

Применение инъекционных технологий при защите тоннелей со сборной железобетонной обделкой

В настоящее время широкое распространение нашла технология проходки тоннелей с помощью тоннелепроходческих комплексов (ТПМК) с использованием сборных железобетонных обделок (рис. 1), отвечающих высоким требованиям в отношении несущей способности и герметичности при высоких нагрузках, вызванных строительными работами, давлением грунта и напором воды в процессе эксплуатации. Инъекционные процессы могут являться составной частью проходки тоннеля, а также последующей герметизации многочисленных стыков тоннельной обделки.

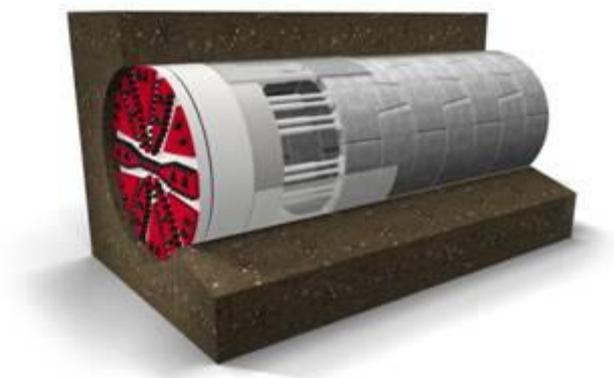


Рис. 1. ТПМК со сборной железобетонной обделкой

Сборная железобетонная обделка состоит из формирующих тоннельное кольцо отдельных высокоточных блоков с уплотнительными профилями. В зависимости от их конструкции различают плоские и соединительные стыки, выполненные в виде соединения шип-паз или шпоночного соединения, которые позволяют равномерно передавать нагрузки в стыках (рис. 2).

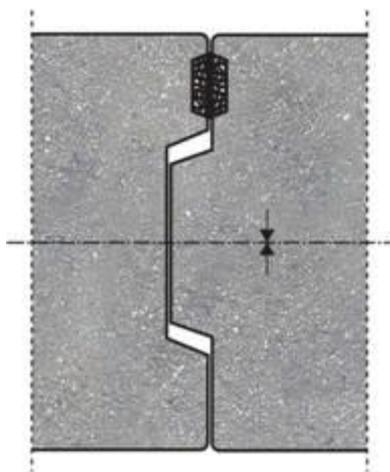


Рис. 2. Конструкция стыка железобетонной обделки из высокоточных блоков

В процессе щитовой проходки в силу технологических причин и внешних воздействий могут происходить деформации колец тоннельной обделки, в результате чего нарушается герметичность стыков и уплотнений. Это, в свою очередь, приводит к обводнению стыков и

нарушению водонепроницаемости отделки (рис. 3). Поэтому возникает необходимость в применении технологии инъектирования. С ее помощью заполняются также трещины в блоках.

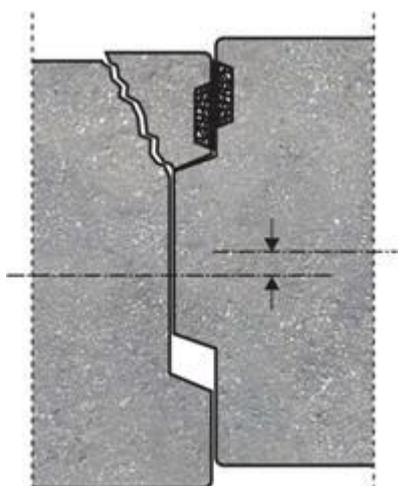


Рис. 3. Нарушения герметичности стыка

Системы герметизации конструкций полиуретановыми смолами

Системы герметизации неплотных стыков, трещин должны отвечать требованиям по восприятию деформаций в поврежденной зоне. Для герметизации бетонных конструкций эластичными материалами наиболее успешно применяются инъекционные смолы на полиуретановой основе. Полиуретаны получают в результате реакции соединения многоатомных спиртов и изоцианатов. Наличие влаги в стыках приводит к побочной реакции, которая сопровождается выделением двуокси углерода и образованием воздушных пор в матрице смолы. Получается эластичное заполнение стыков с закрыто-пористой структурой. Скорость реакции можно регулировать применением катализаторов. Различают две основные группы продуктов – полиуретановые эластомерные смолы (PUR) и полиуретановые пены (SPUR).

Эластомерные смолы на полиуретановой основе позволяют герметизировать стыки и трещины на длительный срок независимо от их влажного состояния. Долговечность (по долговременным наблюдениям и лабораторным исследованиям – не менее 100 лет) обеспечивается эластичными инъекционными смолами низкой вязкости, образующими поры и не содержащими растворителей.

Качество заполнения зависит от исходной вязкости смолы. С помощью низковязких эластичных смол (менее 100 мПа•с) можно заделать трещины величиной раскрытия от 0,1 мм. Для обеспечения их наибольшего проникновения рекомендуется использовать инъекционное оборудование, позволяющее подавать компоненты смолы отдельно (двухкомпонентное нагнетание) и осуществлять их смешение на входе в трещину или стык конструкции.

При значительных водопитоках для временной герметизации применяются пены SPUR, которые в очень короткое время (несколько десятков секунд) образуют после контакта с водой тонко-ячеистую, открыто-пористую пену с большим увеличением ее в объеме. Инъекцию следует проводить с интервалами, контролируя действие вспененной смолы. При правильном использовании, выход пены на поверхность виден только в отдельных местах. Далее, после остановки притока воды выполняется основное нагнетание эластомерных смол для обеспечения длительной и эффективной герметизации сооружения (рис. 4).



Рис. 4: Частичный выход пены из стыков тубингов

Состояние тоннельной конструкции оценивается как сухое, влажное и обводненное. Внешний вид поверхности обделки в большинстве случаев является достаточным для определения степени обводнения конструкции. В исключительных случаях может потребоваться выбуривание кернов из бетона блоков обделки.

Эластомерные смолы для герметизации водопроницаемых конструкций должны отвечать следующим требованиям:

- вязкость $< 100 \text{ мПа}\cdot\text{с}$;
- время жизни > 20 мин при однокомпонентной схеме нагнетания;
- беспрепятственное твердение при контакте с водой во время инъектирования;
- высокая эластичность при эксплуатационных температурах, деформация растяжения $> 100\%$;
- отсутствие охрупчивания при реакции с водой;
- отработанная система инъекции в комбинации с эластомерной пеной при сильном водопитоке;
- отработанная технология инъекции (инъекционная смола, пакера, система смешивания, насос);
- экологическая безопасность инъекционных смол для грунтовых вод и, соответственно, для питьевой воды.

Всем перечисленным требованиям отвечают полиуретановые инъекционные смолы.

При строительстве и ремонте тоннелей эластомерные смолы заняли свое достойное место. Эффективность их доказана как для инъектирования трещин, так и для заполнения стыков с незначительной величиной раскрытия. Необходимо обращать внимание на деформацию растяжения эластичных смол в случаях неблагоприятных условий деформации конструкций (табл.). Эластомерные смолы заполняют все пространство стыков, что влечет за собой растяжение по большой площади при относительно незначительном поперечном сечении трещины или стыка. При этих условиях, деформации эластомерных смол ограничиваются характерными для

данного продукта границами. Во многих случаях хорошей альтернативой эластомерным смолам оказались гидроструктурные смолы.

Гидроструктурные смолы для последующей герметизации

Многолетняя строительная практика подтверждает технически и экономически успешное применение гидроструктурных смол для герметизации сооружений. В международном опыте они часто даже предпочтительней эластомерных полиуретановых смол. Для инжектирования гидроструктурных смол принципиально может приниматься минимальная ширина раскрытия трещин менее 0,1 мм. Гидроструктурные смолы на акрилатной основе имеют очень низкую (соизмеримую с водой) вязкость – примерно 5–30 мПа•с. Распространение материала ограничивается скоростью реакции компонентов системы. Гидроструктурные смолы на акрилатной основе (АУ) образуются путем полимеризации смеси акрилатных мономеров и раствора инициатора с образованием мягкого и эластичного геля. Концентрация смолы определяет скорость реакции и глубину распространения раствора. Быстрая и хорошо управляемая реакция полимеризации, высокая эластичность и ограниченный прирост объема при контакте с водой – это сильные стороны гидроструктурных смол. Продукты с выраженной гидроструктурой, которые содержат большей частью физически связанную воду, реагируют на изменение влажности окружающей среды. Вызванный водой первоначальный процесс набухания материала может сменяться в воздушной сухой среде процессом усадки. Поэтому для постоянства объема должна обеспечиваться постоянно влажная среда с водородным показателем (рН) от нейтральной до ограничено щелочной. После окончания реакции гидроструктурные смолы водонепроницаемы. В табл. приведены для сравнения основные свойства эластомерных и гидроструктурных смол.

Таблица: Сравнение инъекционных систем

Стадия	Критерий	Инъекционные продукты и их область применения	
		Эластомерные смолы	Гидроструктурные смолы
Оценка состояния	Материал	бетон, ж/бетон, преднапряженный ж/бетон	бетон, фазербетон, ж/бетон (ограниченно)
	Конструкция	Трещины/ пустоты/ швы	Швы, грунт в области контакта с конструкцией
	Причина	Известна	Известна
	Повторное заполнение	Возможно	Возможно
	Механическое воздействие	Допускается ограниченное изменение ширины трещин и швов	Допускается ограниченное изменение ширины трещин и швов
	Влажное состояние	сухие, влажные, водонесущие без давления/	влажные, водонесущие без давления/ под давлением

		под давлением	
	Минимальная ширина раскрытия трещины	? 0,1 мм	< 0,1 мм
Выбор системы	Изменение ширины раскрытия трещины	< 0,3 мм: ?w ? 0 % 0,3 - 0,5 мм: ?w ? 5 % >0,5 мм 1): ?w ? 10 %	са. 15 %
	Инъекционная система	1К-инъекционная система через распорный пакер	2К-инъекционная система через распорный пакер
	Цель	Герметизация с ограниченной деформационной способностью	Герметизация с высокими деформационной способностью
	Минимальная температура применения	6 °C ²⁾	1°C ²⁾
	Постоянство объема	Длительное	Длительное, зависит от окружающих условий
Применение	Время реакции	Часы	Минуты

1) приведено к 1 мм

2) зависит от продукта

При наличии одностороннего контакта строительной конструкции с водой и высокого ее напора используются гидроструктурные смолы, усиленные полимером. Использование его дисперсии в качестве независимого связующего позволяет получить материал с улучшенными механическими качествами и более высокой плотностью.

Короткое время реакции гидроструктурных смол определяет повышенные требования к оборудованию и высокой квалификации персонала. Применение двухкомпонентного насоса (рис. 5) является одним из условий для использования описанных преимуществ.



Рис. 5. Двухкомпонентная инъекционная система нагнетания гидроструктурных смол

Гидроструктурные смолы для герметизации водопроницаемых конструкций должны отвечать следующим требованиям:

- вязкость < 60 мПа•с;
- время жизни от 10 с до 15 мин при двухкомпонентной схеме нагнетания;
- высокая эластичность в области эксплуатационных температур, деформируемость > 300 % без набухания;
- отверждение смолы в водной среде;
- степень разбухания 30–50 %;
- экологическая безопасность для грунтовых вод и, соответственно, для питьевой воды.

В качестве примера гидроструктурных смол, успешно используемых при строительстве тоннелей, можно привести материал MC-Injekt GL 95 с вязкостью около 5 мПа•с, и полимермодифицированную гидроструктурную смолу MC-Injekt GL 95TX с вязкостью около 30 мПа•с.

Практическое применение систем герметизации

При классической инъекции стыки и трещины должны пересекаться шпурами так, чтобы можно было нагнетать инъекционную смолу через пакеры в негерметичные области с минимальным нарушением армокаркаса блока. На рис. 6 показана принципиальная схема расположения пакеров с пересечением шпуров в середине трещины.



Рис. 6. Схема расположения пакеров

Задача герметизации стыков и трещин, вызванных сдвигом тоннельных колец и блоков, является особо сложной. С наружной стороны такие трещины не всегда могут быть четко идентифицированы. Причиной проникновения воды может стать как трещина в конструкции, так и отказ установленного уплотнительного профиля (рис. 7).



Рис. 7. Водопроявления в тоннеле

Для герметизации неплотных стыков по описанному выше принципу обычно выполняются глубокие шпуры под соответствующим углом через блок с риском натолкнуться на арматуру, что требует больших трудовых и финансовых затрат.

Для большей эффективности шпуры располагаются параллельно стыку. В этом случае шпур бурится до наружной стороны кольца. Нагнетаемый материал распределяется в направлении наименьшего гидравлического сопротивления и достигает, таким образом, негерметичного стыка. Несмотря на более высокий расход инъекционного материала, этот вариант имеет примерно на 40 % короче глубину бурения и гораздо более низкую вероятность натолкнуться на арматуру. Интересный опыт был получен при строительстве 4-го тоннеля под Эльбой. Его конструкция из железобетонных тьюбингов толщиной 70 см создавала благоприятные условия для инъектирования продольных и кольцевых стыков. Герметизация стыков конструктивных элементов такой толщины достигалась установкой двукратного уплотнения (рис. 8).

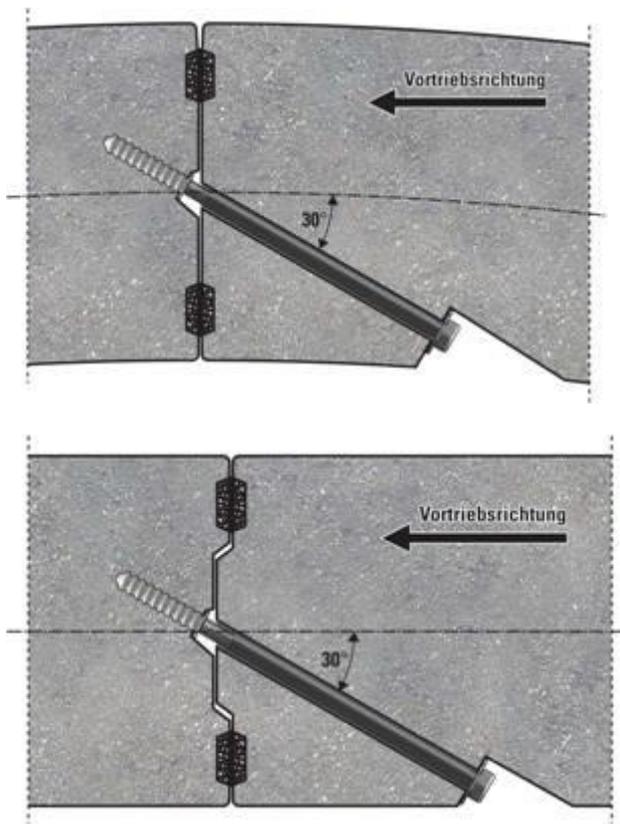


Рис. 8. Продольные и кольцевые стыки в тоннеле под Эльбой

Доступ в пространство, образованное уплотнительными профилями, обеспечивался через крепежные отверстия без дополнительного разбуривания обделки. На рис. 9 показан процесс инъекции, при котором вода вытеснялась из стыка и заполнялась эластомерной смолой MC-Injekt 2300 NV. Для ограничения произвольного распространения инъекционной смолы в незамкнутые соседние стыки применялся катализатор MC-KAT 23.



Рис. 9. Инъекция через монтажные отверстия

Опыт реализации различных тоннельных проектов привел к идее предварительного устройства в блоках инъекционной системы для последующей инъекционной герметизации стыков. Для этого, чтобы в случае необходимости достичь герметизации локальных водопроявлений, при изготовлении в железобетонные блоки встраивалась система инъекционных шлангов, которая

обеспечивала заполнение кольцевых и продольных швов между наружной уплотнительной лентой и уплотняющим профилем. Выходное отверстие шлангов расположено в торце стыка блока. Данная система для последующей герметизации была запатентована и использована при строительстве тоннеля Катценберг (Германия), (рис. 10–12).

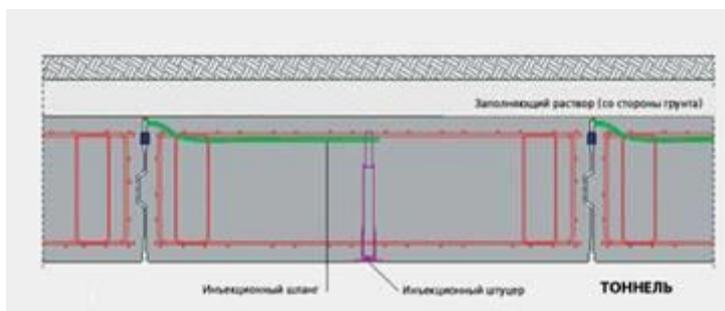


Рис. 10. Схема расположения инъекционной системы в железобетонных блоках обделки

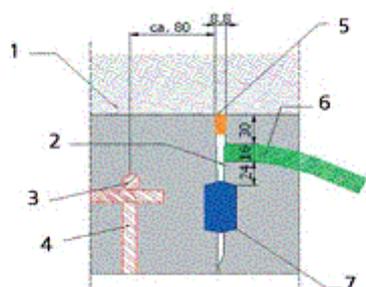


Рис. 11. Конструкция стыка блока с вмонтированными инъекционными шлангами:

- 1 — заполняющий раствор (со стороны грунта);
- 2 — инжецируемый шов между уплотнительной лентой и уплотнительным профилем;
- 3 — наружная несущая арматура;
- 4 — поперечный хомут;
- 5 — наружная уплотнительная лента 20×14 мм;
- 6 — инъекционный шланг длиной около 1,4 м закрепленный на хомутах;
- 7 — уплотнительный профиль



Рис. 12. Предварительно смонтированная инъекционная система в армокаркасе блока

Доступ к инъекционным шлангам обеспечивается через инъекционные штуцеры путем разбуривания над ними защитного слоя бетона незначительной глубины. Инъекционный пакер монтируется в штуцере. Нагнетание через него происходит до выхода смолы из соседнего пакера, и после этого переходят к следующему. Инъекционная система может применяться многократно, если она промывается после использования.

Для инжецирования были опробованы гидроструктурные смолы на акрилатной (АУ) и эластомерные смолы на полиуретановой основе (PUR). Результатами испытаний и длительных наблюдений за качеством герметизации установлено, что усиленные полимерами гидроструктурные смолы показали лучший результат. В то время как стыки, заполненные эластомерными смолами, имели отдельные протечки и требовали последующего повторного инжецирования, герметизация гидроструктурной смолой обеспечила достаточную плотность стыка.

К инъекционному материалу предъявлялись следующие требования:

- способность к инжецированию против напорной воды;
- однородная, непроницаемая для напорной воды структура материала;
- достаточная адгезия на влажных основаниях (бетон, термопластические и эластичные материалы);
- хорошие проникающие и пенетрирующие свойства (низкая вязкость);
- совместимость со смежными строительными продуктами;
- контролируемое распространение (управляемая скорость реакции);
- безопасность для питьевой воды и грунтовых вод.

Выводы

Тоннели со сборной железобетонной обделкой – это экономически выгодный и технически эффективный вид строительства. Их проходка обеспечивается применением современных проходческих комплексов ТПМК. Однако при этом неизбежны частичные дефекты в конструкции, которые могут устраняться инъекционными системами последующей герметизации.

Современные инъекционные системы позволяют наиболее эффективно заполнять трещины эластомерными смолами, а также уплотнять стыки гидроструктурными смолами.

Водонепроницаемость конструкции достигается заполнением всех возможных мест водопроявлений, например, в контакте уплотнительного профиля и бетона, через дефекты в уплотнительных профилях, через трещины, швы и др.

Приведенные примеры подтверждают непрерывное развитие систем уплотнения стыков, которые в настоящее время могут закладываться превентивно. Эффективность инъекционной герметизации, наряду с выбором конкретного инъекционного материала с оптимальными характеристиками, зависит от применяемой технологии и технологических параметров инъекции, соблюдения последовательности работ и контроля качества, а также профессиональной компетенции исполнительного персонала.