

АННОТАЦИЯ

к диссертации на соискание степени доктора философии
(PhD) по образовательной программе: 8D07321 –
«Строительство» Оканова Диаса Алматовича на тему:
«Экспериментально - теоретическое исследование
работы подкрановых балок с гофрированными стенками
треугольного очертания под краны общего назначения»

В условиях современного строительства ключевая задача проектировщика — находить решения, одновременно обеспечивающие надёжность, прочность и экономичность стальных конструкций. Повышение требований к несущим системам связано с ростом нагрузок, увеличением пролётов и необходимостью снижения металлоёмкости и трудозатрат. Особое внимание уделяется подкрановым системам промышленных зданий: подкрановые балки воспринимают не только статические, но и динамические, циклические и ударные воздействия от мостовых кранов, что предъявляет повышенные требования к прочности, устойчивости и жёсткости.

Актуальность темы данного исследования. Одним из перспективных путей является замена плоской стенки двутавров на гофрированную. Такая стенка позволяет перераспределять напряжения, повышать устойчивость, уменьшать массу и трудоёмкость изготовления. Вместе с тем остаются нерешёнными вопросы инженерной оценки критических напряжений, особенностей деформирования и устойчивости, особенно для стенок треугольного очертания под краны общего назначения. Недостаточная регламентация в действующих нормах РК и зарубежных стандартах усиливает потребность в комплексных исследованиях и разработке прикладной методики расчёта.

Объект исследования: промышленные здания с подкрановыми путями, оснащённые подкрановыми балками.

Предмет исследования: влияние геометрии гофра (длина, шаг, глубина, толщина; треугольное очертание) на деформативность, устойчивость и несущую способность балок.

Целью исследования является экспериментально-теоретическое исследование работы сварных двутавровых подкрановых балок с треугольно-гофрированной стенкой под краны общего назначения и разработка инженерных методик расчёта и выбора рациональных параметров гофра.

Задачи исследования:

1. Проанализировать область применения подкрановых балок с различным очертанием гофра.
2. Разработать расчётную методику для балок с гофрированной стенкой (с учётом эксцентриситета нагрузки).
3. Исследовать работу сварных балок при варьировании геометрии гофра.
4. Обосновать эффективность треугольного профиля по критериям прочности, жёсткости, устойчивости.

5. Определить оптимальные параметры гофра с использованием численного моделирования.

6. Провести лабораторные испытания моделей с плоской и гофрированной стенками (масштаб 1:3).

7. Оценить эффект замены плоской стенки на гофрированную на конструктивную эффективность балки.

8. Выполнить технико-экономическую оценку решения.

Методы и достоверность

Исследование опирается на аналитические расчёты инерционных характеристик и устойчивости (в т.ч. модифицированный метод Хикса с учётом эксцентриситета), численное моделирование (ЛИРА-САПР 2024, SCAD TONUS) с анализом сеточной сходимости и лабораторные испытания масштабных моделей (1:3). Сопоставление расчётных и экспериментальных данных подтверждает адекватность моделей: расхождение по прогибам в упругой стадии составило порядка 2,9–10% (до 15% в неблагоприятных случаях), верифицирована повторяемость результатов. Привлекались нормативные подходы (СП/EN/AISC по аналогии) и сопоставительные литературные данные.

Научная новизна заключается в:

- установлении эффективного диапазона параметров треугольного гофра для стенок толщиной 6–10 мм;

- уточнении классификации поперечного сечения балки в соответствии с Eurocode для условий крановых воздействий;

- модификации инженерной методики устойчивости стенки (по Хиксу) с явным учётом эксцентриситета;

- количественной оценке влияния длины/глубины/шага гофра на НДС и критические напряжения;

- интеграции результатов натурных испытаний в параметрическую калибровку МКЭ-моделей.

Краткий обзор состояния вопроса

Показано, что гофрированные стенки работают преимущественно на сдвиг, повышают крутильную жёсткость, позволяют уменьшать толщину и массу, сохраняя эксплуатационную надёжность. Зарубежные и отечественные исследования подтверждают долговечность при циклических воздействиях, однако прямых методик для подкрановых балок с треугольным гофром в нормативной базе нет. Практика проектирования использует адаптации (приведённые жёсткости, ферменные аналоги, МКЭ с локальными зонами действия колёс), что подчёркивает необходимость унифицированной инженерной методики.

Принятые расчётные предпосылки

Рассматривается шарнирно-опёртая балка пролётом порядка 6 м под действием сосредоточенных крановых нагрузок (12,5–50 т) с эксцентриситетом 15 мм относительно оси, имитирующим реальное смещение крана. Сопоставляются модели с плоской стенкой и с треугольным гофром при варьировании длины/глубины/шага гофра и толщины стенки (6–10 мм). В лабораторной части использован масштаб 1:3 с соблюдением геометрического и

физического подобия (нагрузки $\sim 1/9$, прогибы $\sim 1/3$ при сохранении модулей и напряжений).

Основные результаты

1) Деформативность. Гофрированная стенка демонстрирует несколько больший прогиб по сравнению с плоской при прочих равных — вследствие меньшего участия стенки в восприятии нормальных напряжений; вместе с тем прогибы остаются в допустимых пределах.

2) Устойчивость. Треугольный гофр существенно повышает устойчивость стенки (особенно в зонах сосредоточенных воздействий от колёс). По модифицированному методу Хикса показано: эксцентриситет нагрузки до 2–3% высоты стенки снижает критическую силу не более чем на ~ 2 –3%, что подтверждает запас устойчивости.

3) Чувствительность к эксцентриситету. Балки с плоской стенкой чувствительнее к изгибно-крутильным эффектам; гофрированные — демонстрируют более равномерное напряжённое состояние и меньшие касательные напряжения.

4) Параметры гофра. При варьировании геометрии установлен рациональный диапазон: глубина около 80 мм и длина панели порядка 480 мм обеспечивают наиболее выгодный баланс «жёсткость–устойчивость–масса». Увеличение длины до 640 мм приводит к заметному снижению устойчивости (порядка 35–40% по критическим напряжениям).

5) Натурные испытания (1:3). Получена линейная диаграмма «нагрузка–прогиб» в упругой стадии, переход к нелинейности при $\sim 0,75$ – $0,9 F_p$; доминирующие предельные состояния — потеря устойчивости поясов/стенки. Остаточные прогибы после разгрузки малы. Сходимость «эксперимент–МКЭ» по прогибам при центральном нагружении — $\sim 2,9$ –10%; при эксцентриситете расхождения выше (до $\sim 28\%$), что объясняется учётом ряда технологических факторов и контактной специфики.

6) Масса, трудоёмкость, стоимость. Замена плоской стенки на гофрированную обеспечивает снижение массы порядка 4–7%, уменьшение доли сварочных операций до $\sim 30\%$, сокращение совокупной стоимости до ~ 15 ... $\sim 20\%$ (в зависимости от серии).

7) Сеточная независимость. Для расчётной модели подтверждена сходимость по сетке (оптимальный шаг порядка 5×5 мм), что гарантирует устойчивость численного решения при параметрических исследованиях.

Положения, выносимые на защиту

1. Треугольный гофр повышает устойчивость и несущую способность подкрановых балок при одновременном снижении массы и трудоёмкости.

2. Геометрия гофра (длина, глубина, шаг) является определяющим фактором распределения напряжений, сопротивления кручению и общей деформативности; её выбор должен выполняться параметрически.

3. Модифицированная методика устойчивости гофрированной стенки на основе метода Хикса с учётом эксцентриситета обеспечивает надёжную инженерную оценку критических усилий.

4. Натурные испытания подтверждают адекватность численной модели и рекомендации по выбору 480×80 мм как рационального конструктивного решения.

5. Применение треугольной гофры позволяет снизить массу до ~6,9% без ухудшения (а в ряде случаев — с улучшением) жёсткости и прочности относительно балок с плоской стенкой.

Практическая значимость

Разработанные рекомендации по выбору параметров гофра и модифицированная методика расчёта устойчивости пригодны для инженерной практики при проектировании крановых путей и промышленных зданий. Полученные зависимости позволяют выполнять быстрый предварительный подбор геометрии стенки, учитывать эксцентриситет нагрузки, снижать металлоёмкость и трудоёмкость изготовления без потери требуемых эксплуатационных качеств.

Результаты внедрены в проектную практику (ТОО «RAS Group Project») и учебный процесс (образовательная программа «Расчёт и проектирование зданий и сооружений», 2025 г.).

Структура работы

Диссертация включает введение, пять глав, заключение и приложения (149 страниц, 30 таблиц, 65 иллюстраций, 161 источник, 12 приложений). Содержательно:

— Глава 1: обзор исследований и практики применения; сопоставление типов гофров, исторический и нормативный контекст; особенности работы пролетных и подкрановых балок.

— Глава 2: расчётные предпосылки, обобщение теоретических и экспериментальных данных для подкрановых балок с гофрированной стенкой; вопросы деформативности и устойчивости, нормативные пробелы.

— Глава 3: теоретические исследования влияния геометрии гофра на НДС, жёсткость и устойчивость; параметрический анализ.

— Глава 4: математическое моделирование (ЛИРА-САПР, SCAD TONUS), калибровка, сеточная сходимость, влияние эксцентриситета, определение рациональных параметров.

— Глава 5: лабораторные испытания (1:3), план и методика, сопоставление «теория–МКЭ–эксперимент», уточнение рекомендаций.

Итоговые выводы

1. Подкрановые балки с треугольной гофрой демонстрируют более высокую устойчивость и ресурс при циклических воздействиях, оставаясь технологичными и экономичными.

2. Наиболее рациональным для исследованного диапазона параметров признан гофр 480×80 мм; увеличение длины панели до 640 мм вызывает снижение критических напряжений на 35–40%.

3. Эксцентриситет нагрузки умеренных величин не приводит к критической деградации устойчивости гофрированной стенки; чувствительность плоской стенки существенно выше.

4. Снижение массы 4–7%, сокращение сварочных операций до –30% и уменьшение себестоимости до –15...–20% подтверждают технико-экономическую целесообразность решения.

5. Нормативная база требует развития: необходима адаптация методики устойчивости (в т.ч. по Хиксу) и учёт усталости, сейсмики и технологических факторов в регламенте для подкрановых двутавров с гофрированными стенками.

Перспективы дальнейших исследований

— расширение экспериментальной базы (в т.ч. полноразмерные образцы, переменные по длине/высоте гофры);

— развитие упрощённых инженерных алгоритмов и их включение в нацстандарты РК с гармонизацией с EN/AISC;

— учёт усталости, высоких температур, сейсмических воздействий, остаточных и сварочных напряжений;

— композитные и энерго-диссипативные решения для повышения долговечности и снижения вибраций.