

УДК 6624.012.45-751

**УСИЛЕНИЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ
ВНЕШНИМ АРМИРОВАНИЕМ КОМПОЗИТНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ**

Заволока М.В., к.т.н., профессор,
Заволока Ю.М., инженер-технолог,
Заволока Ю.В., доцент,
Одесская государственная академия строительства и архитектуры
mvzavoloka@ukr.net

Аннотация. Проведены исследования отечественных и зарубежных достижений в ремонте и усилении железобетонных конструкций с использованием композитных материалов, содержащих волокна с высокой механической прочностью и применением специальных эпоксидных смол. Рассмотрены композитные материалы на основе: стеклянных, базальтовых, арамидных и особенно углеродных волокон. Отмечены достоинства и основные недостатки наиболее часто применяемого композитного материала на основе углеродных волокон. Даны обобщенные выводы и рекомендации.

Ключевые слова: ремонт, усиление, внешнее армирование, композитные материалы, железобетонные конструкции, эпоксидные смолы.

**ПОСИЛЕННЯ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ ЗОВНІШНІМ АРМУВАННЯМ
КОМПОЗИТНИМИ МАТЕРІАЛАМИ**

Заволока М.В., к.т.н., професор,
Заволока Ю.М., інженер-технолог,
Заволока Ю.В., доцент,
Одеська державна академія будівництва та архітектури
mvzavoloka@ukr.net

Анотація. Проведено дослідження вітчизняних і зарубіжних досягнень в ремонті і підсиленні залізобетонних конструкцій, з використанням композитних матеріалів, що містять волокна з високою механічною міцністю і застосуванням спеціальних епоксидних смол. Розглянуто композитні матеріали на основі: скляних, базальтових, арамидних і особливо вуглецевих волокон. Відзначено переваги та основні недоліки найбільш часто використовуюваного композитного матеріалу на основі вуглецевих волокон. Дано узагальнені висновки та рекомендації.

Ключові слова: ремонт, посилення, зовнішнє армування, композитні матеріали, залізобетонні конструкції, епоксидні смоли.

**STRENGTHENING OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES BY EXTERNAL
REINFORCEMENT WITH COMPOSITE MATERIALS**

Zavoloka N.V., PhD., Professor,
Zavoloka Y. M., Process-engineer,
Zavoloka Y.V., Associate Professor,
Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture
mvzavoloka@ukr.net

Abstract. Investigations of national and foreign achievements in the rehabilitation and reinforcement of reinforced concrete using composite materials containing fibers with high mechanical strength and use of special epoxy resins are carried out.

Composite materials based on glass, basalt, aramid, and especially carbon fibers are considered. The advantages and main disadvantages of the most commonly used composite material based on carbon fibers are noted.

Principal schemes of strengthening of the most common types of reinforced concrete bent structures are given. At present, reinforcement of bent reinforced concrete structures by external reinforcement with carbon fiber is the most technically advanced method.

In general, the world practice shows a steady growth in the use of composite materials in construction, especially in reinforced concrete structures. It is necessary to recognize the decline of interest in the national research and practical results in this field of science and technology. The generalized conclusions and recommendations are given.

Keywords: rehabilitation, strengthening, external reinforcement, composite materials, reinforced concrete structures, epoxy resins.

Введение. Общие затраты времени на усиление конструкций и реконструкцию зданий в 1,5-2 раза меньше, чем новое строительство, а окупаемость в 2-2,5 раза быстрее, чем при новом строительстве. В настоящее время мировая практика демонстрирует постоянный рост применения композитных материалов для ремонта и усиления строительных конструкций особенно железобетонных.

Цель работы. Цель исследований – оптимальное усиление железобетонных конструкций элементами внешнего армирования из эффективных композитных материалов, особенно углеродных. Обобщить результаты зарубежных исследований и их реализацию для ремонта и усиления строительных конструкций, особенно железобетонных с целью применения в нашей стране.

Объекты и методы исследований. Объект исследований – композитные материалы на основе: стеклянных, базальтовых, арамидных и особенно углеродных волокон.

Методы исследований – обобщение результатов новых зарубежных исследований по созданию композитных материалов и их эффективного применения для ремонта и усиления железобетонных конструкций.

Результаты исследований. В последние несколько десятилетий за рубежом появились весьма перспективные инженерные разработки, на базе бурно развивающихся исследований в области новейших (в том числе нано-) технологий, с использованием композитных материалов [1].

Использование композитных материалов для внешнего армирования железобетонных конструкций открывает широкие возможности для повышения их надежности и долговечности.

Особый интерес представляет использование композитных материалов на основе стеклянных, базальтовых, арамидных и особенно углеродных волокон для внешнего армирования железобетонных конструкций.

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 композитных материалов; композитные материалы не обладают пластическими свойствами (отсутствует площадка текучести, рис.1)

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.

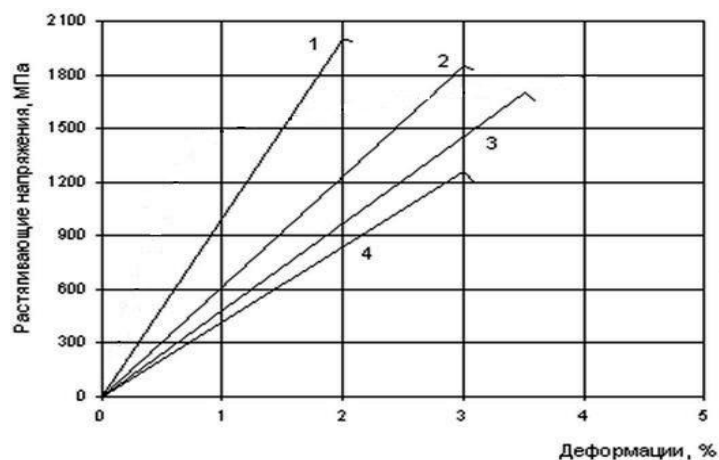


Рис. 1. Рабочие диаграммы высокопрочной неметаллической арматуры:
 1 – углепластиковая арматура; 2 – арамидопластиковая арматура;
 3 – стеклопластиковая арматура; 4 – базальтовая арматура

На основе композитных материалов изготавливают три основных вида изделий: ленты (ламинаты) [от лат. lamina – пластина, полоса], ткани (холсты); арматуру; дискретные волокна – наполнитель для фибробетона.

Основными производителями в мире композитных материалов являются фирмы Sika, Туфо, CLEVER, MAREI. Физико-механические характеристики некоторых типов угле-стекло- и арамидных волокон приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Физико-механические характеристики некоторых типов угле-стекло- и арамидных волокон [2]

| Материал волокна | Модуль упругости E, (ГПа) ⁵ | Прочность при растяжении, R _t (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 E) ¹ | 72-77 | 3400-3700 | 3,3-4,8 | 2600 |
| Стекло (тип C) ² | 75-88 | 4300-4900 | 4,2-5,4 | 2500 |
| Стекло (тип A) ³ | 21-74 | 3000-3500 | 2,0-4,3 | 2700 |

Примечания:

ВМ – высокомодульный, ВП – высокопрочный; 1 – универсальное, 2 – высокопрочное, 3 – щелочестойкое; ГПа – гигапаскаль, 10⁹ – гига (Г); 1Па=0,101972 кгс/м².

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 конструкций.

Адгезивы – специальные составы, основу которых составляют эпоксидные, полиэфирные или винилэфирные смолы, но наиболее универсальными являются эпоксидные смолы. Адгезивы применяют для пропитывания и наклеивания тканей и ламинатов на поверхность конструкций, которые подлежат ремонту или усилению.

Особой популярностью пользуются полимерные составы на эпоксидной основе, что

обусловлено уникальным соотношениям комплекса их эксплуатационных свойств: высокие физико-механические показатели, хорошая клеящая способность (адгезия), малая усадка при отверждении, нетоксичность, хорошо пропитывает ткани (полотна), которые употребляются. Физико-механические свойства терморезактивных смол применяемых при усилении конструкций приведено в таблице 2.

Таблица 2 – Физико-механические свойства терморезактивных смол, применяемых при усилении конструкций

| Свойства | | Полиэфиры | Эпоксиды |
|--|-----------------------|-----------|-----------|
| Плотность | кг/м ³ | 1000-1450 | 1100-1400 |
| Прочность при растяжении | МПа | 30-55 | 30-90 |
| Прочность при сжатии | МПа | 55-96 | 50-110 |
| Модуль упругости | Гпа | 2,1-4,1 | 0,5-20 |
| Граничная относительная деформация при разрыве | % | 1-300 | 0,5-50 |
| Коэффициент линейного теплового расширения | *10 ⁻⁶ /°C | 40-80 | 10-100 |
| Температура стеклования | °C | 50-60 | 40-260 |
| Адсорбция воды за 24 часа | % | 0,08-0,09 | - |
| За 7 суток | | - | 01,3 |

Большая часть работ связана с усилением изгибаемых конструкций, например, балок и плит. Усиление балок выполняют раздельно в зоне действия изгибающего момента и зоне действия поперечных сил. В первом случае усиление осуществляют наклеиванием композита на нижнюю поверхность ребра с направлением волокон вдоль оси балки (рис. 2).

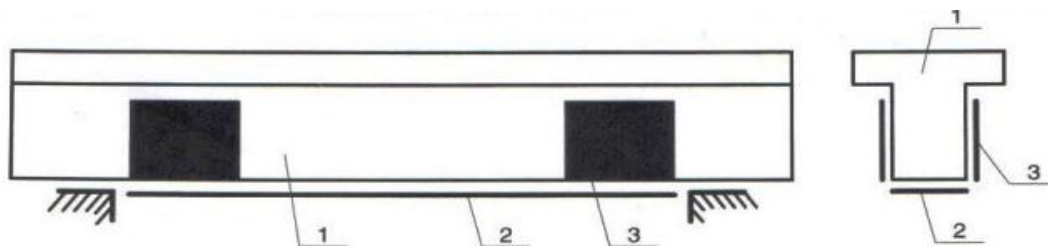


Рис. 2. Принципиальная схема усиления железобетонной балки композитными материалами: 1 – балка; 2 – продольная накладка; 3 – вертикальные хомуты из композита

Во втором случае усиление приопорной зоны, где действуют главные растягивающие напряжения, выполняют с помощью вертикальных или наклонных хомутов с направлением волокон перпендикулярно продольной оси балки или перпендикулярно потенциальным трещинам в опорном сечении (рис. 3).

Наклонные хомуты изготавливают из двух отрезков ленты, которые стыкуются на нижней поверхности ребра балки.

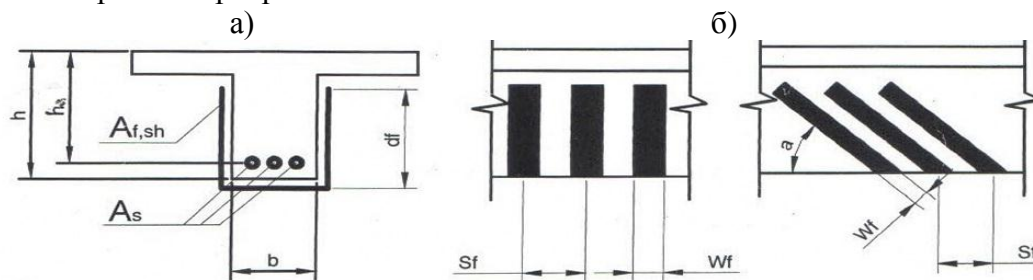


Рис. 3. Размещение хомутов из углепластика в приопорных зонах балки для усиления наклонных сечений:

- а – наклеивание с 3-х сторон U-образными хомутами в поперечном сечении балки;
- б – размещение вертикальных и наклонных хомутов на опорных участках балок

Основные буквенные обозначения:

- $A_{f,sh}$ – площадь сечения поперечной арматуры из углепластика;
- A_s – площадь сечения растянутой стальной стержневой арматуры;
- h – высота сечения;
- h_0 – рабочая высота сечения;
- d_f – высота наклеивания поперечных хомутов из углепластика;
- S_f – шаг хомутов из углепластика;
- W_f – ширина поперечных хомутов из углепластика;
- b – ширина сечения ребра балки.

Сначала наклеивают одну половину и осуществляют ее прижатие, после чего осуществляют наклеивание противоположной части (рис. 4) внапуск и проводят понизу на всю ширину ленты.

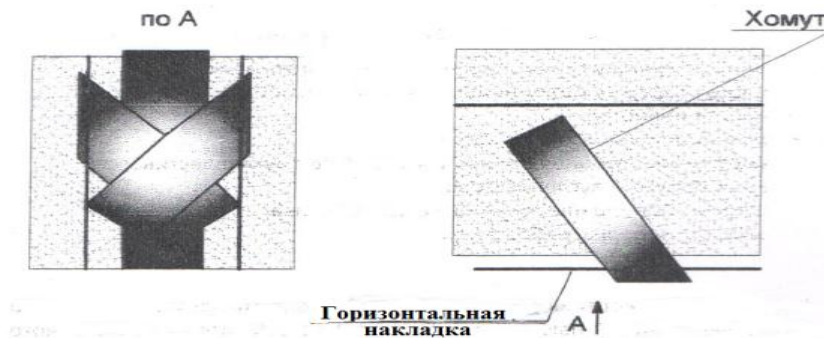


Рис. 4. Схема установки наклонных хомутов в балочных конструкциях

В настоящее время усиление изгибаемых железобетонных конструкций элементами внешнего армирования из углеродных волокон является самым оптимальным и совершенным в техническом отношении методом.

Ткани из углеродных волокон применяют для усиления колонн в виде поперечной обвязки (рис. 5).



Рис. 5. Усиление прочности колонны на сжатие и жесткости с помощью ткани из углеродных волокон фирмы Mapei

Фирма Mapei (Италия) представляет комплекс решений и линию материалов, которые были усовершенствованы и систематизированы на протяжении 17 лет, от классических систем на полимерной основе и волокнах Mapei FRP System до более современной системы усиления на неорганической основе и волокнах Mapei FRQ System, а также инновационной системы сейсмической защиты Mapei Wrap System.

Инновационная система сейсмической защиты представляет собой материал в виде «Сейсмических обоев», который позволяет увеличивать время эвакуации из зданий в случае землетрясения. Материал исполняет роль «Воздушной подушки» для второстепенных

перегородок (например, временных стен), как внутри, так и снаружи помещений, избегая, таким образом, разрушения или опрокидывания за пределы этажа во время сейсмических явлений [3].

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...16мк, пропитанных связующей термоактивной смолой (пластиком), внешний слой – периодического профиля. Временное сопротивление неметаллической композитной арматуры из стеклянных или базальтовых волокон, составляет соответственно 600..800 МПа и 800..1200МПа, модуль упругости – 40..55ГПа и 60..70ГПа, плотность – 2,03т/м³, относительное удлинение после разрыва – 2%. Такая арматура характеризуется отсутствием площадки текучести и ее разрушение носит хрупкий характер [4-6].

Перспективным направлением улучшения физико-механических свойств композиционных материалов является применение наноматериалов их производства и последующей пропитки равномерно распределенными полимерными связующими. Нанометоды пропитки и производства композиционного волокна позволяет до 30% улучшить свойства материалов [7, 8].

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.

Литература

1. Хаютин Ю.Г. О применении композиционных материалов для ремонта и усиления железобетонных конструкций / Ю.Г. Хаютин, В.Л. Чернявский // Бетон и железобетон, 2011. – №3. – С. 2-4.
2. 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. – 476 с.
3. Руководство по выбору композитных материалов для структурного усиления. Фирма Мареі (Италия), 2017. –19 с.
4. Климов Ю.А. Экспериментальные исследования прочности нормальных сечений изгибаемых элементов, армированных композитной базальтопластиковой арматурой / Ю.А. Климов, А.С. Солдатченко, С.А. Васильчишина // Бетон и железобетон в Украине, 2011. – №2. – С. 7-10.
5. ДСТУ НБ В.2.6-185:2012 «Настанова з проектування та виготовлення бетонних конструкцій з неметалевою композитною арматурою на основі базальто-і скловінгу». – Київ, 2012. – 41 с.
6. ДСТУ БВ.2.7-312:2016 «Арматура неметалева композитна базальтова періодичного профілю. Загальні технічні умови». – Київ, 2016. – 17 с.
7. Ледина М.В. Умный подход к ремонту и усилению железобетонных конструкций / М.В. Ледина // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века, 2010. – №1. – С. 20-23.
8. Ильичев А. Углеродный high-tech в строительстве / А.Ильичев // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века, 2010. – №4. – С. 32-33.

Стаття надійшла 5.02.2018