

## Усиление строительных конструкций с помощью углеродных композиционных материалов

*Бакалавр Н.В. Параничева\*;  
старший преподаватель Т.В. Назмеева,  
ГОУ Череповецкий государственный университет*

В настоящее время российские и зарубежные исследователи уделяют большое внимание проблеме обеспечения надежности различных строительных конструкций как на стадии их возведения, так и во время эксплуатации. Растет необходимость обеспечить надежную эксплуатацию жилых домов, административных и производственных зданий и сооружений. Ремонт и усиление строительных конструкций в современной России требуют значительных материальных затрат.

К настоящему времени в отечественной и зарубежной практике накоплено множество различных способов и конструктивных приемов усиления. Традиционные способы усиления железобетонных конструкций с использованием стальной арматуры сравнительно дорогостоящие, трудоемкие и в ряде случаев не обеспечивают выполнение соответствующих работ без выключения сооружения из эксплуатации. Поэтому существует необходимость использования новых технологий и способов усиления, а также использования современных материалов. За рубежом для усиления железобетонных конструкций успешно применяют композитные материалы на основе высокопрочных углеродных волокон, которые уже получили широкое применение в аэрокосмической и авиационной промышленности. В большинстве случаев усиление конструкций углепластиковыми оказывается конкурентоспособно по сравнению с традиционными методами, как по срокам производства работ, так и по стоимости. Практика строительного производства в России знает немало успешных примеров использования углепластиков при усилении железобетонных и каменных конструкций ряда зданий и сооружений.

Углеродные композиционные материалы (углепластики) на основе фибры изготавливаются из продолговатых микроволокон, омоноличенных в отверждающем полимере (эпоксидные и полиакрилонитриловые смолы). Углеродные волокна обладают высоким модулем упругости, высокой прочностью и жесткостью, поэтому в настоящее время они находят все большее применение при создании композиционных материалов, и объем их производства за последние 10 лет увеличился на порядок.

Углеродные волокна были разработаны еще в начале 60-х годов прошлого века в Великобритании. Они изготавливаются из различных исходных материалов, называемых прекурсорами.

Физико-механические свойства волокон сильно зависят от прекурсора и условий карбонизации, т.е. от степени насыщения исходного материала углекислым газом, т.к. они определяют степень дефектности образующегося кристалла.

Физико-механические свойства таких материалов определяются типом и количеством применяемых волокон, их ориентацией и распределением в поперечном сечении ленты, а также объемным соотношением волокон и отверждающего полимера в композите. Механические характеристики применяемых в строительстве волокон углеродных композиционных материалов приведены в таблице 1 [1].

**Таблица 1. Физико-механические свойства некоторых типов волокон**

Тип фибры	Прочность на растяжение, МПа	Модуль упругости, ГПа	Деформация удлинения, %	Плотность, т/м <sup>3</sup>
Углерод высокопрочный	3400 – 3900	200 – 250	1,5-2,5	1,75-1,95
Углерод высокомодульный	2900 – 4000	300 – 700	0,45 -1,2	1,75-1,95

Самым главным недостатком углеродных композиционных материалов является их довольно высокая стоимость, которая компенсируется рядом неоспоримых преимуществ по сравнению с другими материалами, особенно в вопросах усиления зданий. Это возможность проведения работ без остановки технологического процесса, низкая плотность и малый вес, способность повторять практически любые формы усиливаемой конструкции, отсутствие громоздких приспособлений для монтажа, невосприимчивость к агрессивным средам.

Несмотря на преимущества углепластиков по сравнению с другими материалами, особенно в вопросах усиления зданий, данный вид усиления еще не получил широкого распространения в нашей стране.

Рассмотрим использование углепластиков на примере города Череповца. Это город с развитой инфраструктурой. Он окружен рядом промышленных предприятий, одним из которых является известный металлургический завод ОАО «Северсталь». В городе осуществляется новое строительство и производится

Параничева Н.В., Назмеева Т.В. Усиление строительных конструкций с помощью углеродных композиционных материалов

реконструкция старого фонда. Основными объектами усиления как раз и являются административные и производственные здания и сооружения металлургического комбината.

Опрос широкого ряда проектных и строительных организаций показал, что в городе в принципе не применяется усиление конструкций с использованием углепластиков. Конечно, многие слышали, видели и что-то читали об углепластиках, но никто не применял их в существующих конструкциях, нет ни одного реального примера. Отсутствие инженерных решений по применению углепластиков в городе, прежде всего, объясняется отсутствием опыта, недостаточной обеспеченностью нормативной и расчетной литературой, и, конечно, высокой стоимостью материала.

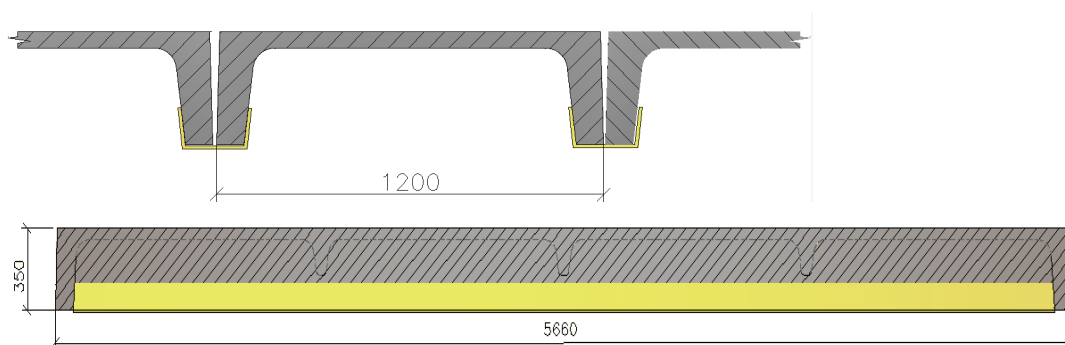
Рассмотрим применение углепластика в качестве усиления железобетонной плиты перекрытия, опирающейся на консоли ригеля. Плиты железобетонные ребристые размером 5660x1190x350 мм находятся в здании административно-бытового комплекса (АБК). Здание АБК находится на территории цеха ОАО «Северсталь» г. Череповец. Здание АБК эксплуатируется с 1969 года. Плиты находятся на отметке +3.600 над раздаточным отделением столовой АБК, непосредственно над плитами находятся гардероб и тамбур перед душевой.

Авторами статьи были получены результаты технического обследования, выполненного организацией «Центр технической диагностики» в 2009 году. В результате технического обследования было установлено следующее: в процессе эксплуатации здания была выполнена перепланировка стен и замена существующей конструкции пола современным материалом. В связи с этим произошло изменение нагрузок и появление незначительных продольных трещин на нижней поверхности плиты. По результатам обследования было принято решение об усилении конструкции плиты.

Характер использования помещения под плитами (помещение столовой) подразумевает непрерывный режим использования помещения, т.к. цех работает круглосуточно. Территория цеха довольно значительна, другой столовой рядом нет, прекращение работы столовой в целях выполнения работ по усилению плит нежелательно по понятным причинам, т.к. необходимы мероприятия по обеспечению работников цеха полноценным питанием, что приведет к экономическим затратам. В данном случае проводить традиционное металлическое усиление нежелательно, так как возможная конструкция будет тяжелой и трудоемкой в монтаже, потребует проведения сварочных работ и применения дополнительного оборудования. Также будут необходимы затраты времени на выполнение подготовительного периода и на проведение самих работ, что потребует прекращения работы столовой.

В связи с этим, на наш взгляд, усиление углеродными композиционными материалами в данном случае наиболее целесообразно.

Усиление железобетонной плиты, работающей на изгиб, производится внешним армированием из углепластика путем приклеивания последнего в растянутой зоне конструкции с расположением фибры параллельно максимальным растягивающим усилиям (рис. 1).



**Рисунок 1. Система усиления углепластиком**

Размеры и толщина углепластика, необходимые для обеспечения требуемой прочности, определяются расчетом. При проектировании усиления железобетонных конструкций с использованием внешнего армирования из фиброармирующих пластиков (ФАП) используется метод расчета по предельным состояниям. Важным условием надежной эксплуатации усиленных с помощью ФАП конструкций является соблюдение конструктивных требований [1].

Материалы различных производителей имеют различные прочностные и деформативные характеристики, поэтому для расчетов принимаются характеристики по ГОСТ 245.601-80. Для выполнения самих расчетов было использовано «Руководство по усилению железобетонных конструкций композитными материалами», основанное на результатах многочисленных экспериментальных исследований и данных практического применения композиционных материалов для усиления строительных конструкций в России и Параничева Н.В., Назмеева Т.В. Усиление строительных конструкций с помощью углеродных композиционных материалов

за рубежом. В Руководстве приведена методика расчета усиливаемых железобетонных конструкций внешним армированием композиционными материалами.

Основные положения, принятые в ходе расчета:

- При проектировании усиления железобетонных конструкций использовался метод расчета по предельным состояниям.
- Система усиления спроектирована на восприятие растягивающих усилий с учетом совместной деформации внешней арматуры и бетона конструкций.
- В предельном состоянии изгибаемого элемента усилия в сжатой зоне воспринимаются бетоном и сжатой стержневой арматурой, а в растянутой – стержневой арматурой и внешней композитной арматурой.
- При проектировании усиления конструкций учтено, что несущая способность конструкции достаточна для восприятия постоянной и ограниченной временной нагрузки в случае повреждения системы усиления по каким-либо причинам.

Особенностью применения углепластиков являются следующие обязательные требования:

- система усиления может применяться, если фактическая прочность на сжатие бетона конструкции составляет не менее 15 МПа;
- максимальная эксплуатационная температура работы не должна превышать температуру стеклования полимерной матрицы и клея (ориентировочно 60-150°C);
- необходимо строго соблюдать технологию, ремонтный слой должен быть надежным основанием для наклейки усиливающих накладок и работать с ними совместно;
- трещины с раскрытием более 0,3 мм необходимо заинъецировать;
- необходимо накладывать ограничения на величину упругих деформаций бетона, работающего совместно с композиционным материалом, т.к. последние не обладают пластическими свойствами, их разрушение носит хрупкий характер;
- необходимо ограничивать предельно допускаемое усилие, возникающее в арматуре, с помощью коэффициента  $k_m$ , что обеспечивает отсутствие отслоения углепластика при расчетных нагрузках, т.к. с увеличением жесткости возрастает вероятность отслоения.

Выражение (1) даёт оценку коэффициента условия работы фиброармирующего пластика  $k_m$ , который зависит от жесткости элемента усиления [1]:

$$k_m = \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{60\varepsilon_{ft}} \left( 1 - \frac{nE_{ft}t_f}{360000} \right) \leq 0.9 \\ \frac{1}{60\varepsilon_{ft}} \left( \frac{90000}{nE_{ft}t_f} \right) \leq 0.9 \end{array} \right\} (1)$$

Расчет по прочности сечений изгибаемых элементов, усиленных углеродным композиционным материалом, производят из общего условия:  $M < M_{ult}$ .

Проверка сечения плиты показала, что эксплуатационный момент от существующей нагрузки  $M=70,5$  кНм превышает прочность сечения  $M=51,5$  кНм.

Наиболее распространенными формами композиционных материалов являются холсты различного плетения, полосы и пластины. Холсты представляют собой гибкую ткань с одно- или двунаправленным расположением волокон. Для улучшения стабильности формы в поперечном направлении ткань снабжена специальными термопластиковыми волокнами. При установке на конструкции холсты утапливаются в полимерный клей – матрицу, обеспечивающую их плотное прилегание к усиливаемой конструкции. Они выполняются непосредственно на строительном объекте. Полосы или пластины – это изготовленные в заводских условиях изделия из композиционного материала, непосредственно приклеиваемые на заранее подготовленную поверхность усиливаемой конструкции.

Результаты расчетов нескольких вариантов углеродных композиционных материалов, используемых в качестве усиления данной плиты, представлены в табл. 2.

Таблица 2. Расчетные характеристики различных углеродных композиционных материалов

Марка фирмы-производителя	Толщина, мм	Ширина, мм	E, ГПа	R <sub>k</sub> , МПа	M, кН	Недонапряжение (Δ), %
Углепластики – ламинаты						
Sika® CarboDur® S	1,2	660	>155	2400	301	15
Sika® CarboDur® M	1,4	840	>210	2000	306	27
Sika® CarboDur® H	1,4	1000	>300	1400	279	44
Mapei® Carboplate E 170	1,4	750	170	>3100	303	19
Углепластики – ткани (холсты)						
MapeWrap® C UNI-AX 600/10;	0,335	300	230	4800	210	10
MapeWrap® C UNI-AX 300/20;	0,167	200	230	4800	131	19
S&P® C Sheet 640	0,19	450	640	2650	285	5
S&P® C Sheet 240 – 200,	0,117	300	240	3800	111	5

Наилучший результат показывает материал S&P® C Sheet 240–200, так как при его использовании не только обеспечивается необходимая прочность сечения, но и прочность внешней арматуры используется почти полностью.

Результаты расчета могут быть подтверждены моделью усиления железобетонных плит углеродными композиционными материалами, созданной в программно-вычислительном комплексе. Но моделирование ребристой плиты затруднено в связи с тем, что расчетная схема поперечного сечения ребристой плиты представляет собой тавр, сжатая зона которого расположена в полке, а растянутая – в ребре. Также существует необходимость создания модели с использованием метода объемных конечных элементов, которая отразила бы совместную работу плиты, клея и углепластика.

Важной проблемой в вопросе использования углеродных материалов в качестве усиления также является долговечность, которая связана больше не с работой углеродного волокна, а с работой клеящего состава. Должна быть обеспечена соответствующая адгезия, которая сохранилась бы на протяжении десятков лет и гарантировала бы надежную совместную работу железобетонной плиты, углеродного материала и клеящего состава.

Использование композиционных материалов может положить начало новому направлению реконструкции железобетонных инженерных сооружений, обеспечивающему существенное сокращение трудоемкости, стоимости и сроков выполнения работ. Применение углеродных композиционных материалов в качестве усиления – перспективное направление строительной отрасли.

## Литература

1. Руководство по усилению железобетонных конструкций композитными материалами. М., 2006.
2. СП 52-101-2003. Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры. М., 2004.
3. Шилин А.А. и др. Усиление железобетонных конструкций композиционными материалами. М., 2004.

\* Наталья Владимировна Параничева, г. Череповец

Тел. раб.: +7(8202)28-48-61; эл. почта: NatashaSunny@yandex.ru