

UDC 536.1
IRSTI 67.07.11
RESEARCH ARTICLE

REPLACEMENT OF THE FLAT WEB OF THE CRANE RUNWAY BEAM WITH A CORRUGATED WEB

A.A. Bryantsev , D.A. Okanov* 

International Educational Corporation, Almaty, 050043, Kazakhstan

Abstract. *This article is devoted to the study of the possibility of replacing a flat web in runway beams with a corrugated one in order to increase the reliability and stability of welded joints. In the study, an analysis of stresses in the structure of two types of web outlines was carried out, the features and advantages of corrugated webs were revealed. The article provides a detailed overview of the analysis results, demonstrating how a corrugated structure can effectively prevent the separation of welds under the influence of loads. The reasons for choosing this method and its practical applicability in industrial conditions are considered in detail. The study involved a computer experiment, including calculations using the Tonus PC SCAD post-processor, as well as the Lira-SAPR 2022 PC. The stages of the experiment include calculations of the geometric characteristics of various web shapes in the Tonus post-processor, modeling of three-dimensional runway crane beams with flat and corrugated webs, calculation and determination of the maximum normal stresses in the web in PC Lira-SAPR 2022, comparison of the results of beams with flat and corrugated webs and interpretation of the results, and substantiation of conclusions based on the data obtained. The authors highlight the prospects for the application of this approach in various fields of industry, emphasizing its importance for ensuring the safety and durability of crane girder structures. The results obtained are the basis for further research and practical implementation of innovative solutions in the design and operation of industrial facilities.*

Keywords: *runway beam, flat web, corrugated web, static load, overhead crane, flange separation, normal stresses.*

***Corresponding author**

Dias Okanov, e-mail: di.okanov@mok.kz

<https://doi.org/10.51488/1680-080X/2024.1-10>

Received 04 December 2023; Revised 29 January 2024; Accepted 19 February 2024

ӘОЖ 536.1
ҒТАМР 67.07.11
ҒЫЛЫМИ МАҚАЛА

КРАНАСТЫ АРҚАЛЫҒЫНЫҢ ЖАЛПАҚ ҚАБЫРҒАСЫН ГОФРЛЕНГЕН ҚАБЫРҒАҒА АУЫСТЫРУ

А.А. Брянцев , Д.А. Оканов* 

Халықаралық білім беру корпорациясы, Алматы, 050043, Қазақстан

Аңдатпа. Бұл мақала дәнекерленген қосылыстардың сенімділігі мен тұрақтылығын арттыру үшін кран арқалықтарындағы тегіс қабырғаны гофрленген қабырғаға ауыстыру мүмкіндігін зерттеуге арналған. Зерттеу барысында қабырға контурының екі түрінің құрылымындағы кернеулерге талдау жүргізілді, гофрленген қабырғалардың ерекшеліктері мен артықшылықтары анықталды. Мақалада гофрленген құрылымның жүктеме әсерінен дәнекерлеудің үзілуіне қалай тиімді жол бермейтінін көрсететін талдау нәтижелеріне егжей-тегжейлі шолу жасалады. Бұл әдісті таңдаудың себептері және оның өндірістік жағдайда практикалық қолданылуы егжей-тегжейлі қарастырылады. Зерттеуде SCAD BK Topus постпроцессорының, сондай-ақ LIRA-CAD 2022 BK көмегімен есептеулерді қамтитын компьютерлік эксперимент жүргізілді. Эксперименттің кезеңдері Тонус постпроцессорындағы әртүрлі қабырға контурларының геометриялық сипаттамаларын есептеуді, тегіс және гофрленген қабырғалары бар үш өлшемді кран арқалықтарын модельдеуді, Лира-САПР 2022 БК-де қабырғадағы максималды қалыпты кернеулерді есептеу және анықтауды, тегіс және гофрленген қабырғалары бар арқалықтардың нәтижелерін салыстыру және нәтижелерді түсіндіруді және алынған мәліметтер негізінде қорытындыларды негіздеуді қамтиды. Авторлар бұл тәсілді өнеркәсіптің әртүрлі салаларында қолдану перспективаларын атап өтіп, оның кран арқалықтарының конструкцияларының қауіпсіздігі мен беріктігін қамтамасыз етудегі маңыздылығын атап көрсетеді. Алынған нәтижелер өнеркәсіптік құрылыстарды жобалау мен пайдалануға инновациялық шешімдерді одан әрі зерттеу және практикалық енгізу үшін негіз болып табылады.

Түйін сөздер: кран арқалығы, жалпақ қабырға, гофрленген қабырға, статикалық жүктеме, көпір краны, сөре үзілісі, қалыпты кернеулер.

*Автор-корреспондент

Диас Оканов, e-mail: di.okanov@mok.kz

<https://doi.org/10.51488/1680-080X/2024.1-10>

Алынды 04 желтоқсан 2023; Қайта қаралды 29 қаңтар 2024; Қабылданды 19 ақпан 2024

УДК 536.1
МРНТИ 67.07.11
НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

ЗАМЕНА ПЛОСКОЙ СТЕНКИ ПОДКРАНОВОЙ БАЛКИ НА ГОФРИРОВАННУЮ СТЕНКУ

А.А. Брянцев , Д.А. Оканов* 

Международная образовательная корпорация, Алматы, 050028, Казахстан

Аннотация. Данная статья посвящена исследованию возможности замены плоской стенки в подкрановых балках на гофрированную с целью повышения надежности и устойчивости сварных соединений. В ходе исследования проведен анализ напряжений в структуре двух типов очертаний стенок, выявлены особенности и преимущества гофрированных стенок. Статья предоставляет детальный обзор результатов анализа, демонстрируя, как гофрированная структура может эффективно предотвращать отрыв сварных швов под воздействием нагрузок. Подробно рассматриваются причины выбора данного метода и его практическая применимость в промышленных условиях. В исследовании был проведен компьютерный эксперимент, включающий в себя расчеты с использованием постпроцессора Тонус ПК SCAD, а также ПК Лири-САПР 2022. Этапы проведения эксперимента включают в себя расчеты геометрических характеристик различных очертаний стенки в постпроцессоре Тонус, моделирование трехмерных подкрановых балок с плоскими и гофрированными стенками, расчет и определение максимальных нормальных напряжений в стенке в ПК Лири-САПР 2022, сравнение результатов балок с плоскими и гофрированными стенками и интерпретацию результатов, и обоснование выводов на основе полученных данных. Авторы выделяют перспективы применения данного подхода в различных областях промышленности, подчеркивая его важность для обеспечения безопасности и долговечности конструкций подкрановых балок. Полученные результаты являются основой для дальнейших исследований и практического внедрения инновационных решений в проектирование и эксплуатацию промышленных сооружений.

Ключевые слова: подкрановая балка, плоская стенка, гофрированная стенка, статическая нагрузка, мостовой кран, отрыв пояса, нормальные напряжения.

*Автор-корреспондент

Диас Оканов, e-mail: di.okanov@mok.kz

<https://doi.org/10.51488/1680-080X/2024.1-10>

Поступило 04 декабря 2023; Пересмотрено 29 января 2024; Принято 19 февраля 2024

ACKNOWLEDGEMENTS/SOURCE OF FUNDING

The study was conducted using private sources of funding.

CONFLICT OF INTEREST

The authors state that there is no conflict of interest.

АЛҒЫС / ҚАРЖЫЛАНДЫРУ КӨЗІ

Зерттеу жеке қаржыландыру көздерін пайдалана отырып жүргізілді.

МҮДДЕЛЕР ҚАҚТЫҒЫСЫ

Авторлар мүдделер қақтығысы жоқ деп мәлімдейді.

БЛАГОДАРНОСТИ/ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование проводилось с использованием частных источников финансирования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что конфликта интересов нет.

1 ВВЕДЕНИЕ

В последние годы подкрановым балкам уделяется большое внимание из-за роста строительства производственных зданий. Их надежность, прочность и эффективность позволяют улучшить производственные и логистические процессы, а также обеспечить безопасность при работе с тяжелыми нагрузками. Подкрановая балка – несущая конструкция, воспринимающая нагрузки от колес мостового крана, перемещающего груз в пределах цеха. Кроме того, подкрановые конструкции, как составные элементы каркаса, обеспечивают развязку колонн из плоскости рамы, передачу продольных усилий от тормозных нагрузок и ветровых нагрузок на вертикальные связи между колоннами, а также смягчают воздействие сейсмических и других факторов, способствуя скоординированной работе всей конструкции. Однако, подкрановая балка, как и любая конструкция, имеет проблемы, которые нужно решать.

Вследствие статических и динамических нагрузок в конструкции могут возникать повреждения, основным видом из которых являются трещины, образующиеся в верхнем поясе и в околошовной зоне. Также наблюдаются повреждения швов крепления тормозных устройств к подкрановым балкам и повреждения элементов узлов крепления балок к колоннам. Следует отметить, что дефекты в изготовлении и монтаже конструкций, такие как плохое качество сварки, неточности в монтаже и смещения рельса относительно оси подкрановой балки, способствуют преждевременному появлению этих повреждений (Kudishin, 2011).

При некоторых обстоятельствах в промышленных зданиях появляется необходимость использования подкрановых балок с гофрированной стенкой, пример которой показан на **Рисунке 1**, которая в значительной степени влияет на их прочность и устойчивость. Экономия стали достигает 20% за счет применения более тонкой стенки (Maximov et al., 2016), по сравнению с плоской и отказа от ребер жёсткости из-за улучшения устойчивости благодаря загибам гофры, вершины которых находятся вне плоскости стенки.



Рисунок 1 – Производство балки с гофрированной вертикальной стенкой на Челябинском металлургическом комбинате (материал авторов)

Разрушение балок с гофрированной стенкой сопровождается местной потерей устойчивости (в пределах одного гофра), либо общей потерей устойчивости стенки (одновременно в пределах нескольких гофров). Также исчерпание несущей способности может быть вызвано достижением предела текучести в сжатом поясе и деформацией его сечения.

2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Известные конструктивные решения рассматриваемых в настоящей работе балок хорошо поддаются классификации по следующим признакам.

А. По очертанию поверхности стенки:

- балки с гибкой (плоской, гладкой) стенкой;
- балки с гофрированной стенкой;
- балки с переменногофрированной стенкой.

Частое повреждение подкрановой балки – отрыв сварного шва стенки и верхнего пояса, как изображено на **Рисунке 2**. Это происходит из-за динамических нагрузок от движения мостового крана, его тележки с грузом, а также из-за появления эксцентриситета по причине смещения рельса вследствие длительной работы.



Рисунок 2 – Отрыв сварного шва, прикрепляющего стенку и вертикальное ребро жесткости к верхнему поясу подкрановой балки (материал авторов).

В 1972 году в Пензенском инженерно-строительном институте под руководством Е. И. Белени был создан стенд для тестирования подкрановых балок, имитирующих работу мостовых кранов тяжелого режима (**Nezhdanov, 2011**). В качестве первых испытуемых были выбраны балки традиционной формы, иллюстрированная на **Рисунке 3** изготовленные из стали ВСтЗпс5 (С255), с поперечными ребрами жесткости. Количество циклов нагружения достигало двух миллионов. Особенностью испытаний стала проверка балок без ребер, с гибкостью стенки 100 и подвижно-сосредоточенным нагружением с эксцентриситетом. Это создавало условия для локальной потери устойчивости. Волна вогнутости перемещалась за колесом, а в некоторых случаях было отмечено повышение выносливости. Это привело к благоприятному распределению локальных напряжений и увеличению давления от рельса на большую длину стенки, в результате чего появилась новая форма подкрановой балки, придающая стенке анизотропные характеристики, изображенные на **Рисунке 4**.

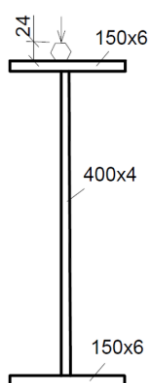


Рисунок 3 – Традиционное поперечное сечение сварной балки.

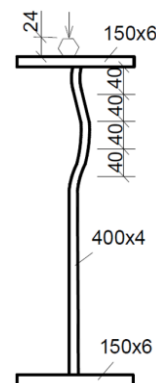


Рисунок 4 – Балка с продольными гофрами в стенке (**Nezhdanov, 2011**).

В 2015 году были проанализированы на предмет боковой изгиб при кручении подкрановые балки при трех группах мостовых кранов и разработана синусоидальная стенка. В результате был предложен новый метод разработки синусоидальных подкрановых балок (**Maali et al., 2015**).

Изгиб подкрановой балки непосредственно влияет на вероятность отрыва поясов от стенки. В 2017 году В. Вашкова, Р. Фойтик и Д. Пустка провели эксперимент со статическим нагружением подкрановой балки с плоской стенкой. Проводилось 5 нагружений с разным расположением мостового крана. Максимальное значение прогиба оказалось при нахождении мостового крана у первой опоры – 11,58 мм (**Vaškova et al., 2015**).

В 2018 году были проведены новые исследования для оценки усталостной прочности соединения верхней полки со стенками при сосредоточенных нагрузках от колеса. Результатом стали рекомендации для угла сварного шва для разных категорий деталей (**Citarellia & Feldman, 2019**).

П. Коссаковский, В. Вчишлик и М. Бакаларж в 2019 году провели визуальный и детальный осмотры подкрановых путей производственного завода в г. Кельце, Польша. Осмотры выявили ослабление и разрушение соединений рельс-балок, а также значительные горизонтальные и вертикальные отклонения расположения рельсов от указанных в стандарте PN-EN 1090-2:2009P. Согласно данному нормативному документу, при осевом расстоянии между рельсами $s = 30,5$ м, максимальное отклонение осевого расстояния составляет ± 8.6 мм. Отклонения варьировались от -1 до 15 мм (**Kossakowski et al., 2019**).

В 2020 году Матиас Ойлер и Колин провели исследование по усталостной прочности подкрановых балок. Представлено новое предложение по прогнозированию усталостной нагрузки балок подкранового пути в зависимости от типа работы крана (**Euler & Taylor, 2019**).

Для детального изучения вопроса о влиянии давления колес под эксцентриситетом на проверку усталости соединения полка-стенка и, следовательно, на требуемые размеры балки в рамках исследовательского проекта в 2020 году были проведены экспериментальные и численные исследования влияния продольной жесткости в различных системах. Сравнение с лабораторными испытаниями и проведенными численными расчетами показывает, что расширенная модель способна точно отражать увеличение напряжений изгиба за счет дополнительных продольных ребер жесткости (**Kettler et al., 2019**).

В 2021 году была предпринята попытка установить логическую процедуру проектирования балок подкрановых путей, основанную на расширении методов проектирования предельных состояний на двухосный изгиб. В уравнения взаимодействия включен дополнительный член для отношения расчетного момента к сопротивлению скручиванию секции. Сделаны предложения по определению сопротивления этого участка. Исследования показали, что это дополнение может обеспечить снижение сопротивления продольному скручиванию, вызванному поворотами скручивания (**Trahair, 2021**).

В работе 2022 года авторы проанализировали несколько вариантов соединений блочного рельса и подкрановой балки. Они сравнили локальные вертикальные сжимающие напряжения в стенке балки подкрановой пути, рассчитанные с использованием аналитического подхода и численного моделирования. На локальное вертикальное сжимающее напряжение в стенке балки подкранового пути существенное влияние оказывали соединение рельса с балкой подкранового пути, тип соединения подкранового рельса, использование и длина эластомерной опорной подушки и износ крановых рельсов (**Polus et al., 2022**).

В том же году было проведено обследование цеха металлоконструкций, в котором крановые пути были установлены эксцентрично, и работа крана вызвала большой прогиб подкрановой балки, что потребовало принятия мер по усилению. Была создана конечно-элементная модель подкрановой балки и проанализированы максимальное напряжение, прогиб и амплитуда. Результаты показывают, что при отсутствии тормозной фермы максимальное напряжение и прогиб подкрановой балки значительно возрастают под действием внецентренной нагрузки (**Lu et al., 2022**).

В 2023 году немецкие исследователи рассмотрели влияние рельсовых стыков на местные напряжения в подкрановых балках. Представленные результаты исследований подтвердили, что на максимальные локальные вертикальные напряжения в стенках подкрановых балок сильное влияние оказывают разрывы подкрановых рельсов. На основе экспериментальных испытаний, а также численно-параметрических исследований разработаны коэффициенты повышения напряжений для максимальных вертикальных напряжений, характеризующие значительное увеличение локальных максимальных напряжений в зоне под стыками рельсов по сравнению с эталонными случаями с непрерывными рельсами ([Kettler et al., 2023](#)).

В том же году венгерские и немецкие ученые оценили упругое и неупругое сопротивление продольному изгибу двутавровых балок с синусоидальной гофрированной стенкой с помощью расширенного метода конечных элементов тонкостенной балки-колонны с 22 степенями свободы. Основываясь на результатах расширенного моделирования методом конечных элементов, параметрическое исследование показало, что стандартный коэффициент несовершенства приводит к консервативным результатам для прогнозирования неупругого сопротивления продольному изгибу синусоидально гофрированных балок, поэтому предлагается более точный, но все же безопасный коэффициент несовершенства для синусоидально гофрированных балок. гофрированные балки ([Hajdú et al., 2023](#)).

Одним из решений проблемы по предотвращению отрыва верхнего пояса от стенки может стать замена плоской стенки на гофрированную.

3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Настоящая статья посвящена исследованию перспектив замены плоских стенок подкрановых балок на гофрированные стенки с целью улучшения их технических характеристик.

Для проведения исследования был использован компьютерный эксперимент, включающий в себя расчеты с использованием постпроцессора Тонус ПК SCAD, а также ПК Лира-САПР 2022.

Этапы проведения эксперимента включают в себя несколько ключевых шагов.

На первом этапе проводились расчеты в постпроцессоре Тонус. Этот этап включал в себя определение геометрических характеристик различных очертаний стенки подкрановой балки и нахождения оптимальной.

Второй этап включал в себя моделирование трехмерных подкрановых балок с плоскими и гофрированными стенками в ПК Лира-САПР 2022. Учитывались размеры, форма каждой модели, а также задавались граничные условия, учитывающие особенности эксплуатационных нагрузок и условия эксплуатации балок.

Третий этап включал расчеты в ПК Лира-САПР 2022. На этом этапе проводился расчет и определение максимальных нормальных напряжений в стенке подкрановой балки с эксцентриситетом и без него.

Четвертый этап включал сравнительный анализ. Здесь проводилось сопоставление результатов для балок с плоскими и гофрированными стенками с целью определения пользы от замены стенки.

Пятый этап включал интерпретацию результатов и обоснование выводов на основе полученных данных. В рамках этого этапа выявлялись преимущества и потенциальные ограничения использования гофрированных стенок.

4 РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Были выбраны одна плоская ([Таблица 1](#)) и пять гофрированных треугольных стенок с различными размерами очертания. За опорный объект, с которым будут сравниваться, взята балка с плоской стенкой, которая иллюстрирована на [Рисунке 5](#).

Размерные характеристики балки с плоской стенкой представлены в таблице 1 ([Melnikov et al., 1982](#)).

Таблица 1
Размерные характеристики ПС

h_w	t_w	b_f^1	t_f^1	b_f^2	t_f^2	h
640	6	250	10	200	10	660

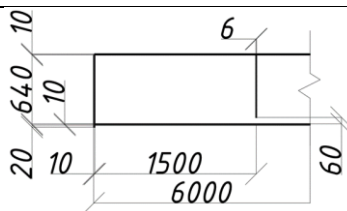


Рисунок 5 – Размеры подкрановой балки с плоской стенкой:

h_w – высота стенки, t_w – толщина стенки, b_f^1 – ширина верхнего пояса, t_f^1 – толщина верхнего пояса, b_f^2 – ширина нижнего пояса, t_f^2 – толщина нижнего пояса, h – высота балки (материал авторов).

Так же были определены координаты крайних точек гофрированной стенки, которые показаны на **Рисунке 6**.

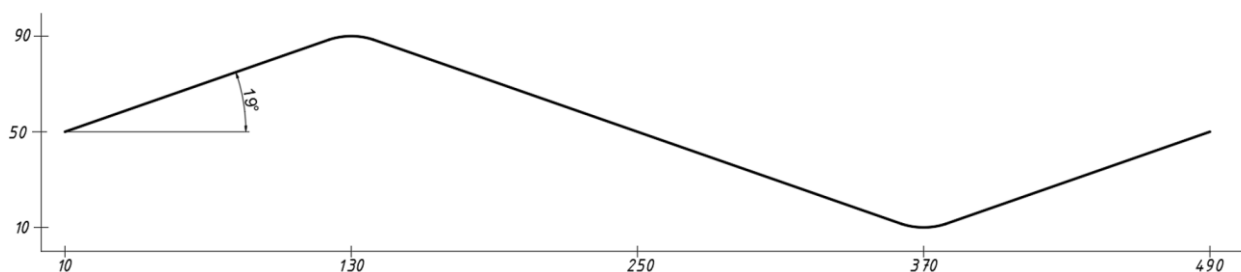


Рисунок 6 – Расположение точек ГС 480x80x6/30 по координатам (материал авторов).

Далее эти координаты, изображенные на **Рисунке 7**, были введены в постпроцессор расчётного комплекса SCAD Тонус для определения геометрических характеристик.

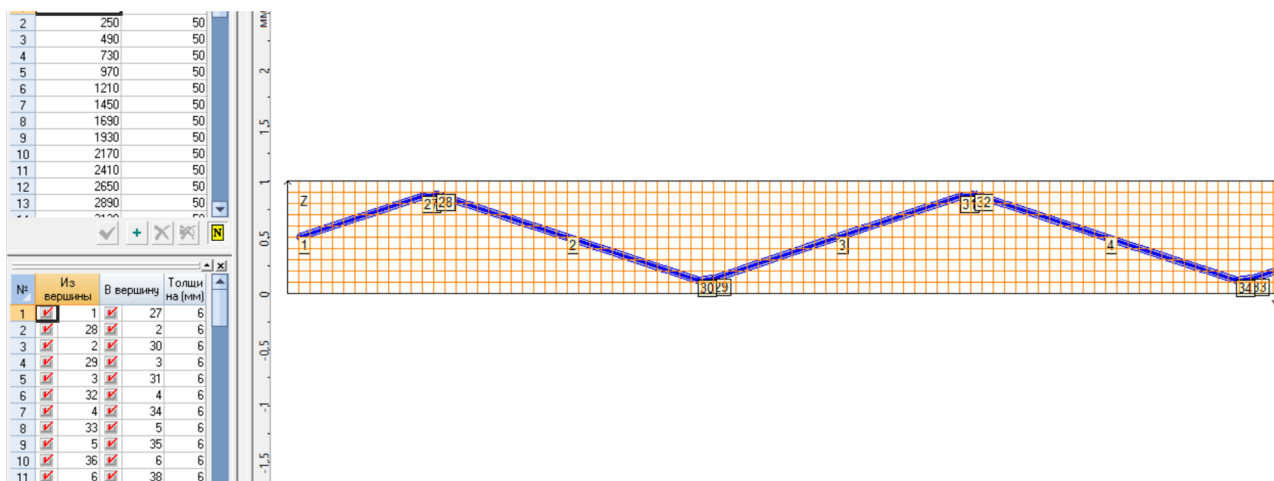


Рисунок 7 – Задание координат ГС Каз. 480x80x6/30 в постпроцессоре SCAD Тонус (материал авторов).

Основные параметры для сравнительного анализа для плоской и гофрированной стенок толщиной 6 мм приведены в **Таблице 2**.

Таблица 2

Размерные характеристики гофра

Наименование показателя	Толщина стенки 6 мм				
	ГС Каз. 280x45x6/30	ГС Каз. 360x60x6/30	ГС Каз. 420x70x6/30	ГС Каз. 480x70x6/30	ГС Каз. 480x80x6/30
Вид гофрированной стенки					
Длина полуволны гофра a , мм	140	180	210	240	240
Высота волны гофра f , мм	45	60	70	70	80
Радиус скругления r , мм	30	30	30	30	30
Ширина панели гофра b_w , мм	147.1	189.7	221.4	250.0	253.0
Толщина стенки t_w , мм	6	6	6	6	6
Гибкость панели стенки h_w/t_w	24.5	31.6	36.9	41.7	42.2

Рассматривались балки длиной 6 м для определения точных показателей характеристики. При сравнении момента инерции, момента сопротивления, приведенного момента инерции, то есть отношения момента инерции к площади поперечного сечения, становится видна тенденция увеличения показателя по мере удлинения длины гофры (Таблица 3). Самой эффективной является ГС Каз. 480x80x6/30.

Таблица 3

Геометрические характеристики стенки

Наименование показателя	ПС	ГС Каз. 280x45x6/30	ГС Каз. 360x60x6/30	ГС Каз. 420x70x6/30	ГС Каз. 480x70x6/30	ГС Каз. 480x80x6/30
Длина рассмотренного отсека стенки, мм	6000	6000	6000	6000	6000	6000
Площадь поперечного сечения, $см^2$	360.00	374.89	377.83	378.00	374.14	378.21
Длина стенки, мм	6000.00	6316.43	6336.79	6328.18	6256.00	6333.34
Момент инерции относительно центральной оси U_1 , $см^4$	10.80	558.66	1089.74	1505.63	1498.42	1964.84
Приведенный Момент инерции относительно центральной оси U_1 , $см^4 / 1 см^2$ площади	0.030	1.490	2.884	3.983	4.005	5.195
Радиус инерции относительно центральной оси U_1 , см	0.173	1.221	1.698	1.996	2.001	2.279
Минимальный момент сопротивления относительно оси V , $см^3$	36	240.52	345.668	411.558	401.783	468.083
Приведенный Минимальный момент сопротивления относительно оси V $см^3 / 1 см^2$ площади	0.100	0.642	0.915	1.089	1.074	1.238
Приведенный момент инерции относительно центральной оси U_1 , $см^4 / 1 кг$ массы стали гофра	3.82	189.83	367.41	507.40	510.19	661.79
Приведенный момент сопротивления относительно центральной оси U_1 $см^4 / 1 кг$ массы стали гофра	12.74	81.73	116.54	138.70	136.80	157.66
Эквивалентная толщина плоской стенки, мм		22.4	27.9	31.1	31.1	34.0
Расход стали на 1 п.м. стенки	0.471	0.490	0.494	0.495	0.490	0.495
Процентное отношение по расходу стали к ГС Каз. 280x45	96.03%	100.0%	100.8%	100.8%	99.8%	100.9%

Подкрановая балка воспринимает нагрузку от веса мостового крана. Был выбран кран грузоподъемностью 50/12,5 т. В расчёте учтены вес подкрановых конструкций, максимальное усилие на колесе крана, сумма ординат усилий. Ниже приведен **Рисунок 8**, на котором показано приложение сосредоточенной нагрузки от колеса мостового крана величиной 35,5 т. Расчет проводился в ПК Лира-САПР 2022.

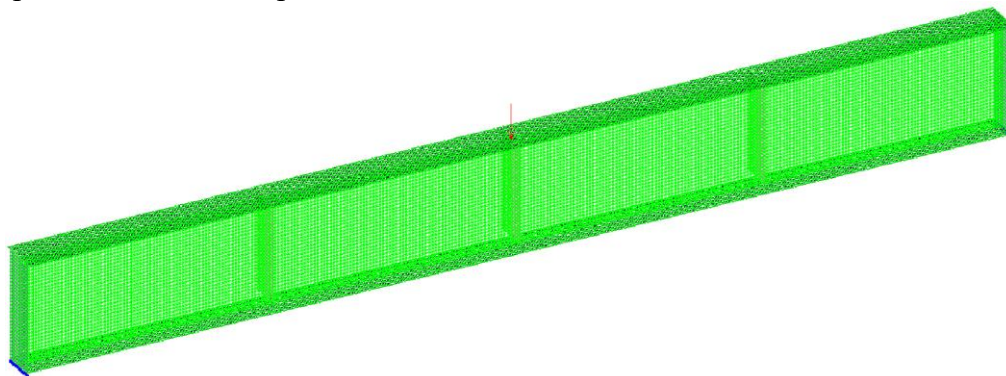


Рисунок 8 – Общий вид модели подкрановой балки пролетом 6,0 м с плоской стенкой, нагруженной в середине пролета колесом крана грузоподъемностью 50/12,5 т режима работы 6К (материал авторов).

Так же была смоделирована идентичная балка с приложением нагрузки с эксцентриситетом 20 мм, которая изображена на **Рисунке 9**, для имитации смещения рельса.

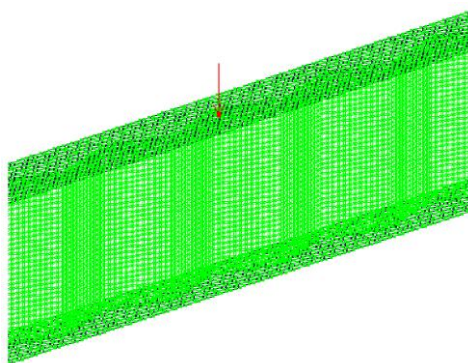


Рисунок 9 – Вид модели подкрановой балки пролетом 6,0 м со стенкой ГС Каз. 480x80x6/30, нагруженной в середине пролета колесом крана грузоподъемностью 50/12,5 т режима работы 6К (материал авторов).

4.1 НАПРЯЖЕНИЯ ПО N_x

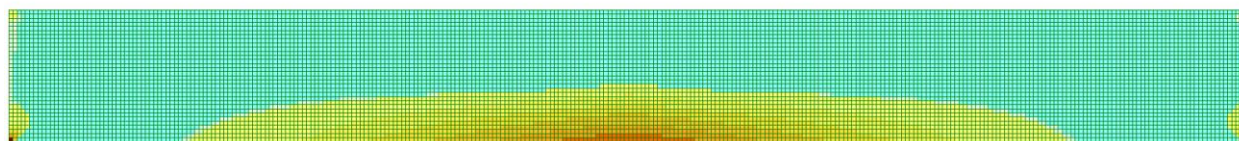


Рисунок 10 – Мозаика напряжений по N_x плоской стенке с ребрами жесткости при нулевом эксцентриситете (материал авторов).

По результатам расчета по N_x , которые показаны на **Рисунке 10**, максимальные положительные напряжения находятся в нижней части стенки в середине балки и углах, величиной 46300 т/м^2 . В середине это происходит вследствие нормальной работы изгибаемой конструкции на двух опорах, в которой верхние волокна воспринимают сжимающие усилия, а нижние – растягивающие. В углах – из-за отрывания стенки от нижней полки опорного ребра.

Наибольшие отрицательные напряжения наблюдаются в середине балки в верхней части стенки под полкой величиной 140 т/м^2 вследствие изгиба от собственного веса и приложения нагрузки. По всей стенке происходит равномерное рассеивание напряжения.

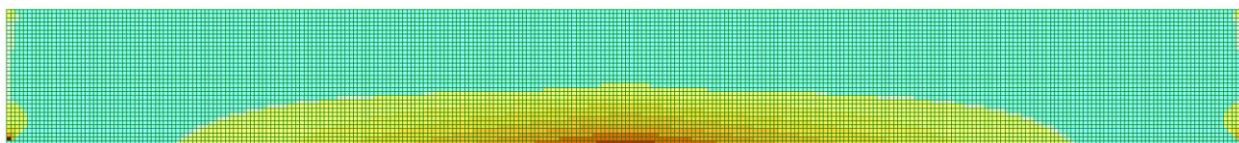


Рисунок 11 – Мозаика напряжений по N_x плоской стенки с ребрами жесткости при эксцентриситете 20 мм (материал авторов).

По положительным напряжениям, проиллюстрированные на **Рисунке 11**, максимальные усилия величиной 23200 т/м^2 находятся в нижних углах. Также большие напряжения в середине балки в нижней части стенки. В углах это происходит из-за отрывания стенки от нижней полки опорного ребра, в середине – вследствие нормальной работы изгибаемой конструкции на двух опорах, в которой верхние волокна воспринимают сжимающие усилия, а нижние – растягивающие.

Наибольшие отрицательные напряжения наблюдаются в середине балки в верхней части стенки под полкой величиной 140 т/м^2 вследствие изгиба от собственного веса и приложения нагрузки. По всей стенке происходит равномерное рассеивание напряжения.

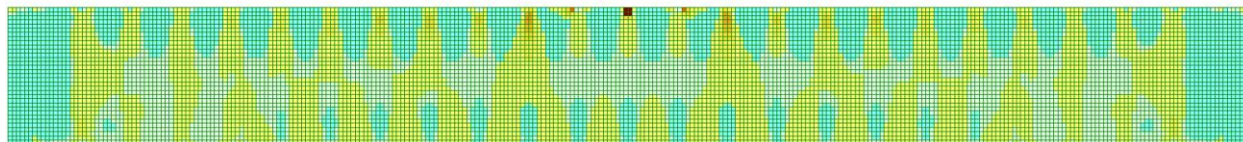
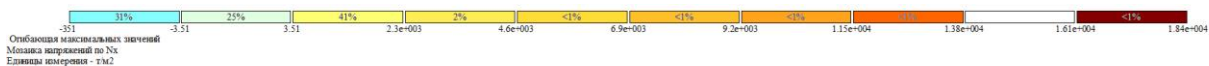


Рисунок 12 – Мозаика напряжений по N_x гофрированной стенки при нулевом эксцентриситете (материал авторов).

Максимальные напряжения величиной 18400 т/м^2 , изображенные на **Рисунке 12**, наблюдаются в зоне приложения нагрузки из-за того, что стенка не находится на оси загрузки и полка воспринимая на себя растягивает стенку. Также положительные значения находятся вдоль всех загибов гофров, так как они являются соединяющим элементом верхней и нижней полок.

Наибольшие отрицательные напряжения происходят в нижних углах стенки величиной 351 т/м^2 вследствие сжимающих усилий от нижней полки и опорного ребра. Также большие отрицательные значения располагаются в участках стенок, отдаленных от загибов гофра.

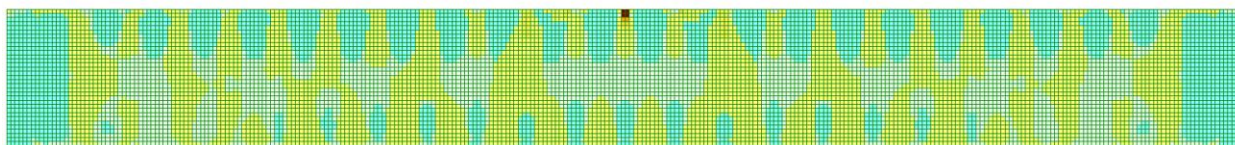
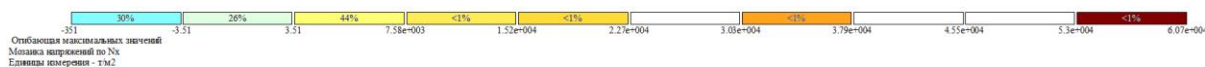


Рисунок 13 – Мозаика напряжений по N_x гофрированной стенки при эксцентриситете 20 мм (материал авторов).

Наибольшие напряжения величиной 60700 т/м^2 , которые показаны на **Рисунке 13**, расположены в зоне приложения нагрузки из-за того, что стенка не находится на оси загрузки и полка воспринимая на себя растягивает стенку. Также положительные значения находятся вдоль всех загибов гофров, так как они являются соединяющим элементом верхней и нижней полок.

Максимальные отрицательные напряжения наблюдаются в нижних углах стенки величиной 351 т/м^2 вследствие сжимающих усилий от нижней полки и опорного ребра. Также большие отрицательные значения располагаются в участках стенок, отдаленных от загибов гофра.

4.2 НАПРЯЖЕНИЯ N_y

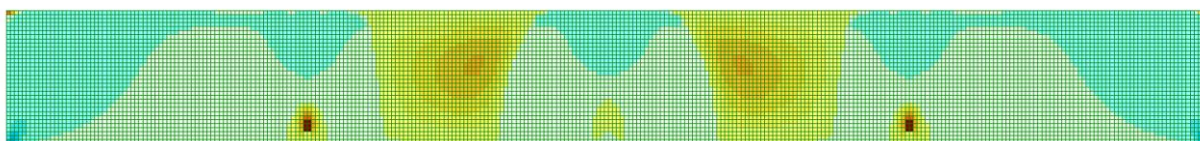


Рисунок 14 – Мозаика напряжений по N_y плоской стенке с ребрами жесткости при нулевом эксцентриситете (материал авторов).

Наибольшие положительные напряжения величиной 510 т/м^2 , которые проиллюстрированы на **Рисунке 14**, в нижней четверти в крайних ребрах жесткости, так как они воспринимают большую часть растягивающих усилий. Также большие положительные напряжения в середине балки в отдаленных от ребер жесткости участках стенки.

Максимальные отрицательные напряжения величиной 280 т/м^2 наблюдаются в нижних углах стенки вследствие сжатия нижней полкой и опорным ребром в результате изгиба балки. В целом большие отрицательные усилия расположены по краям балки и в верхних половинах стенки в зонах ребер жесткости.

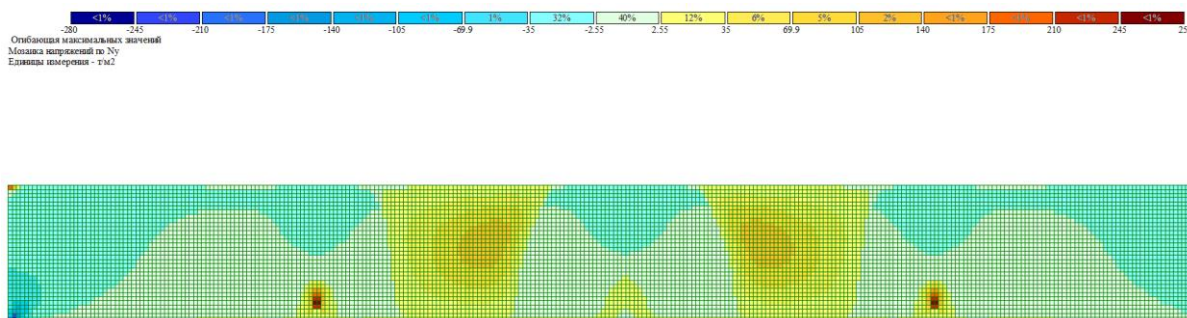


Рисунок 15 – Мозаика напряжений по N_y плоской стенке с ребрами жесткости при эксцентриситете 20 мм (материал авторов).

Максимальные положительные напряжения величиной 255 т/м^2 , которые изображены на **Рисунке 15**, в нижней четверти в крайних ребрах жесткости, так как они воспринимают большую часть растягивающих усилий. Они меньше, чем при нулевом эксцентриситете, потому что растягивающие усилия больше распределяются по нижней части стенки. Также большие положительные напряжения в середине балки в отдаленных от ребер жесткости участках стенки.

Наибольшие отрицательные напряжения величиной 280 т/м^2 наблюдаются в нижних углах стенки вследствие сжатия нижней полкой и опорным ребром в результате изгиба балки. В целом большие отрицательные усилия расположены по краям балки и в верхних половинах стенки в зонах ребер жесткости.

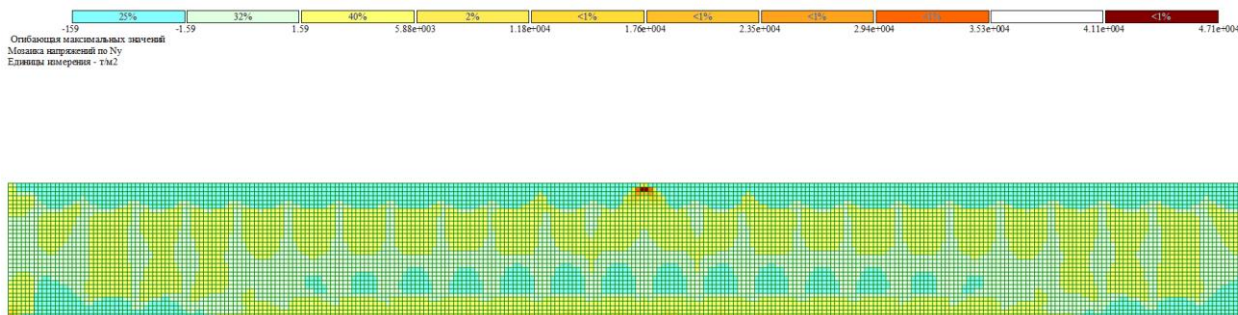


Рисунок 16 – Мозаика положительных напряжений по N_y гофрированной стенки при нулевом эксцентриситете (материал авторов).

Наибольшие положительные напряжения величиной 47100 т/м^2 , которые показаны на **Рисунке 16**, наблюдаются в зоне приложения нагрузки из-за того, что стенка не находится на оси загрузки и полка воспринимая на себя усилие, растягивает стенку. Также положительные значения находятся в верхней четверти под сжатой зоной, в участках стенок, отдаленных от загибов гофра и нижней части стенки.

Максимальные отрицательные напряжения величиной 159 т/м^2 наблюдаются в середине балки под верхней полкой, исключая непосредственно точку приложения нагрузки, так усилие приложено не по оси гофры. Также большие отрицательные значения располагаются под всей верхней полкой, в нижней четверти над растянутой зоной в участках стенок, отдаленных от загибов гофра и в нижних углах.

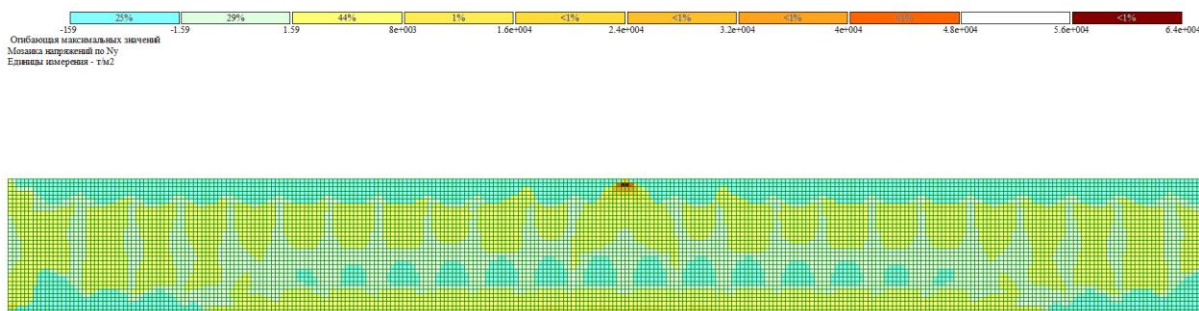


Рисунок 17 – Мозаика напряжений по N_y гофрированной стенки при эксцентриситете 20 мм (материал авторов).

Максимальные положительные напряжения величиной 64000 т/м^2 , проиллюстрированные на **Рисунке 17**, наблюдаются в зоне приложения нагрузки из-за того, что стенка не находится на оси загрузки и полка воспринимая на себя усилие, растягивает стенку. Также положительные значения находятся в верхней четверти под сжатой зоной, в участках стенок, отдаленных от загибов гофра и нижней части стенки.

Наибольшие отрицательные напряжения величиной 159 т/м^2 наблюдаются в середине балки под верхней полкой, исключая непосредственно точку приложения нагрузки, так усилие приложено не по оси гофра. Также большие отрицательные значения располагаются под всей верхней полкой, в нижней четверти над растянутой зоной в участках стенок, отдаленных от загибов гофра и в нижних углах.

Таблица 4

Максимальные напряжения в стенке подкрановых балок по N_x с нулевым эксцентриситетом

Зона стенки	Балка с плоской стенкой 6мм, нагрузка без эксцентриситета, т/м^2	Балка с гофрированной стенкой 6мм, нагрузка без эксцентриситета, т/м^2
В нижних углах	+46300	-134
В зоне приложения нагрузки	-140	+18400

По результатам расчета по максимальным напряжениям по N_x в стенке подкрановых балок по N_x с нулевым эксцентриситетом (**Таблица 4**) наибольшие усилия в плоской стенке находятся в нижних углах, величина которых по модулю больше соответствующих в гофрированной стенке в 345,5 раз. В гофрированной стенке максимальные напряжения располагаются в зоне приложения нагрузки, величина по модулю больше, чем в плоской стенке в той же зоне в 134 раза.

Таблица 5

Максимальные напряжения в стенке подкрановых балок по N_x с эксцентриситетом 20 мм

Зона стенки	Балка с плоской стенкой 6мм, нагрузка с эксцентриситетом 20мм, т/м^2	Балка с гофрированной стенкой 6мм, нагрузка с эксцентриситетом 20мм, т/м^2
В нижних углах	+23200	-134
В зоне приложения нагрузки	-140	+60700

По результатам расчета по наибольшие усилия по N_x в стенке подкрановых балок по N_x с эксцентриситетом 20 мм (**Таблица 5**) максимальные напряжения в плоской стенке находятся в нижних углах, величина которых по модулю больше соответствующих в гофрированной стенке в 173 раза. В гофрированной стенке наибольшие усилия располагаются в зоне приложения нагрузки, величина по модулю больше, чем в плоской стенке в той же зоне в 434 раза.

Таблица 6

Максимальные напряжения в стенке подкрановых балок по N_y с нулевым эксцентриситетом

Зона стенки	Балка с плоской стенкой 6мм, нагрузка без эксцентриситета, т/м ²	Балка с гофрированной стенкой 6мм, нагрузка без эксцентриситета, т/м ²
В нижней четверти в гофрах/крайних ребрах жесткости	+510	-46,9
В зоне приложения нагрузки	-25,3	+47100
В нижних углах	-280	-60,6

По результатам расчета по максимальным напряжениям по N_y в стенке подкрановых балок по N_x с нулевым эксцентриситетом (Таблица 6) наибольшие усилия в плоской стенке находятся в нижней четверти в крайних ребрах жесткости, величина которых по модулю больше соответствующих в гофрированной стенке в 11 раз. В гофрированной стенке максимальные напряжения располагаются в зоне приложения нагрузки, величина по модулю больше, чем в плоской стенке в той же зоне в 1862 раза. В нижних углах напряжения в плоской стенке больше, чем в гофрированной в 4,6 раз.

Таблица 7

Максимальные напряжения в стенке подкрановых балок по N_y с эксцентриситетом 20 мм

Зона стенки	Балка с плоской стенкой 6мм, нагрузка с эксцентриситетом 20 мм, т/м ²	Балка с гофрированной стенкой 6мм, нагрузка с экс- центриситетом 20 мм, т/м ²
В нижней четверти в гофрах/крайних ребрах жесткости	+255	-1,59
В зоне приложения нагрузки	-22,8	+64000
В нижних углах	-280	-139

По результатам расчета по наибольшим усилиям по N_y в стенке подкрановых балок по N_x с эксцентриситетом 20 мм (Таблица 7) максимальные напряжения в плоской стенке находятся в нижней четверти в крайних ребрах жесткости, величина которых по модулю больше соответствующих в гофрированной стенке в 160 раз. В гофрированной стенке наибольшие усилия располагаются в зоне приложения нагрузки, величина по модулю больше, чем в плоской стенке в той же зоне в 2807 раза. В нижних углах напряжения в плоской стенке больше, чем в гофрированной в 2 раза.

5 ВЫВОДЫ

В данной статье были рассмотрены важные аспекты исследования работы, особенностей проектирования и применения подкрановых балок в инженерных конструкциях. Подкрановые балки являются неотъемлемой частью подкрановых систем, которые выполняют ключевую роль в обеспечении грузоподъемности и эффективности различных производственных процессов.

Исследование работы подкрановых конструкций в условиях эксплуатации выявило сложность воздействия динамической нагрузки, циклического характера и неопределенности точного значения крановой нагрузки. Эти факторы играют критическую роль в проектировании и долговечности подкрановых балок.

Особенности проектирования подкрановых балок требуют учета разнообразных параметров, таких как тип нагрузки, связанный с кранами, жесткость конструкции, возможные деформации, а также экономические и технологические факторы. Нормы проектирования

предписывают ряд специфических требований, направленных на обеспечение прочности, устойчивости и долговечности подкрановых балок.

Практическое применение подкрановых балок охватывает широкий спектр отраслей, начиная от производства до складских и логистических операций. Оптимальный выбор конструкции подкрановой балки и ее параметров в зависимости от конкретных условий использования играет ключевую роль в обеспечении безопасности, эффективности и долговечности подкрановых систем.

Таким образом, понимание работы, особенностей проектирования и применения подкрановых балок имеет огромное значение для инженеров и специалистов, занимающихся проектированием и эксплуатацией подкрановых систем. Дальнейшие исследования и разработки в этой области будут способствовать совершенствованию технологий и обеспечению более эффективного и надежного функционирования подкрановых конструкций в различных сферах промышленности и производства.

Исходя из проведенного анализа напряжений по осям N_x и N_y в стенках подкрановой балки, можно сделать следующие выводы:

1. По эпюре N_x в гофрированной стенке при приложении нагрузки без эксцентриситета растягивающие усилия меньше, чем в плоской стенке на 27900 т/м^2 , причем при сжимающих напряжениях больше на 211 т/м^2 .

2. При эксцентриситете 20 мм в гофрированной стенке растягивающие усилия больше, чем в плоской на 37500 т/м^2 , в то же время отрицательные напряжения больше на 210 т/м^2 .

3. По эпюре N_y положительные усилия в гофрированной стенке при нагрузке с нулевым эксцентриситетом больше, чем в плоской стенке 46540 т/м^2 , сжимающие нагрузки меньше на 121 т/м^2 .

4. Растягивающие напряжения N_y в гофрированной стенке с нагрузкой с эксцентриситетом 20 мм меньше, чем в плоской стенке на 63745 т/м^2 , сжимающие нагрузки больше, чем в гофрированной стенке на 121 т/м^2 .

Несмотря на то, что наибольшие напряжения происходят в гофрированной стенке, в зоне крепления стенки к верхней полке они меньше.

Таким образом, выбор гофрированных стенок для подкрановых балок может значительно улучшить их несущую способность и надежность. Так же, решение о замене плоской стенки подкрановой балки на гофрированную является обоснованным и обещает значительно улучшить характеристики конструкции, снизить вероятность возникновения проблем с отрывом сварного шва и повысить общую производительность и безопасность промышленных сооружений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Kudishin, Y. I.** (2011). Metal structures [Metallicheskiye konstruksii] - 13th ed. Moscow: "Academy" publishing center. (In Russ.).
2. **Maximov, Y. S., Ostrikov, G. M., & Ibragimov, N. E.** (2016). Construction corrugated structures [Sroitel'nyye gofrirovannyye konstruksii]. Almaty, Kazakhstan. (In Russ.).
3. **Nezhdanov, K. K.** (1987). Increasing the durability of steel runway beams [Povysheniye dolgovечnosti stal'nykh podkranovykh balok] Industrial engineering, 43-45. (In Russ.).
4. **Maali, M., Aydin, A. C., & Sagiroglu, M.** (2015). Investigation of innovative steel runway beam in industrial building. Sadhana, 40(7), 2239-2251. <http://dx.doi.org/10.1007/s12046-015-0406-2>
5. **Vaškova, V., Fojtíka, R., & Pustka, D.** (2017). Analysis of a Crane Runway Failure. Procedia Engineering, 190, 255-262. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.335>

6. **Citarelli, S., & Feldman, M.** (2019). Derivation of a new fatigue class for top flange to web junctions of runway beams. *Procedia Structural Integrity*, 19, 336-345. <http://dx.doi.org/10.1016/j.prostr.2019.12.037>
7. **Kossakowski, P., Wcislik, W., & Bakalarz, M.** (2019). Failure of the overhead crane runway. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 284, p. 09001). EDP Sciences. <http://dx.doi.org/10.1051/mateconf/201928409001>
8. **Euler, M., & Taylor, C.** (2020). Fatigue action on crane runway beams. *Journal of Constructional Steel Research*, 181, 106476-106491. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.106476>
9. **Kettler, M., Unterweger, H., & Ebner, D.** (2020) Lokale Spannungen in Kranbahnträgern mit Längssteifen. *Stahlbau*, 90(4), 248-261. <https://doi.org/10.1002/stab.202000069>
10. **Trahair, N. S.** (2021). Limit states design of crane runway girders. *Engineering Structures*, volume 240, 112395-112402. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112395>
11. **Polus, Ł., Chybiński, M., & Kurzawa, Z.** (2022). Local vertical compressive stress in the crane runway beam web. *Budownictwo i Architektura*, 21(4), 51-66. <http://dx.doi.org/10.35784/bud-arch.3231>
12. **Lu, C., Yang, Z., Li, P., Zhang, X., Huang, J., & Wang, L.** (2022). Finite Element Analysis and Reinforcement of Steel Crane Beam under Eccentric Track Loading. *Machines*, 10(9), 783-798. <https://doi.org/10.3390/machines10090783>
13. **Kettler, M., Jurschitsch, T., & Unterweger, H.** (2023, June). Impact of rail joints on the local stresses in crane runway girders. In *Structures* (Vol. 52, pp. 1087-1100). Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1002/cepa.2306>
14. **Hajdú, G., Pasternak, H., & Papp, F.** (2023). Lateral-torsional buckling assessment of I-beams with sinusoidally corrugated web. *Journal of Constructional Steel Research*, 207, 107916-107932. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2023.107916>
15. **Melnikov, N. P., Kuznetsov, V. V., Bakhtutskiy, V. M., Shuvalov, L. K., & Sorokina, I. M.** (1982). Assortment from Series 1.426.2-3 Steel crane beams [Sortament serii 1.426.2-3 Stal'nyye podkranovyye balki] *TsNIIProektstalkonstruktsiya*, 1-48. (In Russ.).