

Обоснование параметров технологии двухкомпонентного тампонажа заобделочного пространства при щитовой проходке

А.М. Викулин, инж., ЗАО «Триада-Холдинг», асп., МГТУ, Москва

Аннотация

В статье анализируются проблемы тампонажа заобделочного пространства при щитовой проходке. На основании проведенных лабораторных исследований, подтвержденных практическим внедрением, разработан подход для преобразования физико-технологических свойств двухкомпонентного тампонажного раствора, который позволяет адаптировать тампонаж под скорость проходки и геологические условия по трассе тоннеля в процессе реального времени.

Ключевые слова

Двухкомпонентный раствор, заобделочное пространство, тампонаж, тоннелепроходческий комплекс, строительство тоннелей.

Abstract

Problems of grouting behind the lining in TBM-driven tunnels are analyzed. Based on lab experiments backed up by practical application the author developed an approach to modify physical and technical parameters of two-component grouting slurry to be able to adjust it with regard to actual tunneling rate and geological conditions along the tunnel route.

Keyword

Two-component slurry, grouting, TBM (tunnel-boring machine), gap behind the lining, tunneling.

Основным способом строительства тоннелей в районах с плотной застройкой, а также на охраняемых природных и исторических территориях становится закрытый способ с применением тоннелепроходческих механизированных комплексов (ТПМК) и обделкой из сборных железобетонных элементов.

Одной из особенностей строительства тоннелей щитовым способом является монтаж обделки сооружения под защитой оболочки ТПМК. При этом между наружной поверхностью сборной обделки и окружающим ее породным массивом остается так называемый технологический зазор шириной 60–370 мм, который по мере проходки должен в кратчайший срок заполняться тампонажным раствором.

Нагнетание тампонажного раствора ведется через специальные технологические отверстия в блоках тоннельной обделки либо через юбку щита. Нагнетаемый за обделку тампонажный раствор выполняет ряд важных функций [1]:

- удержание колец обделки в проектном положении;
- предотвращение осадок вышележащего грунтового массива;

- обеспечение равномерного контакта обделки тоннеля с грунтовым массивом;
- восприятие нагрузок от технологических платформ, расположенных за юбкой щита.

В зависимости от типа тоннелепроходческого комплекса, гидрогеологических условий, предполагаемых скоростей проходки и ряда других условий в практике отечественного и зарубежного тоннелестроения применяются различные виды тампонажных систем.

Применяемые в настоящее время тампонажные системы по количеству входящих в них компонентов можно разделить на две группы:

- а) однокомпонентные;
- б) двухкомпонентные.

Выбор тампонажной системы осуществляют в зависимости от гидрогеологических условий и принятой технологии нагнетания раствора за обделку тоннеля.

Несомненным достоинством однокомпонентных тампонажных систем является их относительная простота. Однако серьезный недостаток заключается в возможности образования пустот за обделкой тоннеля вследствие вымывания грунтовыми водами закачанного за обделку раствора, т. к. регулирование сроков схватывания в данной системе не предусмотрено. Отсутствие возможности регулировать сроки схватывания в широком временном интервале зачастую приводит к выходу из строя тампонажного оборудования во время длительных остановок ТПМК.

Ввиду вышеперечисленных недостатков использования однокомпонентной системы тампонажа в настоящее время в мире разрабатывается и внедряется двухкомпонентная система. Принцип действия системы приведен в статье «Двухкомпонентная система тампонажа с регулируемыми сроками схватывания и кондиционирования грунтов при строительстве наклонного хода станции метро „Марьяна роща“ («Транспортное строительство», 2012, № 4). Данная система предусматривает приготовление компонентов «А» и «Б» тампонажного раствора на поверхности и отдельную их подачу к месту нагнетания по трубопроводам [2].

При смешивании компонентов «А» и «Б» через 5–10 секунд образуется гелеобразный состав, который на протяжении последующих 10–25 минут сохраняет свои пластические свойства, благодаря чему заполняет все пустоты за обделкой. Образовавшийся гель не вымывается даже

активным водопритокан; время начала его схватывания может задаваться исходя из потребностей конкретного проекта [3].

Через 30 минут после смешивания компонентов «А» и «Б» образовавшийся гель теряет пластические свойства и начинает быстро набирать прочность (0,1 МПа через 1 ч после смешивания, см. табл. 1) [1].

Таблица 1. Типовой состав двухкомпонентного тампонажного раствора, выпускаемого ведущими зарубежными производителями (для получения 1 м³ тампонажного камня) [1, 2, 3, 4]

	Название компонента	Ед. изм.	Количество
Компонент «А»	Цемент	кг	300–350
	Бентонит	кг	25–45
	Вода	л	750–850
Компонент «Б»	Стабилизатор	л	3–6
	Ускоритель схватывания	л	75–100

Из изложенного можно выделить следующие достоинства двухкомпонентной тампонажной системы:

- 1) Контроль за технологическими параметрами позволяет успешно использовать данную систему в гидрогеологических условиях любой сложности, не допустить осадок дневной поверхности, а также предотвратить перерасход тампонажного раствора в зонах повышенной трещиноватости за счет регулирования сроков его схватывания.
- 2) Значительно упрощаются работы по доставке компонентов тампонажного раствора к месту нагнетания по трубопроводу.
- 3) Использование данной системы позволяет значительно снизить частоту промывки оборудования, а также позволяет экономить тампонажный раствор во время длительных остановок щита за счет комплексного регулирования технологических свойств раствора.

Серьезный недостаток двухкомпонентной системы заключается в следующем: при малых скоростях проходки, а также при строительстве наклонных тоннелей может происходить закупорка инъекционных отверстий, смесителей и форсунок тампонажным раствором в результате малых сроков гелеобразования (5–10 секунд). В этом случае невозможно осуществлять дальнейший тампонаж заобделочного пространства, а значит, и вести проходку. Процесс прочистки тампонажного оборудования длительный (несколько часов) и трудоемкий, что значительно снижает общую скорость проходки тоннеля. Таким образом, решение проблемы ранних сроков гелеобразования весьма востребованно.

Для решения проблемы выхода из строя тампонажного оборудования и обеспечения непрерывной проходки тоннеля автором была подобрана комплексная добавка, позволяющая регулировать сроки гелеобразования двухкомпонентной тампонажной системы

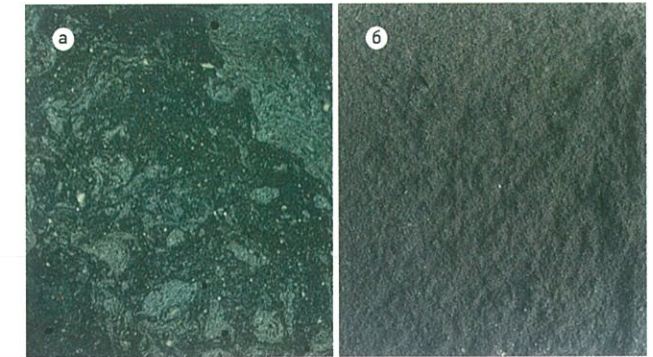


Рис. 1. Влияние добавки на качество перемешивания компонентов «А» и «Б» и однородность тампонажного камня: а) без добавки; б) с добавкой

и повышающая однородность и конечную прочность тампонажного камня за счет обеспечения лучшего перемешивания компонентов «А» и «Б» тампонажного раствора (рис. 1).

Лабораторные испытания по подбору необходимого количества добавки проводились на тампонажном растворе «Рекс-Тампонаж[®]», разработанном ЗАО «Триада-Холдинг». Данный раствор использовался для заполнения заобделочного пространства при строительстве второго эскалаторного тоннеля станции метро «Марьяна роща» Московского метрополитена и обеспечил возможность завершения проходки в кратчайшие сроки. Состав раствора представлен в табл. 2. В качестве ускорителя схватывания применялся модифицированный раствор силиката натрия.

Таблица 2. Состав сухой тампонажной смеси «Рекс-Тампонаж[®]»

Наименование компонента	Количество, %
Цемент	30
Зола-унос	65
Бентонит	4
Стабилизирующие и пластифицирующие добавки	1

В России на данный момент отсутствуют нормативные документы, регламентирующие требования к двухкомпонентным тампонажным системам, поэтому при проведении исследований автор использовал опыт и терминологию, почерпнутые из зарубежных источников [1, 2, 4, 5]. Для определения технологических параметров тампонажного раствора, гелеобразного материала и тампонажного камня был проведен ряд испытаний в лабораторных условиях. Методы проведения многих испытаний не стандартизированы, являются эмпирическими, однако дают наиболее реальное представление об упомянутых физических процессах, происходящих в заобделочном пространстве во время нагнетания двухкомпонентного раствора.

В ходе научно-исследовательской работы определялись следующие технологические параметры: 1) время

гелеобразования; 2) время потери пластичности гелеобразного материала; 3) прочность на сжатие.

Под гелеобразованием понимается время от начала смешивания компонентов «А» и «Б» до момента, когда образовавшийся в результате раствор теряет подвижность, превращаясь в гель. Данная величина определялась визуально. При этом время гелеобразования определялось в зависимости как от количества компонента «Б», так и от количества добавки.

В ходе исследований было установлено, что при увеличении количества компонента «Б» время гелеобразования изменяется незначительно (рис. 2). Для увеличения времени гелеобразования до одной минуты необходимо соотношение компонентов «А» к «Б» 2,5:1, что является экономически неоправданным. В отечественной и зарубежной практике тоннелестроения тампонажный раствор и ускоритель схватывания обычно смешиваются в соотношении по объему 10:1; в некоторых случаях 20:1 и 9:1.



Рис. 2. Зависимость времени гелеобразования от количества компонента «Б»

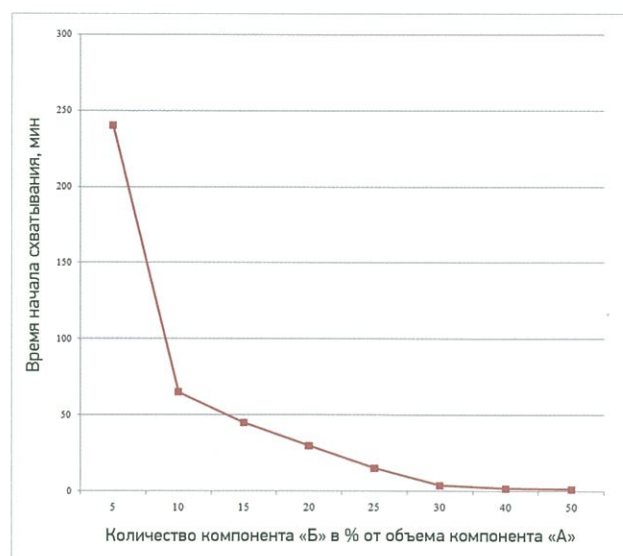


Рис. 3. Влияние количества ускорителя схватывания на сроки начала схватывания (0,1 МПа) тампонажного раствора

Дальнейшее увеличение количества ускорителя ведет к сокращению сроков начала схватывания, т.е. образовавшийся в результате перемешивания компонентов гель практически сразу начинает набирать прочность (рис. 3), что создает опасность выхода из строя тампонажного оборудования. С другой стороны, уменьшение количества ускорителя (20:1, 30:1) влечет за собой уменьшение времени гелеобразования, отодвигая при этом время начала схватывания в несколько раз: для достижения на первые сутки такой же прочности, как при смешивании в пропорции 10:1, требуется значительно увеличить расход цемента [3].

Прочность тампонажного камня также сильно зависит от количества ускорителя схватывания. При прочих равных условиях растворы с содержанием компонента «Б» менее 5 % и более 40 % не набирают прочности в первые сутки из-за нехватки ускорителя схватывания или цемента соответственно (рис. 4).



Рис. 4. Прочность образцов тампонажного камня в первые сутки в зависимости от количества компонента «Б»

В результате исследований установлено, что применение добавки позволяет значительно увеличить сроки гелеобразования, тем самым снижая многократно риск выхода из строя тампонажного оборудования. При этом оптимальная концентрация достигается при введении 3–4 % добавки в состав сухой тампонажной смеси. В этом случае сроки начала схватывания увеличиваются до 2–2,5 часов, а время гелеобразования — в 3–6 раз по сравнению с контрольными образцами. Дальнейшее увеличение количества добавки приводит к значительному (в четыре и более раз) увеличению сроков схватывания, поэтому применение подобных составов целесообразно только при малых скоростях проходки (1–3 мм/мин).

В ходе исследований также было установлено, что время начала схватывания совпадает со временем набора тампонажным раствором прочности 0,1 МПа.

Под временем потери пластичности понимается время от начала гелеобразования при смешивании компонентов «А» и «Б» до набора гелеобразным материалом прочности 0,1 МПа. В дальнейшем гелеобразный

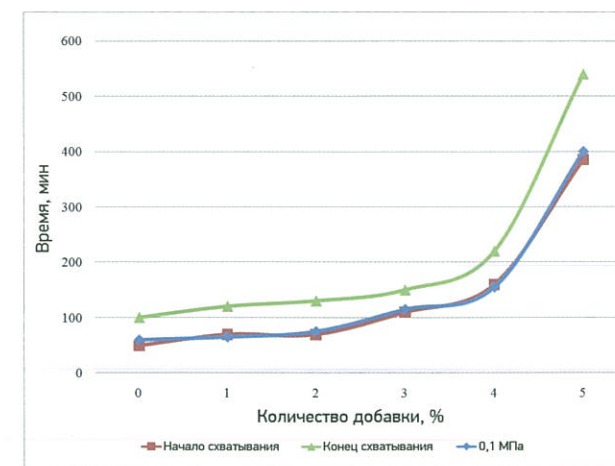


Рис. 5. Динамика набора прочности тампонажного камня в зависимости от количества добавки

материал теряет пластические свойства, преобразуясь в тампонажный камень с последующим интенсивным набором прочности (0,3 МПа через 2 часа; 0,4 МПа через 3 часа). Ввиду трудностей, связанных с определением прочности на сжатие гелеобразного материала, а также отсутствием стандартизированной методики определения прочности, автор использовал нестандартный способ, который в то же время дает реальное представление о ранней стадии набора прочности тампонажным камнем.

Для определения времени потери пластичности автором модифицирован прибор Вика: на шток был помещен дополнительный груз определенной массы, подобранной таким образом, чтобы пестик прибора Вика оказывал на тампонажный раствор давление, равное 1 кгс/см². Считалось, что прочность материала на сжатие составляет 0,1 МПа, когда пестик в течение 10 секунд не деформирует поверхность образца.

Говоря о прочности тампонажного камня на сжатие (рис. 5), необходимо учитывать, что это часто далеко не самый главный критерий качественного тампонажа заобделочного пространства. Прочности в 1,5 МПа зачастую вполне достаточно для восприятия всех нагрузок, действующих на сооружение [5]. При этом важно, чтобы раствор набирал эту прочность как можно быстрее (в первые сутки). Дальнейший набор прочности не представляет практического интереса, т. к. восприятие нагрузки со стороны породного массива возлагается на конструкцию тоннельной обделки, а задача тампонажного раствора в долгосрочной перспективе — равномерная передача на нее этих нагрузок [1,5].

Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы

1. Основополагающими технологическими параметрами тампонажа заобделочного пространства при

применении двухкомпонентной системы являются: учет времени гелеобразования и времени потери пластичности гелеобразного состава, а также время набора начальной прочности.

2. Для обеспечения высоких скоростей проходки и безотказной работы оборудования технологические параметры должны учитываться заранее, исходя из максимальной продолжительности остановок щита, максимальных и минимальных скоростей проходки, а также гидрогеологических условий по трассе тоннеля.
3. Оптимизация физико-технологических параметров двухкомпонентного тампонажного раствора за счет применения комплексной добавки, подобранной в результате проведенных исследований, позволяет в разы снизить риски, связанные с необходимостью ремонта тампонажного оборудования ТПМК.
4. Эффективность оптимизированных физико-технологических параметров двухкомпонентного тампонажного раствора была подтверждена в ходе проходки второго эскалаторного тоннеля станции метро «Марьино» Московского метрополитена, что позволило сократить время обслуживания тампонажного оборудования более чем в 4 раза и до 40 % снизить затраты на вынужденную утилизацию тампонажа при технических простоях щита.
5. Анализ применения двухкомпонентных тампонажных систем при использовании современных ТПМК на ряде российских объектов позволяет утверждать, что необходимо разрабатывать новые нормативные документы, регламентирующие требования к их использованию.

Литература

1. Shirlaw J. N., Richards D. P., Ramond P., Longchamp P. // *Recent Experience in Automatic Tail Void Grouting with Soft Ground Tunnel Boring Machines*. Proc. ITA 2004, Singapore.
2. Hashimoto T., Brinkman J., Kondo T., Kano Y., Feddema A. *Simultaneous Backfill Grouting, Pressure Development in Construction Phase and in the Long-Term // Tunneling: A Decade of Progress, GeoDelft 1995–2005* (eds. A. Bezuijen, H. van Lottum), Taylor & Francis, London, 2006, p. 101–107.
3. Немков С. А., Загоршменный А. И., Викулин А. М. *Технико-экономическое обоснование рецептуры двухкомпонентного тампонажного раствора в зависимости от необходимых сроков его схватывания за обделкой тоннеля // Промышленное и гражданское строительство*. — 2011. — № 5. — С. 59–61.
4. Pellegrini L., Peruzza P. Sao Paulo. *Metro Project — Control of Settlements in Variable Soil Conditions Through EPB Pressure and Bicomponent Backfill Grout // Rapid Excavation and Tunneling Conference Proceedings*. Englewood, Colorado: Society for Mining, Metallurgy and Exploration (SME), 14–17 June, 2009. p. 1137–1153.
5. Peila D., Borio L., Pelizza S. *The Behaviour of a Two-Component Backfilling Grout Used in a Tunnel-Boring Machine // ACTA Geotechnica Slovenica*, 2011/1, p. 5–15.

Для связи с автором:

Андрей Михайлович Викулин, 8-906-715-49-96, vikulin@triadaholding.ru