в настоящей работе результаты, можно сделать следующие выводы:



Иллюстрация 4. Гистограмма распределения процентного соотношения веса балок пролетом 6 м для кранов грузоподъемностью от 5 до 12,5 т. Авторы: С. В. Кудрявцев, З. В. Беляева, Ч. Вэйхан, Ч. Пэньюэ



Иллюстрация 5. Гистограмма распределения процентного соотношения веса балок пролетом 12 м для кранов грузоподъемностью от 5 до 12,5 т. Авторы: С. В. Кудрявцев, З. В. Беляева, Ч. Вэйхан, Ч. Пэньюэ

1 Несмотря на укоренившееся в среде проектировщиков мнение, подкрановые балки с плоской стенкой, разработанные в типовых сериях 1980-х и 1990-х гг., не в полной мере соответствуют современным требованиям к таким строительным конструкциям. Их использование без выполнения дополнительных поверочных расчетов невозможно в новых проектах.

2 Сварные конструкции с синусоидальным профилем гофрирования стенки могут быть использованы в качестве подкрановых балок лишь под краны небольшой грузоподъемности (не более 5 т) легкого режима работы (1К–3К) при пролетах здания не более 24 м, т. е. в тех случаях, когда в качестве кранового рельса допустимо применять не специализированный крановый рельс КР70 или железнодорожный рельс Р43, а квадратный профиль 50×50 мм, что вызвано малой высотой их гофр.

3 Эксплуатация подкрановых балок при кранах легкого режима работы (1К–3К) возможна без специальных тормозных конструкций. При кранах среднего режима работы (4К и более) подкрановые балки обязательно должны эксплуатироваться совместно с тормозными конструкциями вне зависимости от типа стенки балки.

4 Для изготовления подкрановых балок рекомендуется применять стенки с треугольным профилем гофрирования с высотой гофр не менее 50 мм.

5 При одинаковой несущей способности подкрановые балки с гофрированной стенкой обладают меньшим весом по сравнению с подкрановыми балками с плоской стенкой, что позволяет сократить металлоемкость таких конструкций до 30% (Иллюстрация 4, 5).

6 Рациональной областью использования подкрановых балок с гофрированной стенкой считаем их применение в производственных зданиях пролетом до 30 м с мостовыми кранами грузоподъемностью до 12,5 т легкого и среднего режимов работы (1К–5К).

Список использованной литературы

[1] Брянцев А. А., Абсиметов В. Э., Лалин В. В. Эффективность применения двутавров с гофрированными

стенками в производственных зданиях // Строительство уникальных зданий и сооружений. — 2017. — № 3 (54). — С. 93–104. — DOI 10.18720/CUBS.54.8.

- [2] Гайфуллина К. В. Перспектива применения двутавров с гофрированными стенками в сейсмостойком строительстве в условиях импортозамещения // VII Международный студенческий строительный форум — 2022: сб. докл. VII Междунар. студ. строит. форума, Белгород, 24 ноября 2022 г. — Белгород: Белгород. гос. технол. ун-т им. В. Г. Шухова, 2022. — С. 33–39. — EDN PDJQRP.
- [3] Кудрявцев С. В. Расчет и проектирование сварных двутавровых профилей с волнистыми стенками. — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2017. — 60 с.
- [4] Макеев С. А., Силина Н. Г., Красотина Л. В., Ступин М. А. Общая устойчивость сварных двутавровых балок с поперечно-гофрированной стенкой // Промышленное и гражданское строительство. — 2023. — № 1. — С. 36–42. — DOI 10.33622/0869–7019.2023.01.36–42. — EDN MCUXEM.
- [5] Максимов Ю. С., Остриков Г. М., Ибраимов Н. Э. Строительные гофрированные конструкции. Результаты исследований, методика расчета, технология изготовления, опыт применения. — LAP LAMBERT Academic Publishing, 2016. — 128 с.
- [6] Попленкин М. С., Сенкевич А. Д., Рябokonь И. Р. Исследование балок с гофрированными стенками // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В. Г. Шухова, посвя. 170-летию со дня рождения В. Г. Шухова: сб. докл., Белгород, 16–17 мая 2023 г. Ч. 6. — Белгород: Белгород. гос. технол. ун-т им. В. Г. Шухова, 2023. — С. 241–251. — EDN MNQIFV.
- [7] Уточкина Д. А. Особенности расчета и проектирования рам с переменной жесткостью из сварных двутавров с гофрированной стенкой // Молодой ученый. — 2023. — № 22 (469). — С. 119–124. — EDN UXTRAD.
- [8] Шустиков И. К., Кадыров Р. Д. Разработка технологии изготовления двутавровой балки с гофрированной стенкой // Проспект Свободный — 2023: материалы XIX Междунар. науч. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Красноярск, 24–29 апреля 2023 г. — Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2023. — С. 1563–1565. — EDN VEPEFS.
- [9] Fernandez-Lacabe D., Lopez C., Serna M. A. Elastic Lateral-Torsional Buckling of Girders with Corrugated Web: Equivalent Section Properties Approach // Proceedings in civil engineering. — 2022. — Vol. 5. Iss. 4. — P. 344–353.
- [10] Jiang Z., Niu Z., Zhang A., Liu X. Desing method of axial compression stability for cross-section corrugated plate steel special-shaped column // Thin-Walled Structures. — 2024. — Vol. 194, Part A. — 111243.
- [11] Kudryavtsev S. V. A Generalized Approach to Estimating the Out-of-plane Buckling of Steel Sections with a Triangularly Corrugated Web // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 1066 (2021) 012002. — DOI 10.1088/1757-899X/1066/1/012002.
- [12] Shaheen Y. B. I., Mahmoud A. M. Lateral-torsional buckling resistance of composite steel beams with corrugated webs // Structural Engineering and Mechanics. — 2022. — Vol. 8, № 6. — P. 751–767.
- [13] Shon S., Jin S., Lee S. Minimum weight design of sinusoidal corrugated web beam using real-coded genetic algorithms // Hindawi Mathematical Problems in Engineering. — 2017. — 9184292.
- [14] Swelem S. M., Fahmy A. S., Sherif N. F. E. Effect of different parameters on lateral-torsional buckling

- behavior of I-girders with circular corrugated webs // J. of Engineering and Applied Science. – 2022. – № 69, 23.
- [15] Tohamy A.S., Badaran S.F., El-Serwi A.A. et al. Comparison of the efficiencies of web cutouts for steel plate girders with corrugated webs versus flat webs under pure shear // Civil and Environmental Engineering. – 2022. – Vol. 18, Iss. 2. – P. 641–654.
- [16] Zewudie B.B., Zerfu K., Agon E.C. Numerical investigation of elastic-plastic buckling performance of circular arched cellular steel beam using nonlinear finite element analysis method // Heliyon. – 2024. – Vol. 10. – e25292.
- [11] Kudryavtsev S.V. A Generalized Approach to Estimating the Out-of-plane Buckling of Steel Sections with a Triangularly Corrugated Web // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 1066 (2021) 012002. – DOI 10.1088/1757-899X/1066/1/012002.
- [12] Shaheen Y.B.I., Mahmoud A.M. Lateral-torsional buckling resistance of composite steel beams with corrugated webs // Structural Engineering and Mechanics. – 2022. – Vol. 8, № 6. – P. 751–767.
- [13] Shon S., Jin S., Lee S. Minimum weight design of sinusoidal corrugated web beam using real-coded genetic algorithms // Hindawi Mathematical Problems in Engineering. – 2017. – 9184292.
- [14] Swelem S.M., Fahmy A.S., Sherif N.F. E. Effect of different parameters on lateral-torsional buckling behavior of I-girders with circular corrugated webs // J. of Engineering and Applied Science. – 2022. – № 69, 23.
- [15] Tohamy A.S., Badaran S.F., El-Serwi A.A. et al. Comparison of the efficiencies of web cutouts for steel plate girders with corrugated webs versus flat webs under pure shear // Civil and Environmental Engineering. – 2022. – Vol. 18, Iss. 2. – P. 641–654.
- [16] Zewudie B.B., Zerfu K., Agon E.C. Numerical investigation of elastic-plastic buckling performance of circular arched cellular steel beam using nonlinear finite element analysis method // Heliyon. – 2024. – Vol. 10. – e25292.
- Статья поступила в редакцию 08.04.2024.
Опубликована 30.06.2024.
- Kudryavtsev Sergey V.**
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Institute of Civil Engineering and Architecture, Ural Federal University (UrFU), Yekaterinburg, Russian Federation
e-mail: s.v.kudryavtsev@urfu.ru
ORCID ID: 0000-0001-8096-4421
- Belyaeva Zoya V.**
Candidate of Technical Sciences, Head of the Department, Institute of Civil Engineering and Architecture, Ural Federal University (UrFU), Yekaterinburg, Russian Federation
e-mail: z.v.beliaeva@urfu.ru
ORCID ID: 0000-0001-7807-7102
- Zhao Weihang**
Graduate Student, Institute of Civil Engineering and Architecture, Ural Federal University (UrFU), Yekaterinburg, Russian Federation
e-mail: zhaoweihang0311@gmail.com
ORCID ID: 0009-0005-7420-9522
- Zhao Pengyue**
Graduate Student, Institute of Civil Engineering and Architecture, Ural Federal University (UrFU), Yekaterinburg, Russian Federation
e-mail: penieue.chzhao@urfu.ru
ORCID ID: 0009-0003-3652-1101