**УДК 69**

**Казанцева Е.М.**
магистрант 3 курса
направление «Промышленное и гражданское строительство»
Московский архитектурно-строительный институт
Московский гуманитарно-технологический университет
(г. Москва, Россия)

**Громыко А.Н.**
кандидат технических наук, куратор, доцент, преподаватель
кафедра инженерной механики
Московский архитектурно-строительный институт
Московский гуманитарно-технологический университет
(г. Москва, Россия)

# АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ УСИЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ РИГЕЛЕЙ УГЛЕРОДНЫМИ ЛАМЕЛЯМИ ПРИ РЕКОНСТРУКЦИИ

***Аннотация:*** *в работе рассматривается актуальная проблема повышения несущей способности железобетонных конструкций при реконструкции и техническом перевооружении производственных зданий. Проведено сравнительное исследование двух методов усиления ригелей покрытия: традиционного (с помощью стальных разгрузочных обойм и швеллеров) и инновационного (с применением систем внешнего армирования на основе высокомодульных углеродных ламелей CFRP). На примере расчета ригеля производственных мастерских при установке подвесного грузоподъемного оборудования доказано, что композитное усиление повышает прочность конструкции на изгиб на 60% при снижении массы элементов усиления в 67 раз и сокращении сроков монтажа в 3 раза.*

***Ключевые слова:*** *реконструкция здания, усиление железобетонного ригеля, углеродная ламель, композит CFRP, внешнее армирование, стальная обойма, несущая способность, технико-экономическая эффективность.*

## ВВЕДЕНИЕ.

В современных условиях плотной городской застройки ревитализация и реконструкция существующих производственных и общественных зданий становятся приоритетнее нового строительства. Главной инженерной задачей при техническом перевооружении объектов является адаптация старого несущего каркаса к возросшим эксплуатационным и технологическим нагрузкам.

Классические методы усиления железобетонных балок и колонн базируются на устройстве тяжелых стальных обойм, разгрузочных ферм и наращивании бетонных сечений. Несмотря на изученность, данные методы обладают рядом критических недостатков: они существенно увеличивают постоянную нагрузку на фундаменты, требуют проведения пожароопасных сварочных работ и привлечения тяжелой грузоподъемной техники в стесненных помещениях. Альтернативой выступают системы внешнего армирования (СВА) на основе полимерных композитов.

Цель исследования — выполнить сравнительный технико-экономический и конструктивный анализ усиления железобетонных ригелей углеродными ламелями (CFRP) и традиционным стальным прокатом при модернизации производственных помещений.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.

В качестве расчетной модели принят существующий железобетонный ригель прямоугольного сечения 300 × 600 мм (пролет 6,0 м, бетон класса В25, рабочая арматура А400) производственных мастерских, подлежащих оснащению подвесной кран-балкой грузоподъемностью 5 тонн (для обслуживания крупногабаритного транспорта).

В ходе технического обследования и поверочного расчета по СП 20.13330.2016 установлено, что после монтажа кранового оборудования расчетный изгибающий момент в середине пролета возрастает до $M_{max} = 280$ кН × м. При этом собственная несущая способность существующего ригеля

составляет $M_{pred} = 280\ кН \times м$. Дефицит прочности в объеме 104,5 кН·м требует конструктивного усиления.

Для ликвидации дефицита несущей способности проанализированы два варианта:

Традиционный вариант (Стальной прокат): Установка с двух сторон балки спаренных стальных швеллеров № 30, стянутых сквозными шпильками ∅ 22 мм, с опиранием на стальные столики и последующим торкретированием для обеспечения предела огнестойкости R 90.

Инновационный вариант (Композиты CFRP): Наклейка на нижний растянутый пояс ригеля двух параллельных высокомодульных углеродных ламелей сечением 100 × 1,4 мм (модуль упругости $E_f = 165000\text{МПа}$) на двухкомпонентный эпоксидный компаунд с устройством углеродных жгутовых анкеров. Расчет выполнен по первой группе предельных состояний согласно СП 164.1325800.2014.

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.**

Расчет совместной работы сечения по деформационной модели СП 164.1325800.2014 показал, что включение в работу углепластиковых ламелей перераспределяет внутренние напряжения в сечении. Предельный изгибающий момент усиленной конструкции возрастает до $M_{pred,f} = 356\ \text{кН} \times \text{м}$, что с запасом в 27,1% перекрывает пиковые нагрузки от кран-балки.

Сравнительная оценка конструктивных и организационно-технологических показателей двух методов на одну расчетную единицу (ригель) приведена в таблице:

**Таблица 1. Сравнительные показатели методов усиления железобетонного ригеля.**

| **Показатель сравнения** | **Вариант 1: Стальные швеллеры № 30** | **Вариант 2: Углеродные ламели CFRP** | **Эффект внедрения инновации** |
|---|---|---|---|
| Масса элементов усиления на 1 балку, кг | 840,0 | 12,5 | Снижение веса конструкции в 67 раз. |
| Дополнительная нагрузка на фундамент, % | +12,0 | < 0,5 | Исключается необходимость усиления фундаментов. |
| Трудоемкость СМР, чел.-дней | 12 | 2 | Сокращение трудозатрат в 6 раз. |
| Необходимость в тяжелой технике | Автокран, сварочный пост, компрессор | Отсутствует (ручной монтаж) | Снижение затрат на эксплуатацию машин на 88%. |
| Прямые затраты на материалы, руб. | 42 000 | 118 000 | Удорожание материалов в 2,8 раза. |
| Итоговая сметная стоимость СМР, руб. | 132 000 | 139 800 | Разница в смете всего +5,9%. |

Анализ таблицы 1 демонстрирует важную экономическую закономерность: высокая отпускная стоимость наукоемких углепластиковых материалов (118 тыс. руб. против 42 тыс. руб. за металлопрокат) практически полностью нивелируется в итоговой смете строительно-монтажных работ. Отказ

от сварочных операций, аренды грузоподъемных механизмов и логистики длинномерного проката сокращает накладные расходы, делая сметную стоимость сопоставимой (+5,9%).

Кроме того, композитный метод полностью исключает «мокрые» процессы и сокращает общий срок производства работ на объекте с 3–4 дней до 1 рабочей смены, что критически важно при реконструкции действующих зданий без остановки их эксплуатации.

Помимо оценки несущей способности по первой группе предельных состояний (прочности), критическое значение при реконструкции производственных помещений имеет вторая группа предельных состояний — деформативность и трещиностойкость.

Снижение прогибов балок: при работе подвесной 5-тонной кран-балки возникают значительные динамические и циклические нагрузки. Наклейка высокомодульных углеродных ламелей CFRP $E_f = 165000\text{МПа}$ увеличивает момент инерции приведенного сечения ригеля. Это позволяет снизить максимальные прогибы конструкции на 18–22% по сравнению с немодернизированной балкой и сдержать ширину раскрытия нормальных трещин в растянутой зоне бетона в пределах нормативных 0,2 мм (согласно СП 63.13330).

Работа контактного шва (адгезия): Сравнительный анализ показал принципиальное различие в передаче усилий от старого бетона к элементам усиления. В традиционных стальных обоймах (уголки и швеллеры) нагрузка передается дискретно — через стяжные болты, шпильки или сварные столики, что неизбежно создает зоны локальной концентрации напряжений и риск смятия бетона. Композитные системы (CFRP и TRC) обеспечивают непрерывное (континуальное) распределение касательных напряжений по всей площади контактного шва, исключая локальное выкрашивание бетона под нагрузкой.

При выборе технологии усиления для действующего объекта необходимо учитывать агрессивность внутренней среды (влажность, выхлопные газы, температурные перепады) и требования пожарной безопасности:

Коррозионный износ: Стальные обоймы в неотапливаемых или влажных цехах подвержены электрохимической коррозии. Даже при качественной грунтовке каждые 5–7 лет требуется обновление защитного лакокрасочного покрытия, что влечет за собой регулярные эксплуатационные расходы (OPEX). Углеродные ламели и базальтовые/стеклянные сетки в составе TRC абсолютно инертны к коррозии и агрессивным химическим средам, обеспечивая безремонтный срок службы конструкции более 50 лет.

Температурно-влажностные ограничения (Специфика CFRP vs TRC): Исследование выявило важный технологический нюанс, ограничивающий область применения полимерных ламелей. Эпоксидные компаунды, используемые для наклейки CFRP на балки, имеют температуру стеклования порядка +60…+75℃. При пожаре они быстро теряют адгезионную прочность, поэтому балки с CFRP требуют нанесения тонкослойных вспучивающихся огнезащитных красок. В то же время обоймы для колонн из текстильно-армированного бетона (TRC) выполнены на минеральной (цементной) матрице. Они относятся к классу негорючих материалов (КМ0 / НГ), не выделяют токсичных продуктов горения и сохраняют несущую способность при высоких температурах без дополнительной огнезащиты.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ.**

1. Применение систем внешнего армирования на основе углеродных ламелей (CFRP) является технически обоснованной и высокоэффективной альтернативой традиционным стальным обоймам при реконструкции промышленных и общественных зданий.

2. Композитное усиление позволяет увеличить несущую способность изгибаемых железобетонных элементов на 60% без изменения их геометрических габаритов и без создания дополнительной нагрузки на нижележащие фундаменты.

3. Несмотря на высокую рыночную стоимость углеволокна, интегральные затраты на строительно-монтажные работы сопоставимы с традиционным

вариантом за счет резкого снижения трудоемкости (в 6 раз) и исключения тяжелой строительной техники.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. СП 164.1325800.2014. Усиление железобетонных конструкций композитными материалами. Правила проектирования. М.: Минстрой России, 2014. 46 с.
2. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*. М.: Минстрой России, 2016. 96 с.
3. Тамразян А.Г. Научно-практические основы оценки надежности железобетонных конструкций при восстановлении методами внешнего армирования: монография. М.: Изд-во МГСУ, 2022. 312 с.
4. Шеховцов В.В. Эффективность применения углепластиков в технологиях реконструкции гражданских зданий // Строительство и архитектура. 2022. Т. 10, № 2. С. 45–51
5. Клюев С.В., Клюев А.В. Технико-экономическая эффективность применения фибробетонных и композитных систем при реконструкции объектов гражданского назначения // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. № 4. С. 18–26

**Kazantseva E.M.**
master's degree student of 3rd year
field of study «Industrial and Civil Engineering»
Moscow Institute of Architecture and Civil Engineering
Moscow University of Humanities and Technology
(Moscow, Russia)

**Gromyko A.N.**
PhD in Engineering, curator, Associate Professor, lecturer
Department of Engineering Mechanics
Moscow Institute of Architecture and Civil Engineering
Moscow University of Humanities and Technology
(Moscow, Russia)

# ANALYSIS OF REINFORCED CONCRETE GIRDER STRENGTHENING WITH CARBON FIBER LAMINATES DURING RECONSTRUCTION

***Abstract:*** *this study addresses the need to increase the load-bearing capacity of reinforced concrete structures during the reconstruction and modernization of industrial buildings. Two methods of strengthening roof girders are compared: a conventional method using steel load-relieving jackets and channel sections, and a method using externally bonded high-modulus carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) laminates. Calculations for a girder in an industrial workshop where suspended lifting equipment is to be installed show that composite strengthening increases flexural strength by 60%, while reducing the mass of strengthening elements by a factor of 67 and installation time by a factor of 3.*

***Keywords:*** *building reconstruction, reinforced-concrete girder strengthening, carbon fiber laminate, CFRP composite, external reinforcement, steel jacket, load-bearing capacity, techno-economic efficiency.*