

УДК 624.042.12

Выдавливание замкового блока при строительстве транспортных тоннелей большого диаметра

В. Д. Константинов, А. Л. Новиков, А. А. Сокорнов

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Константинов В. Д., Новиков А. Л., Сокорнов А. А. Выдавливание замкового блока при строительстве транспортных тоннелей большого диаметра // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 3. С. 609–621. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-03-609-621

Аннотация

Цель: рассмотреть проблему выдавливания замкового блока, возникающую при строительстве тоннелей метрополитена в Санкт-Петербурге с использованием сборных высокоточных железобетонных обделок повышенной водонепроницаемости диаметром 10,3 м. Проанализировать возможные процессы, приводящие к этому явлению, и методы решения проблемы в условиях строительства. Определить, к каким последствиям приводят применяемые на данный момент варианты решения проблемы. Разработать аналитическую методику определения величины силы трения, действующей по плоскостям радиальных стыков контактирующих блоков на базе классических методов строительной механики. Провести математическое моделирование процесса выдавливания методом конечных элементов и сравнить его результаты с полученными аналитически. Разработать рекомендации по ликвидации выдавливания блока, которые можно как применить в условиях строительства, так и учесть при проектировании конструкций обделок. Проанализировать эффективность предлагаемых рекомендаций. **Методы:** использовались натурные данные с построенных объектов, аналитические расчеты и математическое моделирование методом конечных элементов. **Результаты:** предложена аналитическая методика определения величины усилия выталкивания замкового блока и силы трения в радиальных стыках смежных и замкового блоков. Результаты математического моделирования показали высокую сходимость результатов, получаемых двумя методами. Разработаны рекомендации по устранению явления выдавливания, оценена их эффективность. **Практическая значимость:** результаты исследования могут быть использованы на этапе проектирования конструкций сборных железобетонных обделок повышенной водонепроницаемости для тоннелей большого диаметра, а также в условиях строительства в момент монтажа замкового и смежных блоков.

Ключевые слова: сборная высокоточная железобетонная обделка повышенной водонепроницаемости, замковый блок, тоннелепроходческие механизированные комплексы, тоннели большого диаметра, математическое моделирование, сила трения

Введение

При проектировании новых линий метрополитена на мелком заложении особенно перспективными являются решения, основанные на применении двухпутных тоннелей большого диаметра (более 10 м). Строительство подобных объектов сопряжено с рядом сложностей [1, 2].

Рассмотрим проблему, возникающую при монтаже колец обделки двухпутных перегонных тоннелей метрополитена в Санкт-Петербурге.

При проходке этих тоннелей наблюдается явление выдавливания замкового блока

из кольца в сторону щита на величину более 10 мм (рис. 1). Данный процесс влечет за собой ряд последствий, оказывающих негативное воздействие как на ведение строительно-монтажных работ, так и на дальнейшую эксплуатацию тоннеля.

Анализ причин возникновения проблемы

Важными этапами в поиске решения данной проблемы являются определение и анализ причин ее возникновения. Рассмотрим, какие в данной обделке предусмотрены типы связей (рис. 2):

– связи типа «гребень-паз» в кольцевых стыках, препятствующие смещению колец

относительно друг друга, представляют собой радиально расставленные с равным шагом трапецевидные выступы и углубления на торцевых поверхностях колец;

– цилиндрические шпонки из полихлорвинила, устанавливающиеся в радиальных стыках и препятствующие появлению клавишного эффекта, то есть они не дают блокам смещаться относительно друг друга внутри кольца в радиальном направлении;

– для предотвращения раскрытия стыков и удержания герметизирующих уплотнителей в упруго-сжатом состоянии используются связи растяжения в виде прямолинейных нарезных шпилек.

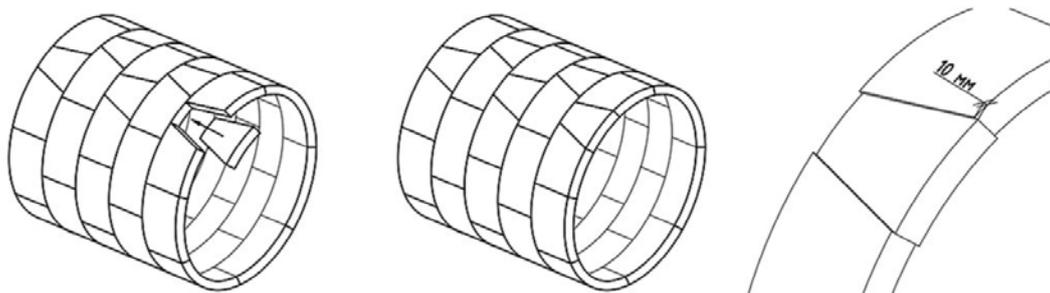


Рис. 1. Схема выдавливания замкового блока после окончания сборки кольца обделки

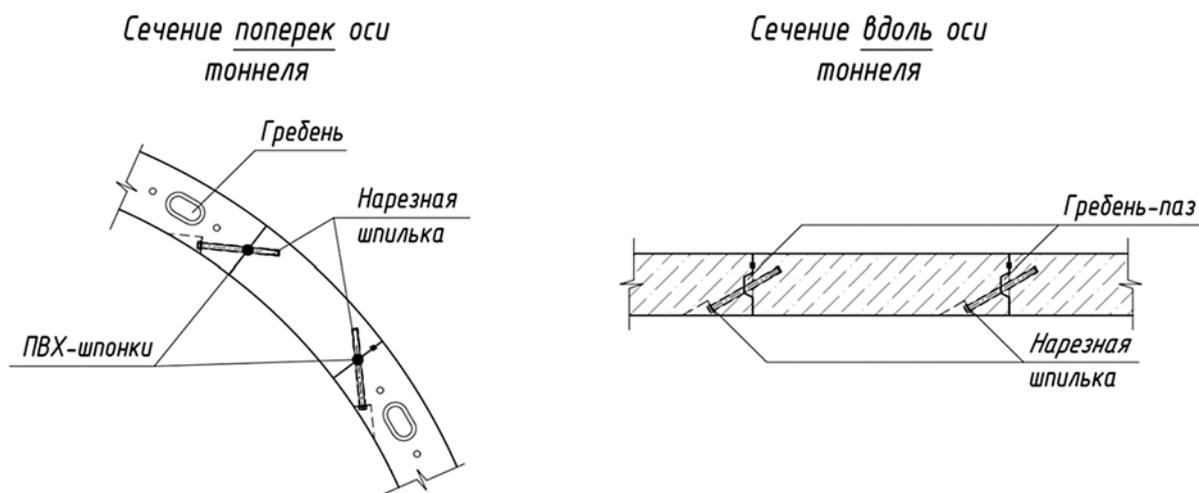


Рис. 2. Схемы расположения связей в стыках обделки

Учитывая это, можно заключить, что в конструкции обделки не предусматриваются связи, препятствующие движению замкового блока в продольном направлении.

Во время проходки при монтаже колец проблема выталкивания замкового блока решается различными способами.

Способ 1. Установка в радиальный стык арматурных стержней большого диаметра (36–40 мм) сразу после монтажа замкового блока (рис. 3). Такое решение позволяет существенно снизить величину выкалывания замка за счет заклинивания блока по торцам в местах установки арматурных стержней. Недостатком такого решения является возникновение значительных усилий в бетоне обделки вокруг стержней — концентрация напряжений (рис. 4), приводящих к сколам бетона и появлению сетки трещин в обделке, что негативно сказывается на дальнейшей эксплуатации, снижая долго-

вечность обделки (доступ воды через трещины к рабочей арматуре / ослабление сечения, снижение несущей способности).

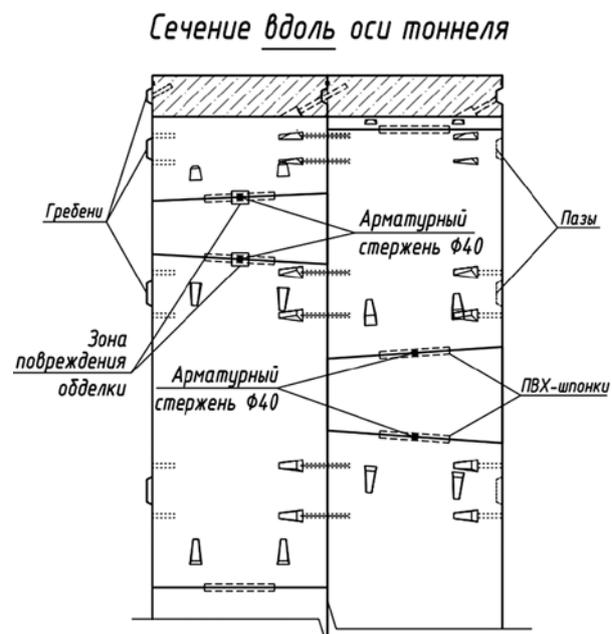


Рис. 3. Места установки арматурных стержней в радиальных стыках



Рис. 4. Разрушение бетона в местах концентрации напряжений в стыке

Способ 2. Заделка в тампонажные отверстия в замковом блоке и блоке предыдущего кольца арматурных анкеров с резьбой с установкой между ними струбцины с винтовым домкратом, фиксирующей блок и компенсирующей усилия выталкивания (рис. 5). Такое решение позволяет уменьшить величину выскальзывания замкового блока. Однако его существенным недостатком является развитие продольных трещин как в блоке предыдущего кольца, так и в замковом блоке вновь монтируемого. Они возникают вследствие передачи выталкивающего усилия со струбцины на заделанные в отверстия арматурные стержни и далее на бетон, который при этом дополнительно получает местные сминающие деформации, приводящие к сколам защитного слоя бетона (рис. 6). Более того, нередки случаи вырывания анкера при движении ключа, что влечет за собой значительное повышение травматизма (напряжение в струбцине в момент срыва может быть близким к пределу прочности стали на растяжение, и процесс отрыва анкера струбцины аналогичен разрыву напрягаемой арматуры).

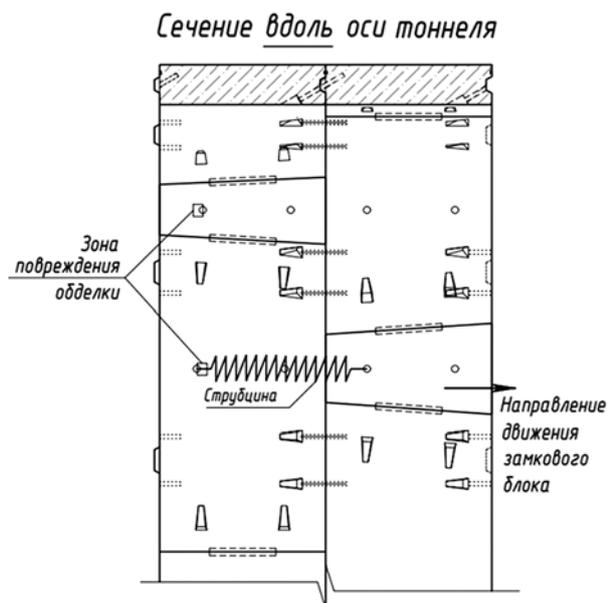


Рис. 5. Места установки струбцин на блоках

Способ 3. Этот способ основан на задействовании блока соседнего, ранее смонтированного кольца и заключается в закручивании 4–6 болтов в оба блока и прикреплении к ним пластины, которая должна удерживать замковый блок в проектом положении. Минусы такого решения проблемы аналогичны предыдущим двум, а конкретно можно наблюдать образование трещин в обоих блоках (ключевом и соседнего кольца), сколы бетона обделки, возможность срыва пластины и отсутствие гарантированного удержания замка от выскальзывания (рис. 7).

Учитывая все это, можно сформулировать перечень последствий как самого выскальзывания, так и мероприятий по его устранению:

- выскальзывание замка приводит к необходимости задавливать его обратно, чтобы иметь возможность смонтировать следующее кольцо обделки (такое воздействие может повлечь образование трещин на блоке);
- если закрутить связи растяжения сразу после замыкания кольца, то в процессе движения ключа шпильки срежет и связь не будет выполнять свои функции (это в дальнейшем может привести к раскрытию стыка обделки и возникновению протечек воды через него);
- появление сколов защитного слоя бетона, развитие трещин, снижение несущей способности обделки (рис. 8).

Все это в совокупности свидетельствует, во-первых, о недостаточной проработке конструкции обделки на стадии проекта, во-вторых, об отсутствии эффективных мер по решению этой проблемы на стадии ведения строительно-монтажных работ.

Аналитический метод определения величины выталкивающей силы

Само выдавливание ключевого блока можно объяснить превышением сил трения, действующих в стыке по поверхностям торцов



Рис. 6. Вид струбцины и разрушение бетона в местах концентрации напряжений у тампонажного отверстия



Рис. 7. Сколы бетона в местах установки болтов фиксации пластины

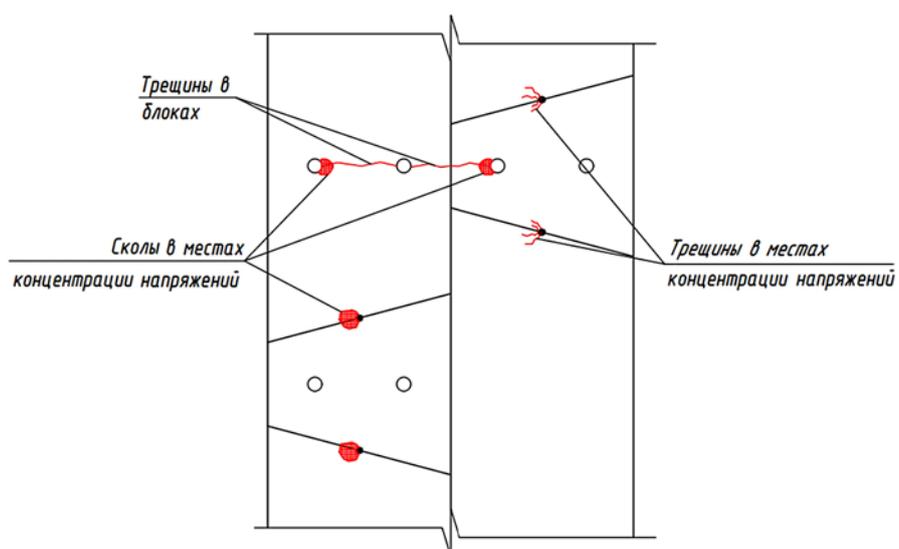


Рис. 8. Схема дефектов обделки тоннеля

смежных и замкового блоков, выталкивающим усилием. На практике на напряженно-деформированное состояние этих блоков оказывает влияние совокупность силовых воздействий. В настоящей статье в качестве силового фактора, который, возможно, приводит к активизации этого процесса, рассмотрим горное давление. Тогда силы выталкивания образуются по причине наличия скошенных граней замка, без которых его монтаж был бы невозможен. Величина этих сил зависит от усилия, действующего в стыке, и угла наклона торцов блока и в первом приближении может определяться так:

$$N_{\text{выт}} = N_{\text{стык}} \tan \alpha. \quad (1)$$

Возьмем для примера обделку двухпутных перегонных тоннелей метрополитена Санкт-Петербурга диаметром 10,3 м. В ней угол наклона торцов блоков $\alpha = 15^\circ$, ширина кольца обделки составляет 1,8 м, а высота блока — 0,45 м (рис. 9). Зная инженерно-геологические условия района расположения тоннеля, характеристики бетона и применяя классические методы строительной механики (метод перемещений), можно получить значение нормальной силы в стыке $N_{\text{стык}} \approx 870$ т. Тогда:

$$N_{\text{выт}} = N_{\text{стык}} \tan \alpha = 870 \cdot \tan(15^\circ) = 233 \text{ т}. \quad (2)$$

При этом сила трения имеет явно меньшие значения:

$$N_{\text{тр}} = N_{\text{стык}} \sin(\alpha) \mu = 870 \cdot \sin(15^\circ) \cdot 0,62 = 140 \text{ т}, \quad (3)$$

где μ — коэффициент трения скольжения бетона по бетону (для класса В50) [3].

Это и объясняет выталкивание блока.

При этом если закрутить связи растяжения (четыре шпильки $\varnothing 25$ мм, по две с каждого смежного блока) сразу после монтажа замкового блока, на них будет передаваться срезающее усилие, равное $N_{\text{выт}} \cos \alpha - N_{\text{тр}}$, которое

вызовет касательные напряжения, превышающие допустимые:

$$R_s = 0,58 R_y = 0,58 \cdot 35500 = 20590 \text{ т/м}^2, \quad (4)$$

$$\tau_{\text{шп}} = \frac{N_{\text{выт}} \cos \alpha - N_{\text{тр}}}{4S} = \frac{233 \cdot \cos 15^\circ - 140}{4 \cdot 0,000491} = 43310 \text{ т/м}^2 > 20590 \text{ т/м}^2, \quad (5)$$

где S — площадь сечения одной шпильки $\varnothing 25$ мм, равная 0,000491 м².

Приведенные ранее формулы и расчеты основываются на простейших законах физики и применении метода перемещений. Он позволил получить порядок значений нормальной силы, действующей в стыке. Однако ввиду наличия ряда допущений и своей специфики метод перемещений не может дать полную картину распределения усилий и значений перемещений замкового блока.

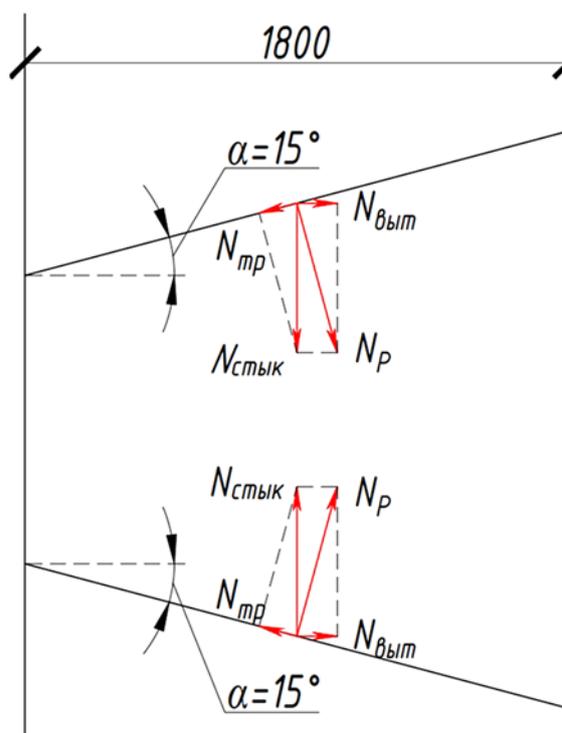


Рис. 9. Схема к определению величины силы выталкивания и силы трения

Применение численных методов для определения силы выталкивания

Для более глубокого анализа явления выталкивания был выполнен расчет в комплексе Midas GTS NX. Данный комплекс широко распространен в научной среде и применяется в расчетах сложных систем, таких как «фундамент-грунт» или «обделка-грунт», причем результаты математического моделирования в ряде исследований имели высокую сходимость с натурой [4–10]. Моделировалось кольцо обделки тоннеля в толще протерозойских глин. Размеры массива назначались из соображений, что на расстоянии двух диаметров в стороны и одного диаметра вверх и вниз от внешней границы выработки ее влияние на напряженно-деформированное состояние грунта несущественно (менее 4%). Были выбраны геологические условия на участке трассы двухпутного тоннеля в зоне, где на обделку оказывается максимальное давление от всей толщи вышележащих грунтов (расчет методом перемещений выполнялся для этих же условий).

Физико-механические свойства конечных элементов, моделирующих грунтовый массив, выражены следующими показателями: линейными (модулем деформации E , коэффициентом поперечной деформации, объемным весом γ) и нелинейными (сцеплением C и углом внутреннего трения ϕ). Применяемая модель в Midas GTS NX: Мора — Кулона (учитывающая упругопластическую работу массива).

Физико-механические свойства конечных элементов, моделирующих обделку перегонного тоннеля, выражены следующими показателями: модулем упругости E , коэффициентом Пуассона ν и объемным весом γ . В Midas GTS NX применяется модель Elastic, которая учитывает работу бетона в упругой стадии.

Для моделирования стыков обделки использовались плоские интерфейсные элемен-

ты. Они представляют собой разрыв в сетке конечных элементов, заполненный связями между поверхностями граней разрываемых, смежных друг с другом блоков.

Помимо этого, для обеспечения возможности движения замка в направлении проходки в модели была назначена еще одна поверхность, заполненная плоскими интерфейсными элементами — по границе контакта внешней поверхности замкового блока и протерозойских глин. Если этого не сделать, то будет решаться задача с жесткими связями в узлах конечных элементов между блоком и грунтом, что не соответствует действительности.

В качестве граничных условий были заданы запрет вертикальных перемещений по нижней грани массива и запреты перемещений по боковым граням, за исключением торцов кольцевых стыков замкового блока (для обеспечения возможности его выдавливания).

Разбивка на конечные элементы массива выполнена со сгущением сетки вблизи конструкции (размер элементов составляет от 1,0 до 0,15 м). Всего в модели 44 051 узел и 193 688 элементов (рис. 10).

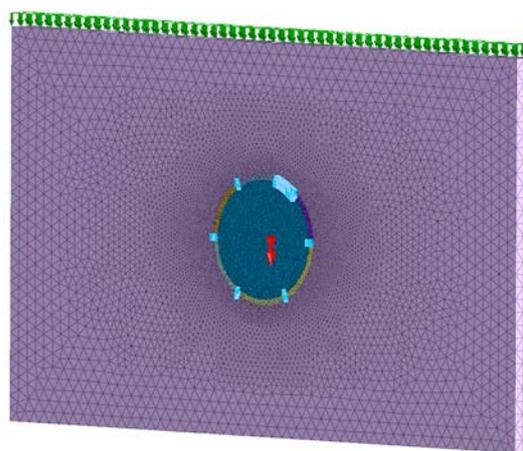


Рис. 10. Вид полученной 3D-модели

Расчет выполнялся в два этапа. На первом создавалось начальное напряженное состояние

грунтового массива. На этом этапе все группы КЭ имели свойства протерозойских глин, что позволило получить поле напряжений, соответствующее состоянию массива до проходки тоннеля. В конце этапа расчета полученные перемещения обнулялись. На втором этапе выполнялся монтаж кольца обделки. Здесь группам КЭ-блоков назначались характеристики бетона, в плоскостях стыков и на контакте «замковый блок-грунт» активировались плоские интерфейсные элементы, а часть массива, заключенная во внутренней поверхности кольца обделки, удалялась (рис. 11). При этом происходило снятие ограничения перемещений по кольцевым стыкам замкового блока.

В результате расчета было получено значение перемещения замкового блока в направлении проходки, оно составило 25,9 мм (рис. 12).

При этом были получены значения напряжений в интерфейсных элементах в стыке, по ним и будет оцениваться значение силы трения (рис. 13).

Таким образом, сила трения в стыке:

$$N_{\text{тр}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sigma_i A_i \sin \alpha = \frac{A_{\text{стыка}} \sin \alpha}{n} \sum_{i=1}^n \sigma_i = \frac{1,86 \cdot 0,45 \cdot \sin 15^\circ}{72} \cdot 45992,33 = 138,4 \text{ т}, \quad (6)$$

где n — количество интерфейсных элементов в стыке;

σ_i — напряжение в i -м элементе;

A_i — площадь i -го элемента.

Полученное значение близко к результату, определенному аналитически (разница 1,1%), что свидетельствует о корреляции результатов, полученных двумя методами, и возможности применения аналитических расчетов для оценки значения сил трения и выталкивания, возникающих в стыке.

В качестве рекомендаций, внедрение которых может решить проблемы выдавливания, предложим следующие:

1. Установка в радиальный стык дополнительных связей, препятствующих выкалыванию ключа, например дополнительных шпилек. Требуемое количество шпилек будет определяться из условия прочности шпильки на срез. Так, если добавить по одной шпильке с каждой стороны и увеличить их диаметр до 30 мм (шесть шпилек $\varnothing 30$ мм, по три с каждого смежного блока), получим:

$$\tau_{\text{шп}} = \frac{N_{\text{выт}} \cos \alpha - N_{\text{тр}}}{6S} = \frac{233 \cdot \cos 15^\circ - 140}{6 \cdot 0,000707} = 20052 \text{ Т/м}^2 \quad (7)$$

$$20052 \text{ Т/м}^2 < 20590 \text{ Т/м}^2 \text{ (запас 2,6\%)},$$

здесь S — площадь сечения одной шпильки $\varnothing 30$ мм, равная $0,000707 \text{ м}^2$.

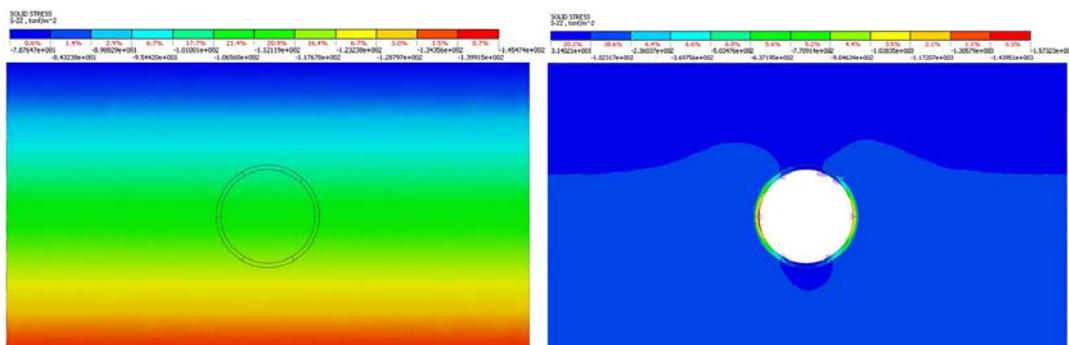


Рис. 11. Изополя напряжений в направлении вертикальной оси (слева — на этапе создания начального напряженного состояния, справа — после монтажа кольца обделки)

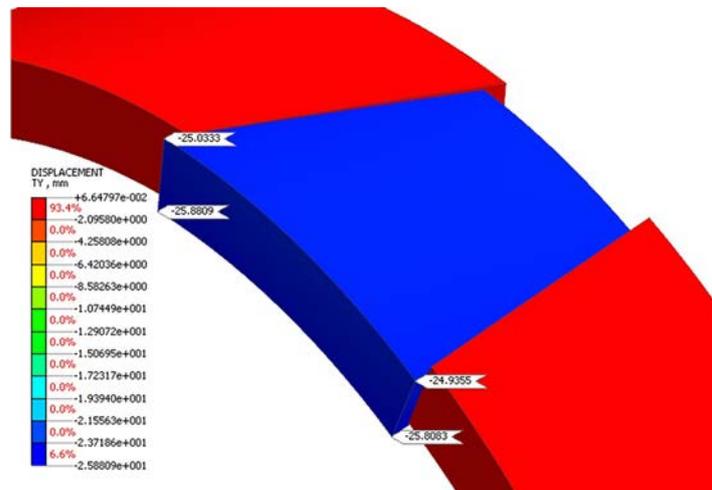


Рис. 12. Деформации вдоль оси тоннеля (для наглядности увеличены в 5 раз)

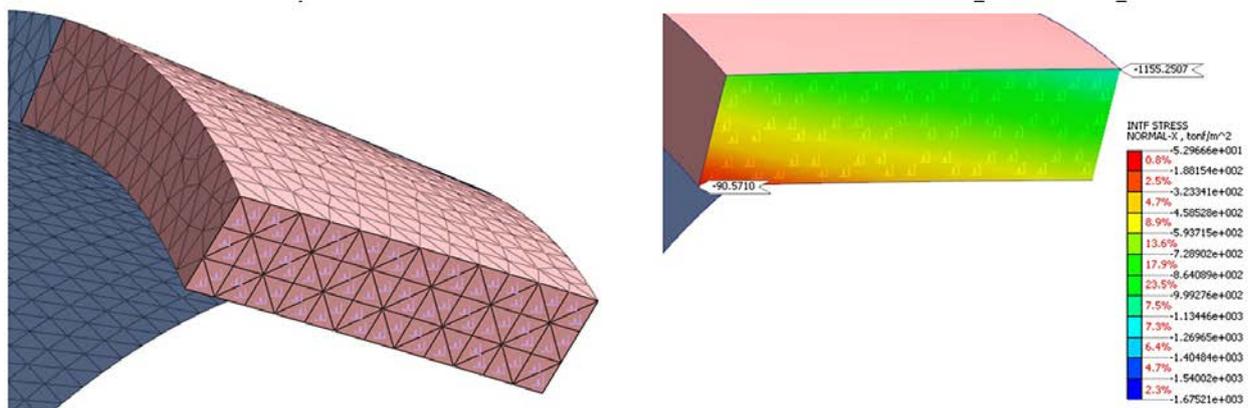


Рис. 13. Сформированные плоские интерфейсные элементы стыка (слева), значение нормальных напряжений в интерфейсных элементах стыка (справа)

2. Решение проблемы на стройке с помощью увеличения сил трения в стыке путем обработки торцевых поверхностей замкового и смежных блоков различными быстротвердеющими составами (например, эпоксидным клеем), что уменьшит или полностью сведет на нет перемещение замка.

3. Уменьшение угла наклона торцов замка, что повлечет за собой снижение выталкивающих усилий. При проектировании обделок рекомендуемые значения угла наклона торцов замкового блока лежат в диапазоне 7–15°. Если принять, к примеру, значение $\alpha = 10^\circ$, то:

$$N_{\text{выт}} = N_{\text{стык}} \tan \alpha = 870 \cdot \tan 10^\circ = 153 \text{ т}, \quad (8)$$

$$N_{\text{тр}} = N_{\text{стык}} \sin(\alpha) \mu = 870 \cdot \sin(10^\circ) \cdot 0,62 = 94 \text{ т}. \quad (9)$$

Для подтверждения корректности полученных значений был выполнен еще один расчет в Midas GTS NX, единственным отличием которого стало значение угла наклона торцов замкового блока $\alpha = 10^\circ$.

В результате расчета было получено значение величины выдавливания замкового блока, равное 20,8 мм (на 19,7 % меньшее по сравнению со случаем для $\alpha = 15^\circ$) (рис. 14).

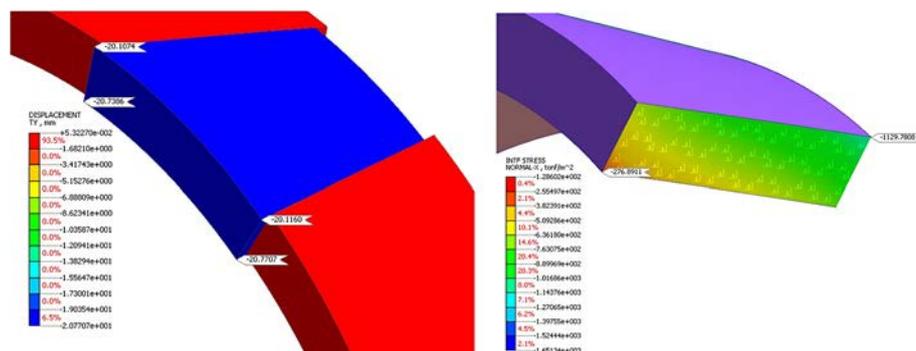


Рис. 14. Слева — картина перемещений вдоль оси тоннеля (для наглядности картина деформации увеличена в 5 раз), справа — распределение нормальных напряжений в интерфейсных элементах стыка

ТАБЛИЦА 1. Сравнение результатов расчетов

Параметр	Метод расчета	Аналитический расчет	Midas GTS NX	Разница, %
Сила трения при $\alpha = 15^\circ$, т		140	138,4	1,1
Сила трения при $\alpha = 10^\circ$, т		94	96	2,1
Выдавливание при $\alpha = 15^\circ$, мм		—	25,9	—
Выдавливание при $\alpha = 10^\circ$, мм		—	20,8	—

При этом сила трения составила 96 т, разница с аналитическим расчетом — 2,1 %, что снова свидетельствует о корреляции значений, получаемых аналитически и по результатам математического моделирования.

В табл. 1 представлено сравнение результатов расчетов, полученных двумя методами.

4. Изменение конструкции замкового и смежных блоков. По сути, это модернизация варианта решения с установкой в стык арматурных стержней, а конкретно предлагается предусмотреть в конструкции блока закладные детали в местах установки арматурных стержней, чтобы оптимально воспринимать и распределять возникающие там высокие напряжения. Это позволит эффективно и относительно недорого решить вопрос возникновения негативных последствий.

Заключение

В результате проведенного исследования была поставлена и проанализирована проблема выдавливания замкового блока при строительстве транспортных тоннелей большого диаметра из сборной высокоточной железобетонной обделки повышенной водонепроницаемости. Также была предложена аналитическая методика определения сил трения, возникающих в радиальных наклонных стыках такой обделки на базе применения классических методов строительной механики. Для подтверждения результатов и более глубокого анализа процесса выдавливания было проведено математическое моделирование с использованием метода конечных элементов, показавшее высокую сходимость получаемых результатов.

Помимо этого, были даны возможные варианты решения проблемы в условиях строительства и на стадии проектирования конструкции обделки.

Библиографический список

1. Крюкова М. С., Новиков А. Л. Автодорожный подводный тоннель под Невой // Транспорт: проблемы, идеи, перспективы: сборник трудов LXXXI Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (Санкт-Петербург, 19–26 апреля 2021 года). СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2021. С. 233–237.

2. Егоров Р. А., Ледяев А. П. Первый опыт использования ТПКМ Ø10,3 м в отечественном метростроении // Транспорт: проблемы, идеи, перспективы: сборник трудов LXXVIII Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (Санкт-Петербург, 16–23 апреля 2018 года). СПб., 2018. С. 23–27.

3. Влияние сил трения на прочность бетона / В. П. Селяев [и др.] // Региональная архитектура и строительство. 2012. № 3. С. 12–17.

4. Ledyayev A., Kavkazskiy V., Davidenko E. Examination of the stress-strain state of service tunnels at the airport Domodedovo // International scientific siberian transport forum “TransSiberia 2021”. TransSiberia 2021: Lecture Notes in Networks and Systems. Springer Cham, 2022. Vol. 1. P. 28–37.

5. Construction strategies for a NATM tunnel in São Paulo, Brazil, in residual soil / P. M. Osvaldo [et al.] // Underground Space. 2022. Vol. 7, iss. 1. P. 1–18. DOI: 10.1016/j.undsp.2021.04.002.

6. Shaposhnikov E. A., Frolov Yu. S. Substantiation of rational design factors of a metropolitan rail-

way station without side railway platforms // Russian Journal of Transport Engineering. 2023. Vol. 10. No. 1. URL: <https://t-s.today/PDF/05SATS123.pdf>. DOI: 10.15862/05SATS123.

7. Numerical simulation of the thermal response of seabed sediments to geothermal cycles in Suvilahti, Finland / Marek Mohyla, et al. // Renewable Energy. 2024. Vol. 221. DOI: 10.1016/j.renene.2023.119770.

8. Mechanical performances of shield tunnel segments under asymmetric unloading induced by pit excavation / Gang Wei, et al // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2023. Vol. 15, iss. 6. P. 1547–1564. DOI: 10.1016/j.jrmge.2022.08.010.

9. Математическое моделирование термодинамических процессов в вентиляционных шахтах метрополитена / А. А. Сокольников [и др.] // Известия Петербургского университета путей сообщения, 2024. Т. 21, вып. 2. С. 457–469. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-02-457-469.

10. Land Lapse Phenomenon and Surface Subsidence Law of Shield Tunnel Passing Through Rock-Bearing Formation / Y. Guangming [et al.] // Frontiers in Earth Science. 2022. DOI: 10.3389/feart.2022.934360.

Дата поступления: 07.05.2024

Решение о публикации: 16.08.2024

Контактная информация:

КОНСТАНТИНОВ Василий Денисович — лаборант; vasyakonst213@gmail.com

НОВИКОВ Анатолий Леонидович — старший преподаватель; snoval@pgupstm.ru

СОКОРНОВ Антон Александрович — старший преподаватель; scarlunch@mail.ru

The key-segment extrusion during the construction of large-diameter transport tunnels

V. D. Konstantinov, A. L. Novikov, A. A. Sokornov

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russia

For citation: *Konstantinov V. D., Novikov A. L., Sokornov A. A. The key-segment extrusion during the construction of large-diameter transport tunnels // Proceedings of Petersburg Transport University, 2024. Vol. 21, iss. 3. P. 609–621. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2024-03-609-621*

Abstract

Purpose: to consider the problem of the key-segment extrusion that occurs during the construction of subway tunnels in St. Petersburg using prefabricated high-precision reinforced concrete linings with increased water resistance with a diameter of 10.3 m. To analyze the possible processes leading to this phenomenon and methods of solving the problem in construction conditions. To determine the consequences of the currently used solutions to the problem. To develop an analytical methodology for determining the magnitude of the friction force acting on the radial joints planes of contacting segments based on classical structural mechanics methods (displacement method). To carry out mathematical modeling of the extrusion process by the finite element method and compare its results with those obtained analytically. To develop recommendations for the elimination of block extrusion, which can be both applied in construction conditions and taken into account when designing lining structures. To analyze the effectiveness of the proposed recommendations. **Methods:** full-scale data from constructed objects, analytical calculations and mathematical modeling by the finite element method were used. **Results:** an analytical method is proposed for determining the magnitude of the pushing force of the key-segment and the friction force in the radial segment joints. The results of mathematical modeling showed high convergence of the results obtained by the two methods. Recommendations have been developed to eliminate the phenomenon of extrusion, and their effectiveness has been evaluated. **Practical importance:** the results of the study can be used at the design stage of prefabricated reinforced concrete linings with increased water resistance for large-diameter tunnels, as well as in construction conditions at the time of installation of the key segment.

Keywords: refabricated high-precision reinforced concrete lining with increased water resistance, key-segment, tunnel boring machine, large-diameter tunnels, mathematical modeling, friction force

References

1. Kryukova M. S., Novikov A. L. Avtodorozhny`j podvodny`j tonnel` pod Nevoj // *Transport: problemy`, idei, perspektivy`*: sbornik trudov LXXXI Vserossijskoj nauchno-texnicheskoj konferencii studentov, aspirantov i molody`x ucheny`x (Sankt-Peterburg, 19–26 aprelya 2021 goda). SPb.: FGBOU VO PGUPS, 2021. S. 233–237. (In Russian)
2. Egorov R. A., Ledyayev A. P. Pervy`j opy`t ispol`zovaniya TPMK Ø10,3 m v otechestvennom metrostroenii // *Transport: problemy`, idei, pers-*

pektivy`: sbornik trudov LXXVIII Vserossijskoj nauchno-texnicheskoj konferencii studentov, aspirantov i molody`x ucheny`x (Sankt-Peterburg, 16–23 aprelya 2018 goda). SPb., 2018. S. 23–27. (In Russian)

3. Vliyanie sil treniya na prochnost` betona / V. P. Selyayev [i dr.] // *Regional`naya arxitektura i stroitel`stvo*. 2012. № 3. S. 12–17. (In Russian)

4. Ledyayev A., Kavkazskiy V., Davidenko E. Examination of the stress-strain state of service tunnels at the airport Domodedovo // *International scientific*

siberian transport forum “TransSiberia 2021”. TransSiberia 2021: Lecture Notes in Networks and Systems. Springer Cham, 2022. Vol. 1. P. 28–37.

5. Construction strategies for a NATM tunnel in São Paulo, Brazil, in residual soil / P.M. Osvaldo [et al.] // *Underground Space*. 2022. Vol. 7, iss. 1. P. 1–18. DOI: 10.1016/j.undsp.2021.04.002.

6. Shaposhnikov E. A., Frolov Yu. S. Substantiation of rational design factors of a metropolitan railway station without side railway platforms // *Russian Journal of Transport Engineering*. 2023. Vol. 10. No. 1. URL: <https://t-s.today/PDF/05SATS123.pdf>. DOI: 10.15862/05SATS123.

7. Numerical simulation of the thermal response of seabed sediments to geothermal cycles in Suvilahti, Finland / Marek Mohyla [et al.] // *Renewable Energy*. 2024. Vol. 221. DOI: 10.1016/j.renene.2023.119770.

8. Mechanical performances of shield tunnel segments under asymmetric unloading induced by pit excavation / Gang Wei, et al // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2023. Vol. 15, iss. 6. P. 1547–1564. DOI: 10.1016/j.jrmge.2022.08.010.

9. Matematicheskoe modelirovanie termodinamicheskix processov v ventilyacionny`x shaxtax metropolitena / A.A. Sokornov [i dr.] // *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshheniya*, 2024. T. 21. Vy`p. 2. S. 457–469. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-02-457-469. (In Russian)

10. Land Lapse Phenomenon and Surface Subsidence Law of Shield Tunnel Passing Through Rock-Bearing Formation / Y. Guangming [et al.] // *Frontiers in Earth Science*. 2022. DOI: 10.3389/feart.2022.934360.

Received: 07.05.2024

Accepted: 16.08.2024

Author’s information:

Vasilii D. KONSTANTINOV — Laboratory assistant; vasyakonst213@gmail.com

Anton A. SOKORNOV — Senior lecturer; scarlunch@mail.ru

Anatolii L. NOVIKOV — Senior lecturer; snoval@yandex.ru