

Восстановление несущей способности кольцевых обделок тоннелей с использованием высокопрочных сеток из углеродных волокон

А.А. Шилин, проф., д-р техн. наук, ген. директор, В.В. Гапонов, канд. техн. наук, гл. инж., Д.В. Картузов, канд. техн. наук, гл. инж. проекта, ЗАО «Триада-Холдинг», Москва

Аннотация

Рассматривается новый подход к решению проблемы ремонта и реконструкции подземных сооружений, основанный на усилении бетонных кольцевых обделок с использованием в качестве арматуры сеток из высокопрочных волокон. Особенностью предлагаемой технологии ремонта и усиления конструкций является создание тонкостенной внутренней обечайки комбинированной сеткой из высокопрочных волокон и высокоадгезионной матрицей на минеральной основе.

На базе широкомасштабных исследований с применением современного оборудования дано обоснование выбора композиционных материалов и аргументированы достоинства разработанной технологии, а также перспектива развития данного направления.

Ключевые слова

Восстановление, ремонт, реставрация, углеродное волокно, усиление.

Abstract

The article considers a new approach to repair and reconstruction of circular-shaped concrete tunnel linings based on reinforcing them with high-strength carbon fibre mesh. The core of the suggested technology is to supplement repair and waterproofing works with structural strengthening by creating a thin-wall inner shell composed of a carbon fibre mesh and a mineral matrix with high adhesion.

Advantages and drawbacks of the mentioned technology are analyzed and back-upped by the results of a large-scale practical testing.

In conclusion authors estimate the efficiency of the proposed technology which has a good potential in terms of further development and application.

Keywords

Carbon fibre, repair; restoration; rehabilitation; strengthening.

Стареющий фонд железобетонных конструкций, возведенных в XX в., требует разработки технологических решений по восстановлению их несущей способности. Это справедливо и для обделок транспортных тоннелей, включая метрополитены [3]. Разработанные решения по усилению конструкций с применением стальной арматуры постепенно уступают место решениям с применением современных материалов, не подверженных коррозии, — неметаллическим материалам из полимеров, армированных высокопрочными волокнами.

За последние 30 лет в мире появились и широко применяются композиционные материалы, обладающие целым рядом преимуществ. Они имеют малый вес (в 4–5 раз меньше веса стали), при этом предел прочности на растяжение более чем в 4 раза выше, не подвержены коррозии и др. Физико-механические свойства таких материалов определяются типом и количеством применяемых волокон, их ориентацией

и расположением в поперечном сечении элемента усиления. Роль полимера сводится к распределению действующих напряжений между волокнами и защите их от внешних воздействий. Наиболее предпочтительны для усиления бетонных и железобетонных конструкций фиброармированные пластики на основе углеродных волокон [1]. Усиливающие элементы с использованием композиционных материалов могут быть выполнены в виде стержней, сеток, холстов, готовых элементов специального профиля.

Наряду с перечисленными преимуществами, технология усиления строительных конструкций с использованием подобных материалов имеет некоторые ограничения, обусловленные физико-механическими свойствами термоактивных смол полимерной матрицы. К числу таковых 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;

- невозможность применения на влажном основании, так как во влажной среде нарушается процесс полимеризации смолы;

- достаточно узкий температурный диапазон применения (+10...+30 °С), так как при температуре ниже +10 °С отверждение смолы происходит очень медленно, а при температуре выше +30 °С резко сокращается возможное время использования состава после смешивания;

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

В силу указанного выше были выполнены исследования с целью замены полимерной матрицы на матрицу с использованием гидравлических вяжущих материалов. В результате создана система усиления, в которой сетки из высокопрочных волокон утапливаются в матрицу 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 повышаются противопожарные характеристики системы до уровня параметров исходной конструкции, возможна укладка раствора на влажное основание, обеспечивается паропроницаемость конструкции, значительно расширяется температурный диапазон выполнения работ.

В ЗАО «Триада-Холдинг» разработаны конструктивные решения и технология усиления тоннелей круглого сечения, заключающаяся в создании по внутренней поверхности тонкостенной обечайки, армированной сеткой из углеродных волокон (в один или несколько слоев) со связующей матри-

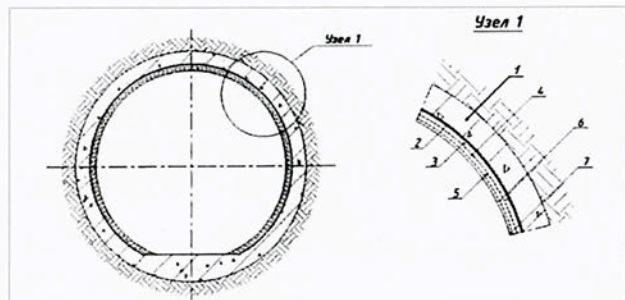


Рис. 1. Схема усиления кольцевой обделки тоннелей: 1 — свод тоннеля; 2 — праймерный слой; 3 — матрица на минеральной основе; 4 — высокопрочная углеродная сетка; 5 — второй слой матрицы на минеральной основе; 6 — второй слой высокопрочной углеродной сетки; 7 — финишный слой ремонтного состава на акриловой основе

цей на цементной основе, модифицированной полимерами.

Принципиальная схема усиления тоннелей представлена на рис. 1.

Поскольку конструкция обделки под действием внешних сил работает в продольном и поперечном направлениях неодинаково, усилия, возникающие в армирующей сетке, воспринимающей нагрузки, также будут различаться в продольном и поперечном направлениях. Как показали экспериментальные замеры, изгибающие продольные усилия, действующие на материал обделки, значительно больше сжимающих поперечных усилий. В связи с этим суммарная площадь поперечного сечения жгутов армирующей сетки, направленных поперек продольной оси тоннеля, должна быть не менее чем в 1,5 раза больше суммарной площади жгутов армирующей сетки, направленных вдоль продольной оси тоннеля. С целью определения оптимальных характеристик материалов усиления (углеродной сетки и матрицы на минеральной основе) были проведены специальные исследования.

Исследования осуществлялись в несколько этапов.

1. Сравнительные испытания сеток из высокопрочных углеродных волокон различных фирм-производителей с целью выбора оптимального варианта

При проведении исследований использовались образцы наиболее крупных производителей разных стран. Испытания проводились по ГОСТ 25.601 [2] и заключались в кратковременном нагружении образцов на растяжение с постоянной скоростью деформирования. Оценка совместной работы всех волокон жгутов определялась путем сравнительных испытаний сеток, заключенных в эпоксидную матрицу (рис. 2, а), и отдельных прядей без эпоксидной матрицы (рис. 2, б). Для равномерного распределения нагрузки по всему сечению матрицы на концевые части образцов наклеивались дополнительные наклейки для фиксации зажимов разрывной машины. Критерием сравнения служила величина прочности на разрыв, приведенная к 1 м ширины сетки.

Испытаниям подверглись образцы из одного, двух, трех и пяти жгутов, отобранных из соответствующих сеток. Вели-

чина гарантированного усилия определялась как усредненное значение по результатам испытаний четырех образцов.

Испытания проводились совместно с ВНИИ железнодорожного транспорта в лаборатории испытания материалов и конструкций на оборудовании фирмы Schenck, обеспечивающем растяжение образца с заданной постоянной скоростью перемещения активного захвата и измерением нагрузки с погрешностью менее 1% от измеряемой величины (см. рис. 2).

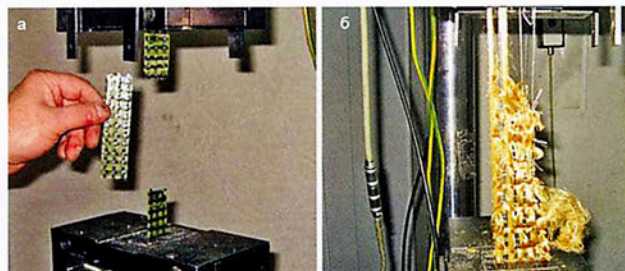


Рис. 2. Испытания сеток на разрывной машине: а — разрыв образца сетки производства Германии в эпоксидной матрице; б — разрыв образца сетки производства Италии без эпоксидной матрицы

В результате установлено, что для сеток производства Китая и Германии имеет место достаточно высокий уровень соответствия заявленных и фактических величин гарантированных усилий, которые составляют 15 т/м и 19 т/м соответственно.

Анализ экспериментов показал, что в образцах сеток, не заключенных в эпоксидную матрицу, жгуты работают неравномерно, что, в свою очередь, влияет на число слоев сетки в усиливающей обечайке, а также на ее совместную работу с матрицей.

При выборе сеток использовался критерий «цена — качество». На основе экспериментов и анализа приведенной цены были выбраны сетки производства Китая, которые в дальнейшем использовались при испытании крупномасштабных образцов. Эти сетки имеют следующие технические характеристики:

- модуль упругости — не менее 100 ГПа;
- прочность на разрыв — не менее 3 ГПа;
- поверхностная плотность — 570 г/м²;
- приведенная толщина — 0,18 мм;
- размер ячейки — 1321 мм.

2. Создание матрицы на минеральной основе для усиления обделок тоннелей

Проведены исследования с целью подбора состава для матрицы, который должен обладать рядом свойств: адгезией к бетону основания, вязкостью, обеспечивающей возможность утапливания углеродной сетки в усиливающий слой, определенными механическими свойствами.

В результате подобран состав на минеральной основе с добавками акрилата, обеспечивающий адгезию к бетону основания не менее 3 МПа и прочность на сжатие не менее 40 МПа. В зависимости от консистенции состав может наноситься на основание путем набрызга или ручным способом.

3. Создание и испытание усиленных фрагментов бетонной обделки

Для определения эффективности повышения несущей способности обделки в зависимости от толщины и армирования усиливающей обечайки проведены испытания образцов обделки с усилением и без (см. рис. 1). Образцы представляли собой фрагменты монолитной бетонной обделки внешним диаметром 500 и 2200 мм, толщиной стенки 50 и 100 мм и шириной 270 и 600 мм.

Образцы диаметром 500 мм были выполнены путем резки centrifугированной безнапорной трубы, армированной спиральной арматурой класса Вр-1 Ø5 мм. В качестве образцов диаметром 2200 мм использовались малоармированные кольца для круглых колодцев серии 3.900.1-14 (рис. 3).

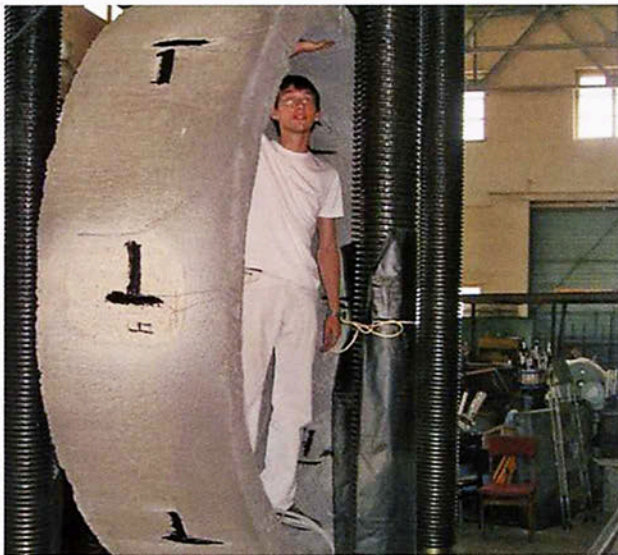


Рис. 3. Общий вид испытательного стенда с фрагментом бетонной обделки $d = 2200$ мм

Усиление образцов диаметром 500 мм осуществлялось путем создания внутренней обечайки с одним слоем углеродной сетки. Нанесение матрицы на минеральной основе производилось вручную. Затем образцы подвергали испытаниям (рис. 4).

Проводились сравнительные испытания исходных образцов без усиления и образцов с усиливающей внутренней обечайкой. Результаты представлены на графике (рис. 5).

Для образцов без усиления максимальная нагрузка составила 18 кН, для образцов, усиленных внутренней обечайкой с одним слоем углеродной сетки, — 47 кН. Коэффициент усиления — 2,45. Следует отметить, что после достижения максимальной нагрузки происходит ее плавное снижение с одновременным возрастанием деформации, что исключает возможность хрупкого разрушения конструкции.

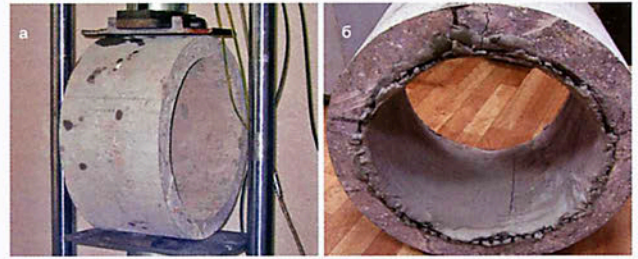


Рис. 4. Испытания фрагментов обделки диаметром 500 мм: а — общий вид фрагмента обделки диаметром 500 мм на испытательном стенде; б — разрушенный фрагмент обделки, усиленный одним слоем сетки

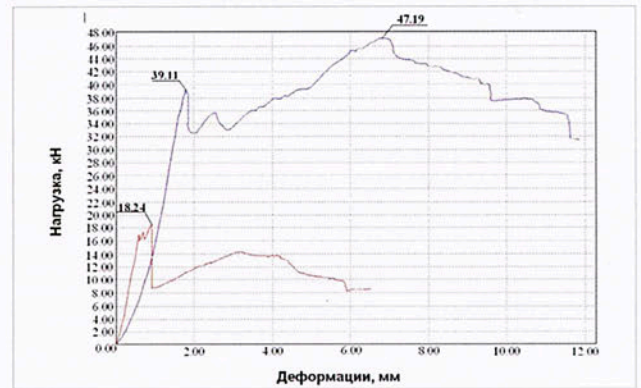


Рис. 5. Зависимость деформаций от нагрузки в фрагментах обделки диаметром 500 мм: — образец без усиления; — образец с усиливающей обечайкой

Усиление фрагментов обделки диаметром 2200 мм осуществлялось мокрым набрызгом на внутреннюю поверхность кольца материала матрицы на минеральной основе, утапливанием в него высокопрочной сетки из углеродных волокон и нанесением защитного покрытия. Для определения напряжений и деформаций в конструкциях фрагментов наклеивались тензодатчики по методу «полумоста». Исходя из экстремумов напряжений, датчики устанавливались как на внутреннюю, так и на внешнюю поверхности колец в местах максимальных и минимальных напряжений.

Испытания проводили совместно с ОАО ЦНИИС на пресовом оборудовании ПММ –1000. Результаты испытаний приведены в табл.

Анализ результатов позволяет утверждать, что несущая способность усиленных фрагментов обделки возросла в среднем в 4 раза. Фрагменты, усиленные одним слоем сетки, способны выдержать нагрузку до 3,60 т, фрагменты с двумя слоями сетки выдерживают нагрузку до 3,82 т.

Фрагменты обделки с композитной сеткой при снижении несущей способности с появлением трещин в процессе первоначальных испытаний при повторном нагружении показывают высокие результаты максимальной нагрузки — до 93% от первоначальной, что свидетельствует о большом запасе

Таблица. Результаты испытаний кольцевых фрагментов обделки диаметром 2200 мм

№	Тип фрагмента	Максимальная нагрузка, т	Вид разрушения	Максимальная нагрузка при повторном нагружении, т	Коэффициент усиления
1	Без усиления	0,85	Хрупкое	—	—
2	С одинарным армированием	3,60	Постепенное	3,54	3,85
3	С двойным армированием	3,82	Постепенное	3,01	4,09

прочности представленного типа усиления железобетонной обделки при динамических нагрузках, имеющих место в транспортных тоннелях.

Выводы

- Разработаны технические решения по восстановлению несущей способности кольцевых обделок тоннелей с использованием армированной высокопрочной сетки из углеродных волокон.

- Для выполнения ремонтных работ определены сетки из углеродных волокон со следующими характеристиками:

- модуль упругости — не менее 100 ГПа;
- прочность на разрыв — не менее 3 ГПа;
- поверхностная плотность 500–600 г/м².

- Разработан состав матрицы на минеральной основе, который после отверждения должен удовлетворять следующим физико-механическим характеристикам: прочность на сжатие — не менее 40 МПа; прочность на изгиб — не менее 7 МПа; прочность на растяжение — не менее 4 МПа; адгезия к бетону — не менее 3 МПа.

- Фрагменты обделки с композитной сеткой, уложенной в матрицу на минеральной основе, разрушаются с постепенным увеличением деформации. Продергивание волокон в прядях сетки в процессе разрушения фрагментов обделки не отмечено. Такой тип разрушения свидетельствует о более высоком уровне безопасности обделки с армированием композитной сеткой, что особенно важно при эксплуатации подземных сооружений.

- Средний коэффициент усиления от использования одного слоя специально обработанной композитной сетки, уложенной в матрицу на минеральной основе, в испытанных фрагментах диаметром 2200 мм составил 3,79.

- Фрагменты обделки с композитной сеткой, уложенной в матрицу на минеральной основе, в случае недоведения их до полного разрушения в процессе первоначальных испытаний при повторном нагружении показывают высокие результаты максимальной нагрузки — до 93% от первоначальной, что свидетельствует о большом запасе прочности представленного типа усиления железобетонной обделки при динамических нагрузках.

Использование высокопрочных сеток в качестве арматуры в подземном строительстве, особенно в сложных геологических условиях, а также в конструкциях, вскрытие которых невозможно с поверхности, является весьма перспективным. Для сокращения времени и затрат при выполнении ремонтных работ с использованием высокопрочных сеток следует провести дополнительные лабораторные и натурные исследования.

Литература

1. Внешнее армирование железобетонных конструкций композиционными материалами / А. А. Шилин [и др.]. — М.: Стройиздат, 2007.
2. ГОСТ 25.601–80. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытания плоских образцов на растяжение при нормальной, повышенной и пониженной температурах.
3. СНиП 32–02–2003. Метрополитены.

Для связи с авторами:

Дмитрий Валерьевич Картузов, 8–916–933–01–03, kartuzov@tridaholding.ru