

**Хомичук А.А.**

магистрант

Дальневосточный государственный университет путей сообщения

г. Хабаровск, Россия

## **ФАКТОРЫ РАЗРУШЕНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ОПОР ВЛЭП И ТРЕБОВАНИЯ К КОМПОЗИТНЫМ МАТЕРИАЛАМ ДЛЯ ИХ ВОССТАНОВЛЕНИЯ**

**Аннотация:** В статье рассматриваются причины деградации железобетонных опор воздушных линий электропередачи и обосновывается применение композитных материалов на основе углеродных волокон для ремонта и восстановления несущей способности без замены опор. Представлены результаты типового обследования, классификация разрушающих факторов и сравнительная оценка технологий усиления углеродными лентами, ламелями и сетками по критериям технологичности, надежности и экономической эффективности.

**Ключевые слова:** опоры ВЛЭП, железобетон, композитные материалы, углеродные ленты, углепластиковые ламели, углеродные сетки, усиление конструкций

**Abstract:** The paper discusses degradation mechanisms of reinforced concrete overhead power line poles and justifies the use of carbon fiber reinforced polymer systems to restore load-bearing capacity without replacement. A practical inspection approach and defect classification are provided, and CFRP tapes, laminates and grids are compared in terms of field applicability, workmanship sensitivity, durability and cost efficiency.

**Key words:** overhead power line poles, reinforced concrete, composites, CFRP tapes, CFRP laminates, CFRP grids, strengthening

**Введение.**

Воздушные линии электропередачи (ВЛЭП) являются важнейшим элементом инфраструктуры распределения энергии. Значительная часть линий эксплуатируется более 25 лет, при этом железобетонные стойки подвергаются климатическим и эксплуатационным воздействиям, а также дефектам изготовления и монтажа. Замена опор требует значительных затрат и ограничений по отключению линии, поэтому актуальны технологии ремонта и восстановления без демонтажа.

Системы внешнего армирования на основе углеродных волокон (CFRP) обеспечивают высокую удельную прочность и коррозионную стойкость при минимальном увеличении массы конструкции. Их применение позволяет компенсировать потерю несущей способности из-за трещинообразования и коррозии арматуры, а также повысить выносливость при циклических воздействиях. Цель работы - анализ разрушающих факторов и обоснование выбора технологий усиления опор ВЛЭП композитными материалами.

## **1. Методика обследования и критерии работоспособности.**

Оценку технического состояния опор целесообразно выполнять по этапам: сбор исходных данных (тип опоры, год установки, данные предыдущих осмотров), визуальный осмотр с фотофиксацией, измерение трещин и отклонения стойки от вертикали, выявление оголенной арматуры и дефектов защитного слоя. При необходимости применяют неразрушающие методы для оценки прочности бетона и глубины карбонизации, а также определяют фактическое положение арматуры.

Критериями работоспособности принимают способность стойки воспринимать расчетные усилия с учетом фактического состояния сечения и арматуры, обеспечивать требуемые изоляционные расстояния и устойчивость в грунте. При обнаружении дефектов выполняют их классификацию по влиянию на несущую способность и выбирают мероприятия: локальный ремонт, усиление или замену элементов [1].

## **2. Разрушающие факторы и типовые дефекты.**

Разрушающие факторы условно подразделяются на климатические воздействия, человеческий фактор и накопление усталостных повреждений. К климатическим относятся циклы замораживания-оттаивания, ветровые нагрузки, гололед и налипание снега, грозовые воздействия, падение деревьев, а также изменение свойств грунта. Эти воздействия приводят к многократным переменным нагрузкам на провода и опоры и росту изгибающих усилий.

Отдельно выделяют динамические явления: вибрацию проводов высокой частоты (5-50 Гц) и 'пляску' проводов низкой частоты (0,2-0,4 Гц) при сочетании ветра и гололеда. Длительные или повторяющиеся колебания вызывают усталостные процессы, повышают риск раскрытия трещин и ускоряют коррозию арматуры в зоне проникновения влаги.

Человеческий фактор включает дефекты изготовления и монтажа, повреждения при обслуживании, механические и огневые воздействия. Нарушения технологии могут приводить к сколам и трещинам, через которые в бетон поступает влага. Усталостные процессы проявляются как коррозия арматуры и закладных деталей, карбонизация и деструкция бетона, что снижает эффективное сечение и несущую способность.

По результатам осмотров наиболее распространены: ослабление и выкрашивание бетона, продольные и поперечные трещины, каверны и отверстия, оголение арматуры и ее коррозия, смещение каркаса, повреждения в прифундаментной части, разрушения фундамента анкерных опор. Дефекты часто локализируются в зоне максимальных изгибающих моментов и в зоне 'грунт-воздух', где воздействие влаги наиболее интенсивно.

### **3. Технологии усиления композитными материалами.**

Основные решения: внешнее армирование углеродными лентами и тканями, наклейка углепластиковых ламелей (ламинатов) и армирование углеродными сетками с устройством защитного слоя (торкретирование или полимерцементные

составы). Выбор зависит от требуемого направления армирования, состояния поверхности и условий монтажа.

Углеродные ленты и ткани обеспечивают большую площадь контакта с бетоном и удобны для усиления элементов сложной геометрии. Ламели имеют более высокий модуль упругости и прочность за счет заводского изготовления, однако требуют ровной поверхности и дополнительной анкеровки. Сетки в сочетании с торкретированием снижают требования к подготовке основания и улучшают огнестойкость, но увеличивают массу конструкции и требуют контроля качества нанесения.

#### 4. Физико-механические свойства материалов.

Типовые физико-механические характеристики углеродных лент, ламелей и сеток представлены в таблицах 1-4. Эти параметры определяют способность системы усиления воспринимать растягивающие усилия, обеспечивать совместную деформацию с бетоном и сохранять работоспособность при воздействии окружающей среды [2].

**Таблица 1**

##### **Физико-механические свойства углеродных лент**

<b>Наименование показателей</b>	<b>Значение</b>
Плотность, г/см <sup>3</sup> , не более	1,8
Удлинение на разрыв волокон, %, не менее	1,5
Модуль упругости при растяжении, ГПа (волокна), не менее	230
Предел прочности при растяжении (волокна), МПа, не менее	4300

**Таблица 2**

##### **Физико-механические свойства углепластиковых ламелей (t = 1,2-1,4 мм)**

<b>Наименование показателей</b>	<b>Значение</b>
Объемное содержание волокон, %, не менее	65
Модуль упругости при растяжении, ГПа, не менее	165
Предел прочности при растяжении, МПа, не менее	2800

**Таблица 3**

**Физико-механические свойства углепластиковых ламелей (t = 5,0 мм)**

Наименование показателей	Значение
Объемное содержание волокон, %, не менее	65
Модуль упругости при растяжении, ГПа, не менее	150
Предел прочности при растяжении, МПа, не менее	1100

**Таблица 4**

**Физико-механические свойства углеродных сеток**

Наименование показателей	Значение
Плотность, г/см <sup>3</sup> , не более	1,8
Модуль упругости при растяжении, ГПа (волокна), не менее	230
Предел прочности при растяжении в продольном направлении, МПа, не менее	2300
Предел прочности при растяжении в поперечном направлении, МПа, не менее	2100

## 5. Сравнение технологий: преимущества и ограничения.

Усиление углеродными лентами и тканями отличается высокой технологичностью: раскрой выполняется ручным инструментом, материалы поставляются в компактном виде, а большая площадь контакта повышает надежность сцепления. Метод удобен для сложной геометрии и позволяет быстро набрать расчетную прочность. К ограничениям относят зависимость качества от квалификации исполнителей, повышенный расход связующего и чувствительность к влажности поверхности при использовании стандартных эпоксидных составов.

Углепластиковые ламели обеспечивают более высокие прочностные характеристики и модуль упругости и рациональны при необходимости существенно увеличить продольную несущую способность. В то же время раскрой требует специального инструмента, повышаются требования к ровности основания, а для предотвращения отрыва часто необходимы анкерующие элементы. Наличие локальных дефектов (отверстия, разрывы) сильнее снижает эффективность ламелей, чем лент.

Применение углеродных сеток с торкретированием удобно при значительных дефектах поверхности и когда применение эпоксидных адгезивов затруднено (влажные основания, низкие температуры). Система менее чувствительна к мелким

дефектам и может обеспечить повышенную огнестойкость при использовании полимерцементных составов. Недостатки связаны с увеличением массы (толщина слоя не менее 20 мм), потерями материалов при нанесении и повышенной стоимостью работ.

## **6. Технологическая схема ремонта и усиления.**

Надёжность композитного усиления определяется качеством подготовки основания и соблюдением режимов отверждения. Типовой алгоритм включает: очистку поверхности и удаление слабых слоёв бетона; вскрытие и удаление коррозионных продуктов; ремонт дефектов и восстановление защитного слоя; выравнивание и шлифование; обеспыливание; грунтование; нанесение связующего и укладку композита (ленты, ткань или ламели) с прокаткой для удаления воздуха.

При ремонте участков с оголенной арматурой необходимо обеспечить антикоррозионную защиту и восстановление защитного слоя. В зонах концентрации напряжений рекомендуется выполнение поперечных хомутов (обойм) из углеродных лент или применение механической анкеровки ламелей. После отверждения выполняют устройство защитного покрытия (ультрафиолетостойкого и антивандального), так как большинство полимерных связующих чувствительны к ультрафиолету и механическим воздействиям.

## **7. Контроль качества и долговечность.**

Контроль качества включает входной контроль материалов (срок годности, условия хранения), контроль влажности и температуры основания, проверку равномерности нанесения связующего, отсутствие пузырей и складок. При приемке выполняют визуальный осмотр и простукивание, при необходимости выборочный отрыв контрольных участков для оценки прочности сцепления.

Долговечность системы усиления определяется стойкостью адгезионного слоя и защитных покрытий в условиях перепадов температур и влажности. Для опор ВЛЭП актуальны периодическое увлажнение, воздействие солей вблизи автомобильных дорог и абразивные воздействия. В связи с этим предпочтительны

комплексные решения: локальный ремонт бетона, антикоррозионная обработка арматуры, композитное усиление и финишная защита поверхности.

## **8. Техничко-экономическая оценка и рекомендации по выбору.**

Композиционные системы позволяют снизить косвенные затраты, связанные с заменой опор (логистика, земляные работы, длительные отключения). При типовых дефектах поверхности и необходимости быстрого ремонта наиболее экономичным решением часто является усиление углеродными лентами.

С учетом практики усиления опор можно рекомендовать: (1) ламели применять при необходимости компенсировать дефицит армирования в продольном направлении; (2) сетки с торкретированием - при сильно поврежденной поверхности и при ограничениях на применение эпоксидных адгезивов; (3) углеродные ленты - во всех остальных случаях, включая усиление в зоне трещинообразования и устройство обойм для повышения трещиностойкости [4].

### **Заключение.**

Ремонт и восстановление железобетонных опор ВЛЭП с применением композитных материалов позволяет продлевать срок службы инфраструктуры при минимизации замены элементов. Проанализированы разрушающие факторы, выделены типовые дефекты и приведены характеристики углеродных материалов. Показано, что усиление углеродными лентами является предпочтительным для большинства задач ремонта стоек, при этом ламели и сетки имеют рациональные области применения в зависимости от состояния поверхности и требуемого эффекта.

### **Список литературы**

1. Бокарев С.А., Смердов Д.Н. Экспериментальные исследования изгибаемых железобетонных элементов, усиленных композитными материалами // Известия вузов. Строительство. 2010. № 2. С. 112-124.

2. Бокарев С.А., Смердов Д.Н., Неровных А.А. Оценка выносливости изгибаемых железобетонных конструкций, усиленных композиционными материалами // Дальний Восток. Автомобильные дороги и безопасность движения: международный сборник научных трудов. Хабаровск: Изд-во ТОГУ, 2010. № 10. С. 287-294.

3. Шилин А.А., Пшеничный В.А., Картузов Д.В. Усиление железобетонных конструкций композитными материалами. М.: Стройиздат, 2004. 139 с.

4. Руководство по усилению железобетонных конструкций композитными материалами (в развитие СП 52-101-2003) / НИИЖБ. М., 2006. 48 с.

© Хомичук А.А., 2026