

УДК 624.012.45-751

**УСИЛЕНИЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ
ЭЛЕМЕНТАМИ ВНЕШНЕГО АРМИРОВАНИЯ ИЗ
ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ
НА ОСНОВЕ ВЫСОКОПРОЧНЫХ ВОЛОКОН**

**Дорофеев В.С., д.т.н., профессор, Заволока М.В., к.т.н., профессор,
Заволока Ю.В., доцент, Заволока Ю.М., инженер,
Рогачко Е.И., студент**

Одесская государственная академия строительства и архитектуры

Объем проводимых обследований зданий и сооружений в Украине увеличивается с каждым годом, что является следствием физического и морального их износа, модернизации и реконструкции производственных зданий промышленных предприятий, реконструкции и модернизации жилых зданий старой постройки.

Результаты технического обследования зданий и сооружений необходимы для выбора наиболее эффективного варианта их реконструкции, модернизации и усиления несущих конструкций, преимущественно железобетонных, и дает возможность исключить нецелесообразные затраты.

Задачи усиления железобетонных конструкций, в большинстве случаев, трудны и исключительно ответственны.

Методы усиления железобетонных конструкций имеют своеобразную специфику, связанную с природой конструкций (их монолитность, скрытость арматуры) и требуют индивидуальных подходов в каждом конкретном случае. Причем индивидуальность подходов, отличается от подходов к конструктивным решениям при новом строительстве. Как правило, усиление проводится в условиях действующего производства, в условиях повышенной стесненности и является достаточно сложной, трудоемкой и, часто, дорогостоящей работой.

Между тем, общие затраты времени на усиление конструкций и реконструкцию зданий в 1,5 – 2 раза меньше, чем новое строительство, капитальные вложения существенно меньше, а окупаемость в 2 – 2,5 раза быстрее, чем при новом строительстве.

Традиционное усиление железобетонных конструкций осуществляется тремя¹ основными способами: **первый способ** – изменение конструктивной схемы (установка в усиливаемых изгибаемых элементах дополнительных жестких и упругих опор); **второй способ** – изменение напряженного состояния конструктивного элемента (устройство в растянутой зоне усиливаемого элемента преднапряженных затяжек, в колоннах – установка предварительно напряженных распорок); **третий способ** (самый распространенный) – увеличение сечения за счет устройства обойм, рубашек или односторонних и двусторонних наращиваний сечений конструкций.

В ряде случаев выполнение усиления традиционной технологией бывает очень затруднительно или технически невозможно.

В 1960 годы французский инженер Лермит (L'Hermite)² впервые применил способ усиления железобетонных конструкций с помощью внешних стальных пластин, закрепленных к растянутой поверхности конструкции эпоксидным клеем. Внешнее армирование стальными пластинами увеличивало несущую способность железобетонных конструкций, повышало их жесткость и трещиностойкость.

Однако, данный способ при всей своей эффективности имел существенные недостатки: сильная подверженность коррозии стальных пластин требует дополнительных расходов на их защиту и уход; большой вес стальных пластин приводит к нарушению сцепления между ними и бетоном; технологическая сложность монтажа усиливающих элементов связана с необходимостью выполнения многих дополнительных работ, что увеличивает срок выполнения усиления и повышает его стоимость.

В последние годы способ внешнего армирования для ремонта и усиления строительных конструкций, получил дальнейшее развитие, благодаря новым высокоэффективным композиционным материалам

¹ Объединяя первый и второй способы усиления один способ под названием «устройство разгружающих элементов», ряд авторов считает, что усиление железобетонных конструкций достигается двумя основными способами, например: А.Б.Гольшев, И.Н.Ткаченко «Проектирование усилений несущих железобетонных конструкций производственных зданий и сооружений». – К.: Логос, 2001. – 172 с.

² L'Hermite R.L., Bresson I., Arme Par Collages Des Armatures. RILEM Int. Symposium, Resins in Building Construction, Part 2, Paris, 1967, s. 175-203.

на основе стеклянных, арамидных и, в особенности, углеродных волокон.

Первые усиления изгибаемых железобетонных конструкций композиционными материалами выполнены в Швейцарии профессором Майером (Meier U.) и в 1987 г. были опубликованы первые результаты исследований [1].

Внешнее армирование, предусматривающее с помощью специальных эпоксидных смол приклеивание композитных материалов из углеродных волокон, обладает **целым рядом достоинств**: высокая прочность при растяжении; высокий модуль упругости; устойчивость практически ко всем агрессивным средам – кислотам, щелочам и растворителям; водонепроницаемость; обеспечивает стойкость конструкций в сейсмически опасных зонах; соединение с конструкцией только с помощью клея; небольшой собственный вес, следовательно, незначительное дополнительное нагружение конструкций; легкость монтажа, не требующая специальной оснастки; возможность покрытия красками, что дает возможность полностью скрыть усиление.

Волокна углеродные также имеют хорошие свойства изоляции (электрические и термические), а также отсутствие подверженности магнитному полю.

Основные недостатки: высокая стоимость композиционных материалов; композиционные материалы не обладают пластическими свойствами (отсутствует площадка текучести) и их разрушение носит хрупкий характер. Плохие пластические свойства композиционных материалов не способствуют перераспределению напряжений в усиливаемой конструкции; отсутствие сопротивляемости высоким температурам требует обеспечить дополнительную защиту систем усиления противопожарными мероприятиями.

Физико-механические характеристики некоторых типов угле-, стекло- и арамидных волокон приведены в таблице 1.

На основе композиционных материалов изготавливают три основных вида изделий: ленты (ламинаты), ткани (холсты); арматуру; дискретное волокно – наполнитель для фибробета.

Основными производителями в мире композиционных материалов являются фирмы: Sika, Tyfo, CLEVER, MAPEI.

В Европе, Америке различают и условно обозначают три главных типа композиционных волокон FRP (Fiber Reinforced Plastic или Fiber Reinforced Polymer), используемых в строительстве при усилении конструктивных элементов зданий и сооружений:

CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic) – углеродно-фиброармированный пластик. Композит на основе углеродных волокон;

AFRP (Aramid Fiber Reinforced Plastic) – арамидно-фиброармированный пластик. Композит на основе арамидных волокон;

GFRP (Glass Fiber Reinforced Plastic) – стекло-фиброармированный пластик. Композит на основе стекловолокна.

Физико-механические характеристики некоторых типов угле-,
стекло- и арамидных волокон

Таблица 1

| Материал волокна | Модуль упругости, E , ГПа | Прочность при растяжении, R_b , МПа | Предельное удлинение, δ , % | Плотность, ρ , кг/м ³ |
|-----------------------------|-----------------------------------|--|--|--|
| Углерод (ВП) | 200-250 | 3400-3900 | 1,5-2,5 | 1750-1950 |
| Углерод (ВМ) | 300-700 | 2900-4000 | 0,45-1,2 | 1750-1950 |
| Арамид (ВП) | 75 | 3500 | 4,6 | 1400 |
| Арамид (ВМ) | 110 | 2900 | 1,5-2,4 | 1400 |
| Стекло (тип Е) ¹ | 72-77 | 3400-3700 | 3,3-4,8 | 2600 |
| Стекло (тип С) ² | 75-88 | 4300-4900 | 4,2-5,4 | 2500 |
| Стекло (тип А) ³ | 21-74 | 3000-3500 | 2,0-4,3 | 2700 |

Примечания: ВМ – высокомодульный, ВП – высокопрочный;

¹ - универсальное; ² – высокопрочное; ³ – щелочестойкое;

ГПа – гигапаскаль; $1 \cdot 10^9$ Паскаль; 1 Па = 0,101972 кгс/м².

Жесткие композиционные ленты, получившие название «ламинаты» (от лат. lamina – пластина, полоса) изготавливают в заводских условиях путем протягивания углеродных волокон через ванну с эпоксидной смолой, под постоянным давлением формирующих элементов.

Ламинаты готовят однонаправленными, т.е. углеродные волокна располагаются в матрице смолы всегда в одном направлении. Ламинаты изготавливают длиной до 250 м, шириной – 5-15 см и толщиной от 1,2 до 1,5 мм.

Ламинаты (ленты) доставляют на объект свернутыми в рулон. Вес рулона углеродной ленты шириной до 150 мм составляет всего

несколько килограммов, что дает возможность транспортировать его одним строительным рабочим.

Фирма MAREI (Италия) углеродные ткани (холсты) изготавливает с расположением волокон в одном (однонаправленные) (рис. 1, а) и в двух (двунаправленные) (рис. 1, б) направлениях, а также симметричного перекрестно-диагонального плетения (Рис. 1, в).

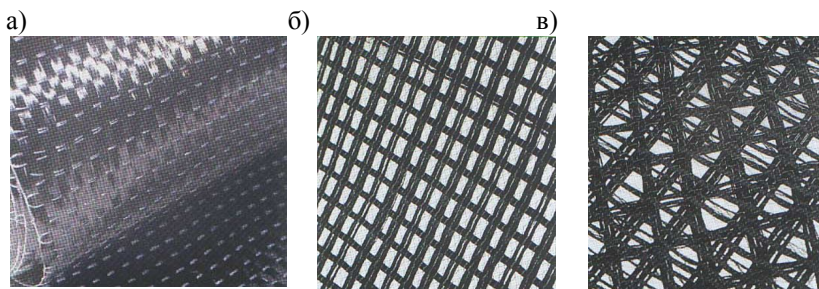


Рис. 1. Углеродные ткани фирмы MAREI (Италия): а) – высокопрочная ткань из однонаправленного карбонового волокна с высоким (230000 Н/мм^2) и очень высоким (390000 Н/мм^2) модулем упругости; б) – ткань из двунаправленного (симметричного перекрестного) плетения из высокопрочного карбонового волокна; в) – ткань симметричного перекрестно-диагонального плетения из высокопрочного карбонового волокна

Ламинаты и ткани на основе углеродных волокон применяют для усиления изгибаемых и внецентренно сжатых железобетонных и стальных конструкций. Возможности при применении мягких тканей шире, чем при применении ламинатов. Ткани (холсты) используют для обеспечения стойкости конструкций в сейсмически опасных зонах, а также при усилении элементов конструкции со сложной пространственной формой или при усилении больших кирпичных поверхностей.

Углепластик применяют для ремонтных и реставрационных работ фасадов зданий старой постройки – зданий – памятников архитектуры. При осуществлении реставрационных работ таких зданий углепластик отлично себя зарекомендовал при усилении перекрытий, не давая практически дополнительной нагрузки на стены и фундаменты.

Арамидные волокна, учитывая их очень высокую ударостойкость, нашли свое основное применение в виде тканей (холстов) для усиления конструкций, предназначенных для восприятия ударов и взрывов. Высокая ударостойкость арамидных волокон объясняется тем, что эти волокна, при высокой прочности на растяжение, единственные из

названных полимеров обладают прочностью и в направлении, перпендикулярном к направлению волокон.

Арамидные волокна имеют очень высокую прочность, но теряют сопротивление сразу с ростом температуры. Также этим волокнам свойственны значительная растяжимость и значительная деформация сжатия при длительной нагрузке.

Чаще всего и в большом объеме (из-за относительно низкой стоимости) используются стекловолоконные материалы. В настоящее время используются модифицированные стекловолоконные материалы с добавлением циркония. Материалы на основе стекловолокон обычно применяют для усиления центрально сжатых железобетонных конструкций (колонн, свай), кирпичной кладки (усиление стен, простенков) и деревянных конструкций.

Арамидные и, особенно, стеклянные волокна имеют относительно низкие модули упругости. Модуль упругости волокон имеет важное значение, поскольку он непосредственно влияет на жесткость композиционных усиливающих элементов. Только жесткие элементы внешнего армирования могут уменьшать напряжения в существующей арматуре усиливаемой железобетонной конструкции [2, 3].

Кроме самих композитных материалов и клея на эпоксидной основе, на котором элементы композитных материалов устанавливаются, в систему работы с ними входят также грунтовка и выравнивающая шпатлевка.

Эффективность применения композитных материалов для усиления строительных конструкций зависит: от выбора необходимых композитов; от качества подготовки основания под наклейку и от прочности адгезива – обеспечивающего надежное его сцепление с основанием конструкции.

При подготовке железобетонной конструкции к ремонту, а затем к усилению, необходимо заблокировать процессы коррозии арматуры. Иначе продукты коррозии будут отрывать защитный слой из ремонтных материалов, что сведет на нет работы по наклейке композитов. Прочность бетонной подложки (на отрыв) должна составлять не менее 1,5 МПа [2].

В новом европейском стандарте EN 1504 «Материалы и системы для ремонта и защиты бетонных конструкций» впервые четко определены требования к комплексной системе, состоящей из ремонтного материала, ремонтируемой поверхности и контактного слоя.

Основным нормируемым показателем прочности этой системы является сохранение адгезии, поскольку высокие физико-механические

характеристики самого ремонтного материала не являются гарантией качества ремонта. Только сохранением композитной системы должно служить основой долговечности отремонтированной конструкции.

Перспективным направлением улучшения физико-механических свойств композиционных материалов является применение нанометодов их производства и последующей пропитки равномерно распределенными полимерными связующими. Нанометоды пропитки и производства композиционного волокна позволяют до 30 % улучшить свойства материалов [4, 5].

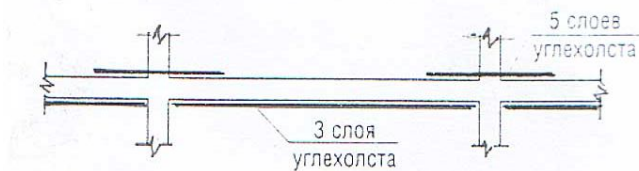
Опыт работы с углепластиком фирмы «Практик Инжиниринг» (Россия) показал, что восстановление и усиление углеродными лентами и холстами существующих конструкций эффективны только на приращение нагрузки, которое во многих случаях невелико. В результате невозможно использовать в полной мере высокие механические свойства углепластиков. Однако, усиление становится весьма эффективным при использовании углепластикового внешнего армирования в статически неопределимых железобетонных конструкциях, как противоаварийное – препятствующее раскрытию трещин в уже наметившихся пластических шарнирах.

Специалисты фирмы «Практик» для рационального решения проблем усиления углепластиком (высокая стоимость материалов, решение вопросов жесткости сечения усиливаемых элементов конструкций и др.) стали применять комбинированные методы усиления [4]. Так, например, при усилении 9 метровых ригелей монолитных железобетонных перекрытий многоэтажного административного здания, перепрофилированного под торговый центр, специалисты фирмы «Практик» предложили комбинированное усиление. Этот вид усиления представляет собой комбинацию двух методов: изменение расчетной схемы и наращивание сечения. Расчеты показали, что выполнение усиления только приклейкой углепластика приводит к сверхвысокому расходу углеволокна (до 5 слоев) углеродного холста, что повышает стоимость усиления и, главное, не решает проблему дефицита жесткости (рис. 2, а).

Изменение расчетной схемы осуществлялось путем устройства капителей, расположенных на перекрытии, с последующим выполнением их локального предварительного напряжения, а в зоне действия пролетных моментов наклеивали углеродный холст (рис. 2, б). В итоге, была подтверждена экономическая целесообразность применения комбинированного усиления, позволившая снизить расходы в два раза. Одновременно были решены следующие задачи, обеспечивающие восприятие проектных нагрузок:

1) благодаря устройству капителей, расположенных на перекрытии, был уменьшен в 1,5 раза расчетный пролет ригеля, что привело к снижению в 2,25 раза пролетных изгибающих моментов;

а)



б)



в)

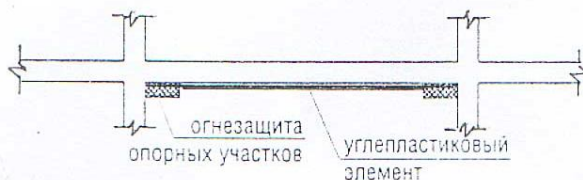


Рис. 2. Схема комбинированного усиления 9-метровых ригелей железобетонных перекрытий многоэтажного здания: а) наклейкой углеродиста; б) с изменением расчетной схемы путем устройства капителей, расположенных на перекрытии, с последующим выполнением их локального предварительного напряжения, а в зоне действия пролетных моментов наклеивали углеродный холст; в) компенсирование приращения изгибающего момента в пролете путем устройства внешнего армирования из углеродиста

2) приращение изгибающего момента на опорах от характеристической временной (кратковременной) нагрузки для торговых зданий полностью компенсировано моментом обратного знака от предварительного напряжения;

3) несущая способность по наклонным сечениям повысилась за счет наращивания сечения, дополнительного армирования анкерами, предварительного обжатия;

4) приращение изгибающего момента в пролете компенсируется установкой элемента внешнего армирования из углепластика, а огнезащита опорных зон элемента внешнего армирования обеспечивает его работу по шпренгельной схеме (рис. 2, в) [6].

В Украине были проведены экспериментальные исследования по усилению высокопрочными композитами из углеродных волокон образцов – балочных элементов, а также реальных конструкций, которые подтвердили эффективность такого усиления.

Была разработана современная технология по ремонту (обновлению) и усилению мостов углепластиковыми¹.

В Украине впервые использовали высокопрочные композиты из углеродных волокон для ремонта и усиления пролетного строения моста в с. Вистова, Ивано-Франковской области².

В ГНДЛ-88 Национального университета «Львівська політехніка» были проведены экспериментальные исследования с бетонными элементами, которые показали, что кубиковую прочность бетона, усиленного по этой технологии, можно увеличить на 35-43%, а призменную – на 21-27%. Поэтому обертыванием и наклеиванием высокопрочной тканью можно усиливать не только опоры, стояки, колонны и т.п., но и сжатые зоны железобетонных балочных элементов³.

В последние годы в Украине и за рубежом уделяется большое внимание армированию и усилению бетонных конструкций неметаллической композитной арматурой.

Неметаллическая композитная арматура не подвержена коррозии, обладает высокой прочностью на растяжение, в 4-4,5 раза легче металлической, является диэлектриком, имеет низкую теплопроводность.

¹ Кваша В.Г., Панченко О.В. Сучасні технології ремонту і підсилення мостів.

² Кваша В.Г., Мельник І.В., Кампуш М.Д., Рачкович В.С., Панченко О.В. Підсилення при реконструкції залізобетонної прольотної будови автодорожнього моста приклеєними вуглепластиковими // Міжвідом. наук. – техн. зб. – 2003.

³ Технічна експлуатація. Реконструкція і модернізація будівель. Навчальний посібник / за редакцією А.І.Гавриляка. «Львівська політехніка». 2006.

Из-за относительно низкой стоимости чаще применяют неметаллическую композитную арматуру на основе стеклянного и базальтового волокна.

В Украине освоено промышленное производство неметаллической композитной стеклопластиковой и базальтопластиковой арматуры.

Неметаллическая композитная арматура состоит из внутреннего гладкого несущего сердечника, выполненного из тонких волокон стекла, базальта или других материалов, диаметром 14-16 мм, пропитанных связующей термореактивной смолой (пластиком), внешний слой – периодического профиля.

Временное сопротивление неметаллической композитной арматуры из стеклянных или базальтовых волокон составляет, соответственно, 40-65 ГПа и 60-70 ГПа, плотность – 2,03 т/м³, относительное удлинение после разрыва – 2 %. Такая арматура характеризуется отсутствием площадки текучести и ее разрушение носит хрупкий характер [7].

В результате научно-исследовательской работы, проведенной ООО «НВП «Будконструкція»» с участием ООО «Технобазальт – Инвест» и ООО «Технологічна група «Екіпаж»» в Украине с 1 апреля 2013 г. введен в действие национальный стандарт по проектированию и изготовлению бетонных конструкций с неметаллической композиционной арматурой на основе базальто- и стеклоровинга¹.

Однако, следует отметить, что объемы внедрения неметаллической композитной арматуры в нашей стране отстают от зарубежных.

Цена неметаллической композитной углепластиковой арматуры относительно высока, по сравнению с металлической арматурой. Учитывая это, в ряде стран, в частности, в России приступили к разработке комбинированной арматуры. Такая арматура состоит из несущего сердечника из углепластика, покрытого базальтовой оболочкой. Комбинированная арматура гораздо дешевле, чем углепластиковая, но при этом несколько снижаются ее физико-механические свойства, однако, в разы превосходят аналогичные свойства стальной арматуры.

¹ ДСТУ-НБВ.2.6-185:2012 «Настанова з проектування та виготовлення бетонних конструкцій з неметалевою композитною арматурою на основі базальто- і склоровінгу».

Выводы

1. Несмотря на отставание нашей страны по объемам внедрения композитов вообще и неметаллической арматуры, в частности, у нас (с учетом огромного рынка сбыта) хорошие перспективы для наверстывания упущенного и создания собственной целой отрасли (которая в мире получила термин «high-tech») по производству композитов от сырья до готовой продукции.
2. Для создания в стране целой отрасли композиционных материалов необходим комплексный подход, предусматривающий: производство материалов, полуфабрикатов, изделий; создание инжинирингового центра; активизацию научных исследований; подготовку кадров; государственную поддержку. Все это позволит обеспечить необходимый объем потребления, который делает производство экономически эффективным.

Summary

The object of research – the strengthening of reinforced concrete structures with elements of external reinforcement from composite materials. There were represented a front point of view and generalizations for a rational approach to make it strength the reinforced concrete structures by using composites.

Литература

1. XXI польская конференция (8-11.03.2006 г. I-III том) / Ремонт и усиление железобетонных конструкций (перевод с польского: Макаров А.И.) – Запорожье: Издательство ООО «Настрой», 2008. – 116 с.
2. Хаютин Ю.Г., Чернявский В.Л., Аксельрод Б.З. Применение углепластиков для усиления строительных конструкций // Бетон и железобетон, 2002. - № 6. – С. 17-20.
3. Дорофеев В.С., Заволока Ю.В., Кобринец В.М., Заволока М.В., Заволока Ю.М. Обстеження і відновлення експлуатаційних якостей залізобетонних конструкцій. Навчальний посібник. – Одеса: Евен, 2011. – С. 476.
4. Ледина М.В. Умный подход к ремонту и усилению железобетонных конструкций // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2010. - № 1. – С. 20-23.
5. Ильичев А. Углеродный high-tech в строительстве // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2010. - № 4. – С. 32-33.

6. ООО «Практик Инжиниринг» г. Москва. Противоаварийные мероприятия по усилению железобетонных перекрытий торгового центра // Технологии строительства. – 2009. - № 7. – С. 22.
7. Климов Ю.А., Солдатченко А.С., Васильчишина С.А. Экспериментальные исследования прочности нормальных сечений изгибаемых элементов, армированных композитной базальтопластиковой арматурой // Бетон и железобетон в Украине. – 2011. - № 2. – С. 7.10.

