

УДК 624:69.059.3

В.В. Гапонов

УСИЛЕНИЕ ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ КОМПОЗИЦИОННЫМИ МАТЕРИАЛАМИ

Рассмотрена прогрессивная технология усиления изгибаемых железобетонных конструкций подземных сооружений с использованием композиционных материалов на основе высокопрочных волокон. Усиление реализуется путем внешнего армирования – присоединения к существующей конструкции элементов усиления с помощью полимерных клеев или матрицы на минеральной основе. Приведены результаты экспериментальных работ и испытаний опытных конструкций, усиленных сеткой из углеродных волокон. Даны рекомендации по проектированию усиления железобетонных конструкций с использованием внешнего армирования из фиброармированных материалов. Аргументировано обеспечение высокого уровня безопасности обделки тоннелей с армированием углеродной сеткой.

Ключевые слова: усиление, углеродная фибра, фиброармированные пластики, полимерные клеи, минеральная матрица.

Для нормальной жизнедеятельности городов необходимо обеспечить надежную эксплуатацию подземных сооружений различного назначения, среди которых важнейшими функциональными объектами городской инфраструктуры являются коллекторные тоннели для инженерных коммуникаций.

Анализ опыта эксплуатации тоннелей этого типа показывает, что свыше 90 % тоннелей выходят из строя ранее проектных сроков, то есть не соответствуют проектному уровню долговечности. Железобетонные конструкции и в первую очередь плиты перекрытия, подвергаются ускоренному коррозионному износу, что обуславливает необходимость выполнения ремонтных работ. Отечественный опыт свидетельствует о том, что до 75 % отремонтированных конструкций имеют отказы в течение первых пяти лет эксплуатации. Такое положение объясняется низким качеством выполнения работ, включая выбор ремонтных материалов, и отсутствием достоверной информации об изменении

эксплуатационной надежности отремонтированных конструкций во времени.

В случае использования при ремонте металлической арматуры коррозионный процесс через некоторое время возобновляется. Это время зависит от уровня агрессивности среды и может изменяться в широких пределах, а соответственно должны изменяться и межремонтные сроки. Воспрепятствовать такому положению можно путем использования не подверженных коррозии композиционных материалов на основе высокопрочных волокон (углеродных, арамидных, стеклянных и др.).

Усиление железобетонных конструкций композиционными материалами реализуется путем внешнего армирования – присоединения к существующей конструкции с помощью полимерных клеев или матрицы на минеральной основе.

Композиционные материалы обладают рядом существенных преимуществ по сравнению с традиционной стальной арматурой:

- высокой прочностью на растяжение и модулем упругости сопоставимыми или даже превосходящими аналогичные показатели стали;

- плотностью в 3-5 раз меньшей, чем у стали, в результате масса усиленной конструкции увеличивается незначительно;

- не подвержены агрессивному воздействию внешней среды, в том числе коррозии;

- позволяют производить работы по ремонту и усилению строительных конструкций с минимальными перерывами в эксплуатации сооружений.

Однако доля композиционных материалов в общем объеме материалов, используемых для ремонта и усиления железобетонных конструкций, весьма незначительна, что объясняется отсутствием нормативной базы расчета усиления и недостаточной отработанностью технологии производства работ.

Анализ литературных данных по эксплуатации городских коллекторных тоннелей инженерных коммуникаций и методов их ремонта и усиления [1] позволил установить что наиболее слабым звеном в конструкции сборных железобетонных коллекторных тоннелей являются плиты перекрытий.

Основные коррозионные процессы в плитах перекрытия, сопровождающиеся трещинообразованием и отслоением защитного слоя бетона, происходят в продольных ребрах жесткости, в то время как кессонная часть плит подвержена агрессивному воздействию среды в значительно меньшей мере.

Большинство их существующих методов усиления железобетонных конструкций не могут быть использованы при ремонте конструкций подземных сооружений. Это связано в первую

очередь с невозможностью разгрузки конструкций, их вскрытия, а также ограниченностью площади поперечного сечения тоннеля. Поэтому применительно к указанным условиям эксплуатации в качестве материала усиления целесообразно использовать композиционные материалы на основе высокопрочных волокон.

Применяемые в строительстве композиционные материалы с фиброй (фиброармированные пластики) изготавливаются собственно из высокопрочных волокон (углеродных, арамидных, стеклянных и др.), омоноличенных в полимерной матрице или матрице на минеральной основе. Физико-механические свойства таких материалов определяются типом и количеством применяемых волокон, их ориентацией и распределением в поперечном сечении ленты. Роль матрицы сводится к перераспределению действующих напряжений между волокнами, а также их защите от внешних воздействий. В качестве отверждающего полимера чаще всего используются эпоксидные и полиакрилонитриловые смолы.

Наиболее предпочтительны для усиления железобетонных конструкций фиброармированные пластики на основе углеродных волокон. Они обладают исключительными физико-механическими характеристиками (высокой прочностью на растяжение и сжатие и близким к стали модулем упругости), а также стойкостью к различным агрессивным средам. Аналогичные материалы на основе арамидных волокон имеют недостаточную прочность на сжатие, а стеклопластики – относительно низкий модуль упругости.

Модуль упругости фиброармированных материалов имеет важное значение при усилении строительных конструкций, особенно при использо-

вании композиционных усиливающих элементов без предварительного напряжения.

Только жесткие элементы внешнего армирования могут уменьшить напряжения в существующей арматуре. Элементы внешнего армирования из стеклянных или арамидных волокон должны быть значительно толще, чем из углеродных из-за относительно низкого их модуля упругости. Однако при применении толстых пластин внешнего армирования возникает проблема обеспечения совместной работы усиливающих композитных элементов с бетоном конструкции из-за возникновения больших касательных напряжений на границе бетон-композит и опасности хрупкого разрушения от сдвига.

Используемые для ремонта и усиления строительных конструкций фиброармированные пластики на полимерной основе можно подразделить на две группы:

- формируемые непосредственно при производстве работ на строительном объекте;
- заводского изготовления.

Первая группа основывается на использовании тканей (холстов) с расположением волокон в одном (однонаправленные) либо в нескольких направлениях. Холсты наклеиваются на поверхность усиливаемой конструкции послойно с помощью специальных эпоксидных смол с пропиткой смолами каждого слоя. Композит формируется при отверждении смолы в естественных условиях.

Композиты второй группы (ламинаты) – жесткие. Они производятся в заводских условиях путем пропитки тканей полимерными составами с последующим формированием пакета из необходимого количества слоев ткани и протяжкой через систему валиков с прессованием и термообработкой до

полного отверждения смолы. Стоимость ламинатов значительно выше стоимости холстов, однако трудоемкость работ при их использовании может быть ниже.

В то же время требуются большие дополнительные трудовые и материальные затраты на подготовку поверхности конструкции (выравнивание) перед наклейкой ламинатов. Возможности применения холстов при формировании композита шире, чем при использовании ламинатов, т.к. с помощью мягкой ткани можно легко выполнять даже сложные пространственные формы с объемным перераспределением усилий в восстанавливаемых элементах конструкций.

Несмотря на высокую стоимость композитов, использование их для усиления строительных конструкций во многих случаях оказывается экономически целесообразным, т.к. реконструкцию можно выполнять без вывода сооружения из эксплуатации, при этом значительно сокращается трудоемкость производства. Сравнение композиционных материалов различных фирм показывает, что для каждой системы эквивалентные уровни напряжений могут быть обеспечены путем изменения ширины или количества уложенных слоев. Преимущество полос большой ширины при фиксированном усилении заключается в увеличении площади сцепления и соответствующем снижении контактных напряжений.

Успех применения композиционных материалов для усиления строительных конструкций зависит в значительной мере от качества подготовки основания под наклейку ламинатов и холстов. Это связано с выбором материалов и технологий для ремонта разрушенной поверхности железобетона, обеспечивающих высокую адге-

зию ремонтного слоя к «подложке». Ремонтный слой, в свою очередь, должен сам явиться надежным основанием для приклеивания усиливающих композиционных материалов и работать с ними совместно. Подготовка железобетонных конструкций к ремонту и последующему усилению должна включать мероприятия по блокированию процессов коррозии арматуры, которые, как правило, развиваются при первых признаках деструкции.

Важнейшей проблемой внешнего армирования с приклеиванием композиционных усиливающих элементов на поверхность строительных конструкций является обеспечение их совместной работы. Необходимо предотвратить отрыв и проскальзывание усиливающих элементов вдоль поверхности растянутой зоны и их отрыв по концевым участкам. Кроме того, опасно отделение армирующих элементов от поверхности конструкций в зонах критического трещинообразования. Эти проблемы особенно существенны для пластинчатых армирующих элементов (ламинатов). Прочность их сцепления с поверхностью растянутой зоны иногда оказывается недостаточной. В этих случаях необходимо устройство специальной анкеровки, в т.ч. стальных анкеров. Использование холстов имеет в этом отношении существенные преимущества. Площадь сцепления такого композита с поверхностью конструкции может быть значительно развита.

Эффективность усиления композиционными материалами во многом зависит от прочности адгезива, его сцепления с бетоном. Отслаивание углепластиковых полос от бетона из-за недостаточной прочности адгезива, а также разрушение от сдвига по непрочному поверхностному слою бетона могут снизить эффективность усиления.

Наряду с перечисленными выше преимуществами, технология усиления строительных конструкций с использованием высокопрочных волокон в полимерной матрице имеет некоторые ограничения, обусловленные физико-механическими свойствами термореактивных смол. К числу таких относятся:

- низкое сопротивление температурным воздействиям (противопожарная стойкость), при температуре свыше 150 °С смола «течет», нарушается сцепление элемента усиления с конструкцией, и система усиления перестает работать;

- не может применяться на влажном основании, т.к. во влажной среде нарушается процесс полимеризации смолы;

- достаточно узкий температурный диапазон применения (+10 ÷ +30 °С), т.к. при температуре ниже +10 °С отверждение смолы происходит очень медленно, а при температуре выше +30 °С резко сокращается возможное время использования смеси;

- затвердевшее эпоксидное покрытие не обеспечивает паропроницаемость, что в ряде случаев приводит к ограничениям по площади наклейки элементов усиления.

В силу указанного представляет интерес получившая в последние годы ограниченное применение технология усиления железобетонных конструкций с использованием сеток из углеродных волокон в матрице на минеральной основе. Матрица структурно совместима с бетоном основания и после затвердевания передает нагрузку на жгуты сетки, тем самым обеспечивая работу всей системы. При этом повышается противопожарные характеристики системы до уровня параметров исходной конструкции, возможна укладка раствора (матрицы) на

влажное основание, обеспечивается паропроницаемость конструкции, значительно расширяется температурный диапазон возможности нанесения матрицы.

Использование матрицы на минеральной основе предусматривает нанесение раствора на основание с последующим втапливанием в него углеродной сетки. Такая технология может быть реализована на горизонтальных плоскостях (дорожные покрытия, верхняя поверхность мостовых балок, плит перекрытия) и частично на вертикальных (поверхности стен). Использование технологии на потолочных поверхностях весьма затруднительно, т.к. втапливание сетки должно осуществляться в свежешелюженный материал матрицы (раствор), а при этом велика вероятность нарушения сцепления с основанием и обрушения матрицы. Если же дать возможность нанесенному раствору выстояться некоторое время с целью обеспечения необходимого сцепления с потолочной поверхностью, то станет невозможным втапливание углеродной сетки. Таким образом, весьма привлекательная идея использования сеток из высокопрочных волокон в сочетании с матрицей на основе гидравлических вяжущих материалов требует серьезной технологической доработки в случае усиления изгибаемых конструкций покрытия.

Специфика выполнения работ по ремонту и усилению плит перекрытий в стесненных условиях коллекторных тоннелей без возможности вскрытия конструкций снаружи предполагает совмещение этих операций с установкой элементов усиления (углеродных сеток) на заключительном этапе ремонтных работ. При этом материал минеральной матрицы используется и в качестве ремонтного состава для восстановления сечения конструкций.

Однако было установлено, что традиционные ремонтные составы на цементной основе не обеспечивают качественной пропитки жгутов углеродной сетки, в результате чего в процессе деформации конструкций возможно продергивание волокон и как следствие снижение несущей способности конструкций. С целью предотвращения указанного была разработана технология, предусматривающая предварительную обработку углеродной сетки в низковязком эпоксидном составе перед укладкой ее в матрицу на минеральной основе.

Указанная технология была применена при усилении сводов, подземных помещений Московской государственной консерватории. Разработаны конструктивные решения и технология усиления прессованной бетонной отделки тоннелей круглого сечения путем создания по внутренней поверхности тонкостенной обечайки, армированной углеродной сеткой [2]. Таким образом, представилась возможность совместить преимущества двух технологий – с использованием полимерной матрицы и матрицы на минеральной основе, объединить ремонт и усиление конструкций в единый технологический процесс.

В результате выполнения экспериментальных работ были разработаны:

- элемент усиления изгибаемых железобетонных конструкций, включающий один или несколько слоев сетки из высокопрочных волокон. С целью исключения продергивания волокон в жгутах в процессе нагружения, сетка перед установкой в конструкцию подвергается обработке в низковязком эпоксидном составе, после чего под давлением осуществляется набрызг матрицы. Материал матрицы покрывает сетку, и после затвердевания обеспечивает сцепление с поверхностью конструкции;

- низковязкий эпоксидный состав для пропитки сеток из углеродных волокон, с целью исключения продргивания волокон. Физические свойства полимера после отвердевания:

прочность на сжатие	> 100 Н/мм ²
прочность на растяжение	> 35 Н/мм ²
модуль упругости	2800 Н/мм ²
относительное удлинение при разрыве	8%
адгезия к бетону	> 3 Н/мм ²

Вязкость в свежеприготовленном состоянии составляет 100 МПа·с.

В составе использован полиамидный отвердитель. Соотношение при смешивании (смола:отвердитель) – 4:1;

- состав матрицы на минеральной (цементной) основе со следующими характеристиками:

прочность на сжатие	> 40 Н/мм ²
прочность на растяжение	> 6 Н/мм ²
модуль упругости	30000 Н/мм ²
адгезия к бетону	> 3 Н/мм ²

Вязкость (подвижность) смеси регулируется путем изменения расхода воды в зависимости от характеристик оборудования для набрызга;

- исследованы физико-механические свойства различных видов сеток и холстов из углеродных волокон. На основании результатов испытаний и приведенной цены были выбраны материалы, которые в дальнейшем использовались для усиления полно-размерных конструкций.

При проектировании усиления железобетонных конструкций с использованием внешнего армирования из фиброармированных материалов используется метод расчета по предельным состояниям.

Расчет конструкций, усиленных фиброармированными пластиками, по первой группе предельных состояний производится во всех случаях. Расчет по второй группе предельных состояний производится только в тех случаях, когда расчетная нагрузка после усиления увеличивается.

Расчет системы усиления на основе использования фиброармированных материалов требует рассмотрения нескольких видов разрушения и предельных состояний усиленного элемента. Поэтому вначале рекомендуется ориентировочно назначить площадь сечения фиброармированного пластика выбранного типа и затем изменять ее в зависимости от результатов проверок соответствующих предельных состояний. Определение усилий в элементах конструкций производится с учетом данных, полученных при обследовании, предшествующем усилению.

Характеристики бетона и арматуры при отсутствии в них повреждений принимаются в соответствии со СНиП 52-101-2003 [3]. При наличии результатов обследования усиляемых конструкций назначение характеристик бетона и арматуры производят с учетом требований СП-13-102-2003 «Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений» [4].

При растяжении фиброармированные материалы имеют линейную зависимость между напряжениями и деформациями вплоть до разрушения. Свойства таких композиционных материалов определяются в основном типом, ориентацией и количеством армирующих волокон. Механические свойства всех систем фиброармированных материалов независимо от их вида должны определяться по результатам испытаний образцов с оценкой объемного содержания волокон в соответствии с ГОСТ 25.601-80 [5].

Система усиления на основе фиброармированных материалов должна проектироваться на восприятие растягивающих усилий с учетом совместной деформации внешней арматуры и бетона конструкции.

В предельном состоянии изгибаемого элемента усилия в сжатой зоне воспринимаются бетоном и сжатой стержневой арматурой, а в растянутом – стержневой арматурой и внешней арматурой из композиционных материалов. Расчет внутренних усилий в конструкции производится на основе гипотезы плоских сечений. В расчетах усиления принимается отсутствие взаимных смещений между стальной арматурой и бетоном, а также между приклеенной внешней арматурой и бетоном основания.

При проектировании усиления конструкций следует учитывать, что несущая способность неусиленной конструкции должна быть достаточной для восприятия постоянной и ограниченной временной нагрузки в случае повреждения системы усиления вследствие пожара, вандализма или других причин.

Расчетные характеристики фиброармированных материалов (прочность на растяжение R_f , модуль упругости E_f , предельная деформация растяжения ε_f) определяются на базе нормативных характеристик с учетом коэффициента надежности γ_f и коэффициента условия работы C_E , учитывающего влияние окружающей среды.

Расчетная прочность на растяжение фиброармированных материалов с учетом коэффициентов надежности γ_f и условия работы C_E определяется выражением

$$R_{ft} = \frac{C_E \cdot R_f}{\gamma_f}, \quad (1)$$

а расчетная деформация растяжения

$$\varepsilon_{ft} = \frac{C_E \cdot \varepsilon_f}{\gamma_f}. \quad (2)$$

Расчетные значения модуля упругости при растяжении E_{ft} принимаются равными их нормативным значениям:

$$E_{ft} = E_f = \frac{R_f}{\varepsilon_f}. \quad (3)$$

Значения коэффициента надежности γ_f принимаются равными:

- при расчете по предельным состояниям первой группы – 1,1;
- при расчете по предельным состояниям второй группы – 1,0.

Экспериментальные исследования влияния усиления с использованием углеродных сеток в матрице на минеральной основе были проведены на конструкциях двух серий:

- железобетонных балках (перемычках), имитирующих работу продольных ребер жесткости в плитах перекрытия;
- натуральных плитах перекрытия марки ДП-15-1т пролетом 5,4 и 4,2 м, на которых уточнялись полученные в первой серии испытаний результаты.

Внешнее армирование конструкций выполнялось из углеродной сетки с поверхностной плотностью в продольном (рабочем) направлении 400 г/м².

В результате проведенных испытаний установлено:

1. Подтверждена эффективность усиления изгибаемых железобетонных конструкций углеродными сетками в матрице на минеральной основе. Коэффициент усиления изменялся в диапазоне от 1,5 до 6, в зависимости от конструктивного исполнения и размеров сечения элемента усиления, а также коэффициента армирования исходной конструкции.

2. При усилении не имеющих поперечного армирования изгибаемых элементов короткими накладками порядка $S \cdot L$ разрушение происходит по наклонному сечению в месте окончания элемента усиления. Поэтому при проектировании усиления изгибаемых железобетонных конструкций необходимо учитывать их фактическое армирование и в зависимости от степени усиления проверять необходимость усиления наклонных сечений.

3. С целью предотвращения продергивания волокон в продольных жгутах сетки и повышения эффективности усиления углеродная сетка перед ее укладкой в цементную матрицу должна подвергаться предварительной обработке (пропитке) в низковязком эпоксидном составе.

4. Прочность усиленных конструкций можно повысить, если заводить углепластиковую арматуру за опоры в статически определимых балках или в зону нулевого момента в неразрезных балках. С этой же целью могут быть использованы различные средства для дополнительного закрепления элементов внешнего армирования, как например, установка хомутов из углеродной ткани в опорных зонах, металлических зажимов или анкерных пластин на болтах.

5. Углеродная сетка по длине установки должна выходить за пределы усиливаемой зоны не менее, чем на 150-200 мм (зона анкеровки). При многослойной конструкции элемента усиления каждый последующий слой должен быть короче предыдущего на длину анкеровки. Такое решение позволяет снизить концентрацию нормальных и касательных напряжений в концевых зонах.

6. Нарушение сцепления композитной арматуры с бетоном основания или отделение защитного слоя бетона являются типичными механиз-

мами преждевременного разрушения усиленных конструкций.

7. Нарушение сцепления по п.6 связано с раскрытием главной наклонной трещины и относительным сдвигом ее краев, при котором возникают растягивающие напряжения, превышающие предел прочности материала матрицы на разрыв. Жгуты в этом случае в целом остаются неповрежденными, но сам композит отделяется от основания. Этот вид разрушения связан с недостаточной прочностью усиленной балки на действие поперечной силы из-за малой площади поперечной арматуры и/или отсутствия на усиленной конструкции хомутов из композита.

8. Если прочность элемента на поперечную силу оказывается достаточной и образующиеся трещины не раскрываются слишком широко, то разрушение происходит из-за отделения защитного слоя бетона. В этом случае слабым звеном является бетон основания, прочность сцепления которого с арматурой пропорциональна прочности бетона на сдвиг. Вероятно, такой механизм более вероятен в узких балках со стержнями основной арматуры большого диаметра, т.к. площадь сечения, по которому происходит сдвиг, минимальна.

9. В процессе установки элементов внешнего армирования существует опасность возникновения дефектов, связанных как с технологией, так и с применяемыми материалами. Например, при набрызге материала матрицы возможно образование пустот на границе «композит-бетон». В таких случаях нарушение сцепления будет начинаться на участке с дефектами, и распространяться вдоль композита, приводя к отслаиванию его от конструкции.

10. Конструкции покрытия коллекторных тоннелей, усиленных углерод-

ной сеткой, подвергнутой обработке в низковязком эпоксидном составе перед укладкой в матрицу на минеральной основе, разрушаются с постепенным увеличением деформации. Продергивания волокон в прядях в процессе разрушения конструкций не

отмечено. Такой тип разрушения свидетельствует о более высоком уровне безопасности отделки тоннелей с армированием углеродной сеткой, что особенно важно при проведении ремонтно-восстановительных работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

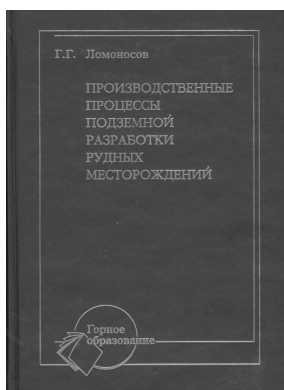
1. Шилин А.А., Пшеничный В.А., Картузов Д.В. Внешнее армирование железобетонных конструкций композиционными материалами. – М., Стройиздат, 2007.
2. Шилин А.А., Гапонов В.В., Аксельрод Е.З., Заломов С.С. Способ ремонта пресованной бетонной отделки метрополитена. Решение о выдаче патента на изобретение 20101183/56/03(026090).
3. СНиП 52-01-2003. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. – М., ГУП УПП, 2004.
4. СП-13-102-2003. Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений.
5. ГОСТ 25.601-80. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей. **ИДБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Гапонов Виталий Владимирович – Триада-Холдинг, gaponov@triadaholding.ru



НОВИНКИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «ГОРНАЯ КНИГА» - КНИГИ ДЛЯ УСПЕШНЫХ ИНЖЕНЕРОВ



Ломоносов Г.Г.
**ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ ПОДЗЕМНОЙ
РАЗРАБОТКИ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ**

Год выпуска: 2011, страниц: 517
ISBN: 978-5-98672-258-0 (в пер.)
УДК 622.273.06:622.34

В книге приведены основные сведения о производственных процессах добычи руд и нерудных полезных ископаемых, осуществляемых в рамках технологических схем подземных рудников. Рассмотрены производственные процессы очистной выемки, внутрирудничного транспорта и подъема полезного ископаемого, а также проведения эксплуатационных горных выработок, непосредственно связанных с добычными работами. Большое внимание уделено производственным процессам управления качеством продукции рудников, посредством которых обеспечиваются повышение концентрации полезных компонентов в добытой руде и стабилизация её состава.

Учебник иллюстрирован рисунками и фотографиями, отражающими современное горное оборудование и производственные процессы, технологическими схемами горных работ с их техническими характеристиками, а также расчётными графиками и другими материалами.