

К вопросу об эффективности применения многослойных плит перекрытий из нержавеющей стали в строительстве

А.Ю. Кузнецов

ООО «КБ Эдельвест», г. Санкт-Петербург

Аннотация: В настоящей статье рассматривается новый вид конструкций в виде легких плит перекрытий из нержавеющей стали, приводится обзор применения в практике строительства, рассматриваются преимущества и имеющиеся недостатки. По результатам проведенной серии конструктивных расчетов нескольких условных моделей зданий с различными конструктивными системами определены параметры экономической эффективности в виде снижения общей металлоемкости. Определена область с повышенной эффективностью применения рассматриваемых плит в зданиях и обозначен вектор необходимых дальнейших исследований по теме.

Ключевые слова: многослойные плиты перекрытий, В-Core плиты, нержавеющая сталь, снижение металлоемкости, эффективная область применения, конструктивные схемы зданий

Введение

Развитие строительной отрасли в современных условиях требует поиска и предложения новых инновационных материалов, технологий и конструктивных решений. Одним из потенциально перспективных направлений исследований является применение многослойных стальных плит в качестве конструкций перекрытий и покрытий для жилых и гражданских зданий.

Для повышения изгибных характеристик сечений, и, как следствие, роста эффективности несущих элементов в практике проектирования стремятся применять сечения, у которых материал расположен как можно дальше от центра тяжести. На этом принципе основано формирование сортаментов металлопроката, конструирование пролетных конструкций ферм, оболочек, перфорированных балок, изготовление стеновых и кровельных сэндвич-панелей для ограждающих элементов. Данный принцип применяется также и в других отраслях, таких, как судостроение и авиастроение, где использование многослойных оболочек на основе сотовых

панелей позволяет получить высокую жесткость при относительно маленьком общем весе конструкции.

Анализируя практику современного строительства, можно заметить, что на российском рынке практически отсутствуют решения с применением плит перекрытий в виде стальных оболочек. Наиболее распространенным решением для зданий из стального каркаса является использование монолитных железобетонных перекрытий по несъемной опалубке в виде профилированного стального листа или сборных пустотных железобетонных плит [1-3]. Хотя нельзя отрицать, что имеется тенденция также к применению облегченных строительных систем перекрытий с использованием пустотообразователей, например, в виде газобетонных или керамических [4]. Относительно новым явлением в практике также является попытка использования в строительстве CLT-панелей в качестве перекрытий в металлокаркасах зданий [5, 6]. Однако все эти решения неизбежно создают значительную нагрузку от собственного веса порядка 250-450кг/кв.м, что составляет до половины общей нагрузки на перекрытие.



Рис. 1. Наиболее распространенные решения облегченных ж.б. перекрытий:
а – сборные пустотные плиты, б – перекрытия с пустотообразователями, в –
перекрытия из CLT-панелей

Недавно на рынках зарубежных стран получило развитие применение многослойных плит перекрытий из нержавеющей стали, которые на аналогичных пролетах позволяют снизить нагрузку в несколько раз - до 30...50кг/кв. Теоретически, использование таких плит может существенно

повлиять на общие конструктивные решения в сторону повышения их эффективности.

До сих пор применение стальных оболочек в качестве элементов перекрытий сдерживалось проблемами, свойственными всем стальным конструкциям: развитие коррозии в труднодоступных местах и сопротивление огневому воздействию. Также представляет проблему и высокая стоимость их изготовления, если, например, сравнивать с уже давно применяемой авиационной сотовой структурой плиты. Однако в 2017 г. в качестве инновационного решения компанией Broad Sustainable Building Co (Китайская народная республика) был предложен новый тип строительной оболочки для перекрытий B-Core плита [7].

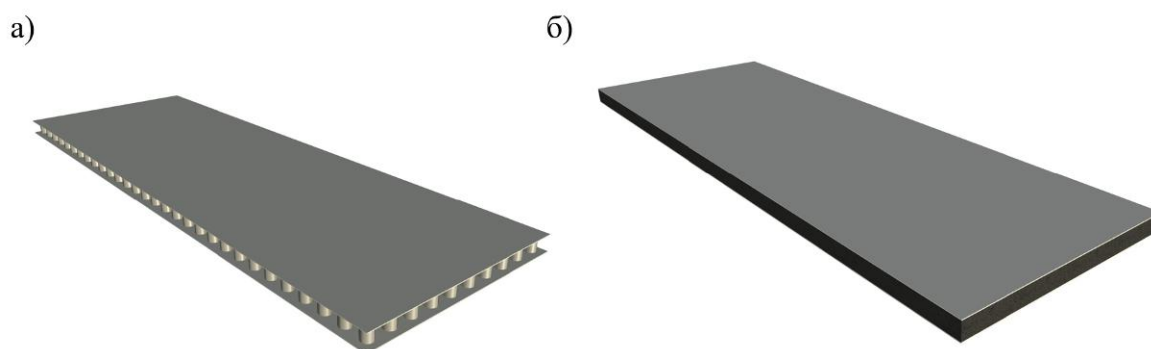


Рис. 2. Многослойные стальные плиты перекрытий: а – плиты B-Core компании Broad Sustainable Building, б – многослойные плиты с заполнением пеностеклом.

Конструкция плиты представляет собой два листа из нержавеющей стали S30408 [8] толщиной порядка 0.7...1.5мм, соединенных между собой массивом сверхтонких трубок 0.1...0.15мм, которые крепятся друг к другу за счет пайки медных колец под воздействием горячего воздуха в специализированных печах. Данные плиты могут иметь пролет до 12м, а ширину до 2м, параметры толщин и размеров, влияющие на несущую способность, могут варьироваться. Внутреннее пространство составной плиты может впоследствии быть заполнено утеплителем. Плиты B-Core

применяются как в качестве перекрытий, так и стеновых несущих конструкций и даже балочных элементов. За счет применения нержавеющей стали плиты имеют высокую коррозионную стойкость и долговечность, а за счет применения пайки для стыковки повышается технологичность производства и снижается себестоимость продукции. В настоящее время ведется исследование свойств огнестойкости данных конструкций, которая может достигаться как за счет устройства огнезащитного покрытия, так и за счет более детального изучения процессов горения [9, 10].

В качестве альтернативного варианта организации многослойной стальной плиты перекрытия может выступать многослойная конструкция с жестким теплоизоляционным слоем. В отличие от обычных сэндвич-панелей, в качестве соединительного элемента может выступать обладающий высокой сдвиговой жесткостью материал, например, пеностекло. Соединение может быть выполнено с применением клеевых составов, устойчивых к высоким температурным воздействиям.

В силу высокой стоимости нержавеющей стали и относительно высокой стоимости технологического процесса производства, многослойные стальные плиты в отрыве от рассмотрения здания в целом не способны конкурировать с классическими решениями по стоимости, такими как сборные пустотные железобетонные плиты. Основной эффект экономии заключается в существенном снижении нагрузок на практически все несущие элементы здания: балки, колонны, связи, фундамент и основания. Для оценки перспективности применения многослойных стальных плит интерес представляет исследование степени возможной экономии на возведение здания в целом.

Методы

Исследование предлагается проводить на основе сравнительных расчетов ряда условных зданий из стального каркаса с различными

конструктивными схемами: связевой (СК), рамно-связевой (РСК) и рамный металлический каркас (РК). Здание в плане представляет собой квадрат со сторонами 18x18м, шаг сетки колонн – 6м, высота этажа – 4м. Высота здания варьируется – 5, 9 и 12 этажей. Колонны каркаса – сварные двутавры, балки – двутавры по ГОСТ Р 57837-2017, связи – квадратные трубы из гнутосварных профилей по ГОСТ 30245-2012. Сталь всех конструкций – С345.

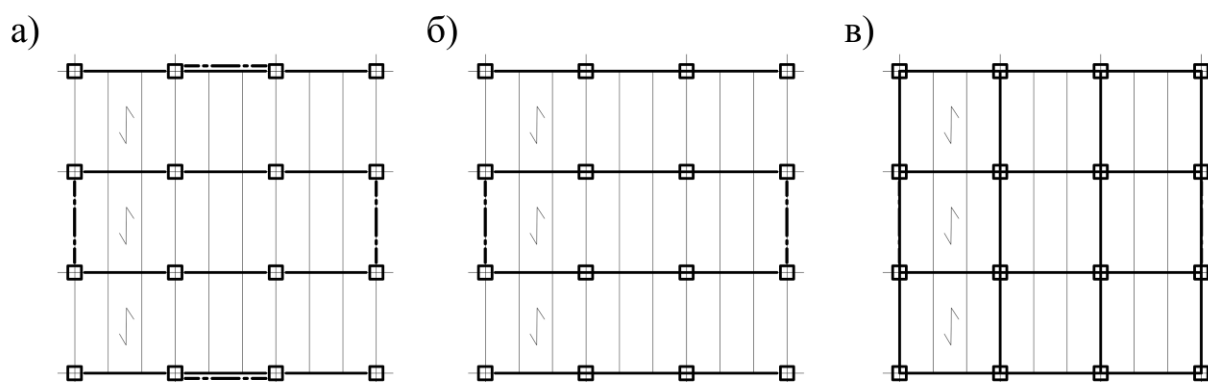


Рис. 3. Конструктивные схемы рассматриваемых зданий(в плане): а – связевой каркас (СК), б –рамно-связевой каркас(РСК), в – рамный каркас(РК).

Помимо нагрузки от собственного веса металлического каркаса, в расчете прикладывались нагрузки от пирогов перекрытий и покрытия, вес перегородок, полезная нагрузка от людей, климатические нагрузки: снеговые и ветровые, для III и IV районов по СП 20.13330.2016 соответственно. Для сравнительного анализа выполнялись отдельные расчетные схемы с использованием сборных железобетонных пустотных плит и многослойных стальных перекрытий. Разница в нагрузке от собственного веса этих плит составляет до 6 раз, с учетом принятых нагрузок от пирогов покрытия – 1.78 раза, а с учетом дополнительно всех полезных действующих нагрузок – 1.44 раза. Отдельно рассматривалась ситуация с особой нагрузкой в виде сейсмического воздействия по СП 14.13330.2018 на уровне 8 баллов, так как

эффект от снижения массы перекрытия для таких условий значительно усиливается.

Расчет выполнялся методом конечных элементов в программном комплексе ЛИРА-САПР. По результатам анализа полученных усилий и расчетных их сочетаний в постпроцессоре конструирования металлоконструкций выполнялась проверка и подбор сечений по первой (прочность, общая и местная устойчивость) и второй (деформации) группам предельных состояний для элементов по СП 16.13330.2017. Для обеспечения унификации элементов были введены группы: для колонн – на каждые 3 этажа, для балок – унификация по грузовым площадям. Процесс поиска окончательных сечений носил итерационный характер, так как при изменении жесткости конструкции происходило перераспределение внутренних усилий, иногда для обеспечения сходимости процесса требовалось выполнить до 12 расчетов одного варианта.

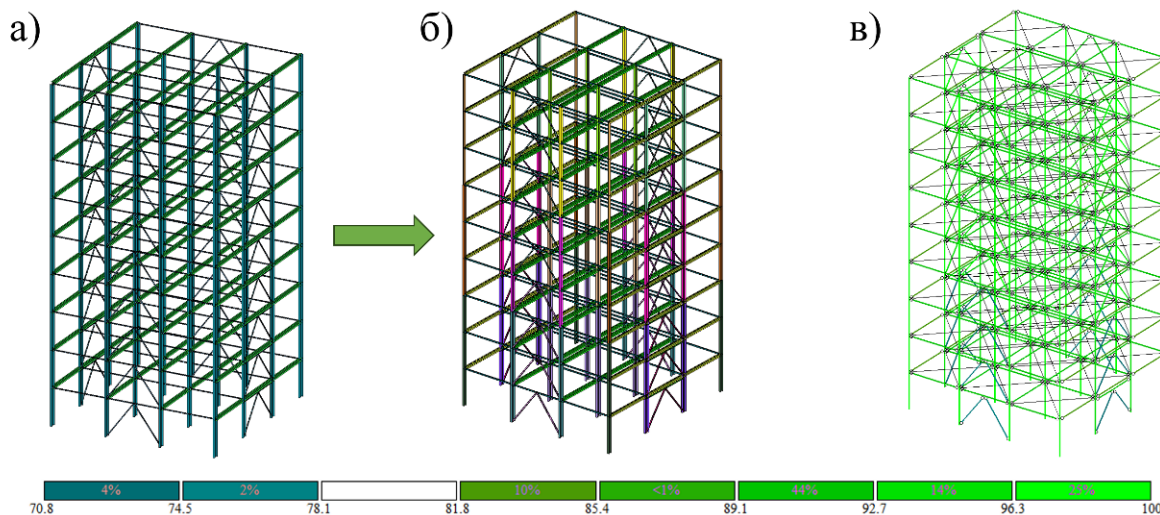


Рис. 4. Итерационный подбор сечений элементов каркаса: а – жесткости для первой итерации, б – жесткости последней итерации, в – графическое отображение коэффициентов использования элементов.

Результаты

Результатом расчета для каждой из рассмотренных ситуаций являлась минимальная металлоемкость основных несущих конструкций, которая отвечает требованиям несущей способности. Полученные результаты расчета для всех конструктивных схем сведены в таблицах 1 – для зданий без учета сейсмического воздействия, 2 – для зданий с учетом сейсмического воздействия.

Таблица № 1. Результаты для зданий без сейсмического воздействия

Тип перекрытия	Конструкции	СК			РСК			РК		
		5	9	12	5	9	12	5	9	12
Многослойные стальные плиты	Балки	23.6	42.5	56.7	18.5	37.3	52.7	31.3	61.9	93
	Колонны	17.5	44.4	69	19.5	48	72.5	25	60.1	101.8
	Связи	19.7	36.5	49.3	14.7	27.4	36.8	-	-	-
	Всего	60.8	123.5	175	52.7	112.7	161.9	56.4	122	194.7
Сборные ж.б. плиты	Балки	26.6	47.8	63.8	22.2	43.3	63.2	34.6	68.59	104.2
	Колонны	21.2	50.4	85.4	23.1	56.3	86.7	29.1	72.7	113.2
	Связи	19.7	36.5	49.3	14.7	27.3	36.8	-	-	-
	Всего	67.5	134.8	198.5	60	126.9	186.7	63.7	141.3	217.4
Процент эффективности по металлоемкости	Балки	11%	11%	11%	17%	14%	17%	10%	10%	11%
	Колонны	17%	12%	19%	16%	15%	16%	14%	17%	10%
	Связи	0%	0%	0%	0%	0%	0%	-	-	-
	Всего	10%	8%	12%	12%	11%	13%	11%	14%	10%

Таблица № 2. Результаты для зданий без сейсмического воздействия

Тип перекрытия	Конструкции	СК			РСК			РК		
		5	9	12	5	9	12	5	9	12
Многослойные стальные плиты	Балки	23.6	42.5	56.7	25	54	79.7	43.7	92.4	148.4
	Колонны	28.7	71.6	111.3	37.8	79.2	118.2	56.6	122.7	220.5
	Связи	23.9	44.3	60.4	17.2	31.8	43.1	-	-	-
	Всего	76.2	158.5	228.4	80	165	241	100.3	215	368.9
Сборные ж.б. плиты	Балки	26.6	47.8	63.8	31.8	68.5	101.6	50.3	112.78	193
	Колонны	34.5	87.4	146	46.4	98.5	151.7	71.5	147.79	272.4
	Связи	25	47.4	64.1	18.1	33.2	45.3	-	-	-
	Всего	86.2	182.6	273.9	96.3	200.3	298.6	121.8	260.6	465.4
Процент эффективности по металлоемкости	Балки	11%	11%	11%	21%	21%	22%	13%	18%	23%
	Колонны	17%	18%	24%	19%	20%	22%	21%	17%	19%
	Связи	4%	7%	6%	5%	4%	5%	-	-	-
	Всего	12%	13%	17%	17%	18%	19%	18%	17%	21%

Анализ результатов расчета показал, что применение многослойных стальных плит перекрытий во всех расчетных ситуациях и схемах конструкций приводит к значительному снижению уровня внутренних усилий, за счет чего можно перейти к несущим элементам из более «легких» профилей. Как следствие, имеется возможность обеспечить заметное снижение общей металлоемкости каркаса здания. Приведенные в таблицах результаты обобщены в виде графиков.

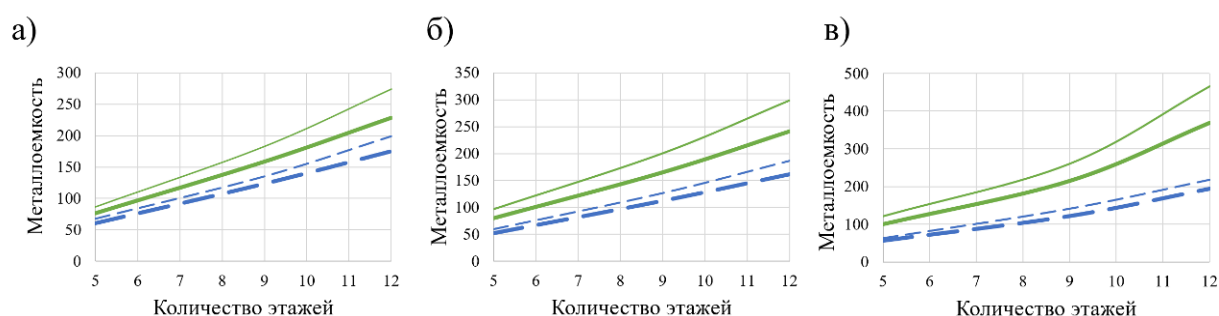


Рис. 5. Графики сравнения общей металлоемкости элементов несущих каркасов зданий зависимости от этажности здания для связевого(а), рамно-связевого(б) и рамного(в) каркасов.

На приведенных графиках показаны зависимости общей металлоемкости несущего каркаса от количества этажей. Пунктирными линиями показаны графики для результатов расчета без учета сейсмического воздействия, сплошным – с учетом. Тонкими линиями показаны результаты расчета для сборных железобетонных перекрытий, толстыми – для многослойных стальных плит.

Как видно из полученных графиков для основных расчетных ситуаций общая металлоемкость каркасов с многослойным стальными плитам перекрытий может быть снижена на заметную величину 8-16%. Экономический эффект применения многослойных стальных плит усиливается до 12-21% и более, если здание проектируется в том числе на сейсмические воздействия. В основном экономия металла наблюдается за

счет уменьшения сечений несущих колонн зданий, которая достигает 25% в отдельных случаях. Также зафиксирована зависимость увеличения эффективности по металлоемкости при увеличении этажности зданий.

Экономический расчет эффективности применения многослойных стальных плит невозможно оценить в отрыве от анализа общих затрат на строительство. С одной стороны, необходимо принимать во внимание дополнительные затраты на организацию огнезащиты таких плит, с другой – учитывать эффекты экономии от упрощения монтажных операций, повышения технологичности производства, снижения нагрузок на нижерасположенные элементы, а также расширяется возможность повторного использования нержавеющей стали.

Обсуждения

В настоящей статье проведен анализ потенциальной эффективности применения многослойных стальных плит как нового типа конструкций перекрытий. У данных конструкций имеется как весомые преимущества, так и определенные недостатки, которые сдерживают их распространение. Описанные выше проблемы требуют детального изучения и проведения дополнительных исследований. Среди основных направлений последующих исследований можно выделить: определение оптимальных параметров изготовления конструкций под различные цели, экспериментальные исследования несущей способности и огнестойкости плит с учетом различных способов огнезащиты, а также исследования в направлении расчета экономического эффекта.

Несмотря на имеющиеся нерешенные вопросы применения конструкций, данный тип конструкций в настоящий момент только выходит на рынок строительной продукции и ему еще только предстоит найти эффективную область своего применения.

Литература

1. Пешнина, И. В., Булдакова А. С. Исследование современных конструктивных решений междуэтажных перекрытий // Общество. Наука. Инновации (НПК-2019) : Сборник статей XIX Всероссийской научно-практической конференции, Киров, 01–26 апреля 2019 года / Вятский государственный университет. Том 2. – Киров: Вятский государственный университет, 2019. – С. 270-275.
2. Овчинникова, С. В. Прикладные аспекты применения расчетного комплекса для моделирования многопустотного монолитного перекрытия // Инженерный вестник Дона. – 2021. – №12. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2021/7351
3. Путс, С. А. Многоэтажный рамный стальной каркас с перекрытиями из сборного железобетона для зданий общественного и производственного назначения // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. – 2010. – №2. – С. 67-68.
4. Сухарева, А. В., Аксенов В. Н. Сравнительный анализ эффективности использования кессонных перекрытий Skydome в современных многоэтажных зданиях при стандартном шаге колонн // Инженерный вестник Дона. – 2016. – № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3885
5. Змеев, М. В. Определение толщины перекрытия из перекрестно-клееных досок на примере CLT-плит Binderholz (Austria) // Инженерный вестник Дона. – 2020. – №11. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2020/6662
6. Комарова М. А., Гришин И. А., Шалабин М. В., Стрекалев А. Н., Мельников Н. О. Исследование огнестойкости и пожарной опасности комбинированных металлодеревянных конструкций // Вестник НИЦ Строительство. – 2023. – №4. – С. 57-67.

7. Shu Xing-Ping, Li Ke, Li Yi, Xiong Zhi-Qi, Huang Yi-Heng, Li Shi-Jie. Experimental investigation on brazing residual stress distribution in 304 L stainless steel core plate // Journal of Constructional Steel Research. – 2022. – Vol. 193. URL: [sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0143974X22001298](https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0143974X22001298)

8. Fan Sheng-Gang, Zheng Jia-Cheng, Sun Wen-Jun, Xia Xin-Feng, Liu Mei-Jing. Experimental investigation on mechanical properties of S30408 austenitic stainless steel at elevated temperatures // Engineering Mechanics . 2017. №34. URL: engineeringmechanics.cn/cn/article/doi/10.6052/j.issn.1000-4750.2015.11.0889

9. Xie Baochao, Hou Jing, Lou Guobiao, Zhang Shiquan, Xi Deng, Liang Cuiliu. Experimental and numerical investigation on temperature field of stainless-steel core plate exposed to fire considering cavity radiation effect // Thin-Walled Structures. 2021. – Vol. 163. URL: [sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263823121001762](https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263823121001762)

10. Xie Baochao, Dai Weiqiang, Zhang Shiquan, Guo Chenyang, Tan Yongqiang, Wang Meinan, Xu Zhisheng, Liu Qiulin. Experimental and numerical investigation on fire resistance of stainless steel core plate beams // Thin-Walled Structures. 2023. – Vol. 190. URL: [sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263823123004263](https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263823123004263)

References

1. Peshnina, I. V., Buldakova A. S. Obshchestvo. Nauka. Innovacii (NPK-2019) : Sbornik statej XIX Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii, Kirov, 01–26 aprelja 2019 goda. Vjatskij gosudarstvennyj universitet. Vol 2. Kirov: Vjatskij gosudarstvennyj universitet, 2019. P. 270-275.
2. Ovchinnikova, S. V. Inzhenernyj vestnik Dona. 2021. №12. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2021/7351
3. Puts, S. A. Akademicheskij vestnik UralNIiproekt RAASN. 2010. №2. P. 67-68.



4. Suhareva, A. V., Aksenov V. N. Inzhenernyj vestnik Dona. 2016. №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3885
5. Zmeev, M. V. Inzhenernyj vestnik Dona. 2020. №11. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2020/6662
6. Komarova M. A., Grishin I. A., Shalabin M. V., Strekalev A. N., Mel'nikov N. O. Vestnik NIC Stroitel'stvo. 2023. № 4. pp. 57-67.
7. Shu Xing-Ping, Li Ke, Li Yi, Xiong Zhi-Qi, Huang Yi-Heng, Li Shi-Jie. Journal of Constructional Steel Research. 2022. Vol. 193. URL: [sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0143974X22001298](https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0143974X22001298)
8. Fan Sheng-Gang, Zheng Jia-Cheng, Sun Wen-Jun, Xia Xin-Feng, Liu Mei-Jing. Engineering Mechanics. 2017. №34. URL: engineeringmechanics.cn/cn/article/doi/10.6052/j.issn.1000-4750.2015.11.0889
9. Xie Baochao, Hou Jing, Lou Guobiao, Zhang Shiquan, Xi Deng, Liang Cuiliu. Thin-Walled Structures. 2021. Vol. 163. URL: [sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263823121001762](https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263823121001762)
10. Xie Baochao, Dai Weiqiang, Zhang Shiquan, Guo Chenyang, Tan Yongqiang, Wang Meinan, Xu Zhisheng, Liu Qiulin. Thin-Walled Structures. 2023. Vol. 190. URL: [sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263823123004263](https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263823123004263)

Дата поступления: 13.04.2024

Дата публикации: 30.05.2024