

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2026. Т. 28. № 2. С. 268–275.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2026; 28 (2): 268–275.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 624.19

<https://doi.org/10.31675/1607-1859-2026-28-2-268-275>

EDN: YWRRVA

ТОННЕЛЬНАЯ КРЕПЬ В ФОРМЕ Z-ОБРАЗНЫХ СЕГМЕНТОВ

Алексей Сергеевич Елизаров¹, Алексей Борисович Павликов¹,
Алексей Викторович Каменчуков¹, Алексей Анатольевич Пиотрович²

¹Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск, Россия

²Дальневосточный государственный университет путей сообщения,
г. Хабаровск, Россия

Аннотация. Исследование посвящено анализу поведения предварительно напряженных железобетонных элементов туннельной облицовки в зависимости от геометрической конфигурации сегментов. Особое внимание уделяется влиянию формы сегмента на структурную устойчивость, перераспределение напряжений и деформационные характеристики конструктивных элементов.

С целью выявления наиболее эффективных вариантов выполнен анализ конструктивных решений с позиции повышения надежности и технологичности строительства оболочек туннелей, используемых при сооружении транспортных туннелей с применением проходческих щитов.

Для оценки состояния напряжения-деформации оболочки использовались методы численного моделирования применительно к различным вариантам расположения сегментов.

Исследование также охватывает конструкционные и технологические аспекты внедрения новых геометрических конфигураций.

Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации процессов проектирования и строительства сборных оболочек, а также повышения эксплуатационных характеристик туннельных конструкций в различных геотехнических условиях.

Ключевые слова: транспортное строительство, тоннели, крепь, сегменты, численное моделирование

Для цитирования: Елизаров, А.С., Павликов, А.Б., Каменчуков, А.В., Пиотрович, А.А. Тоннельная крепь в форме Z-образных сегментов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2026. Т. 28. № 2. С. 268–275. <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2026-28-2-268-275>. EDN: YWRRVA

ORIGINAL ARTICLE

TUNNEL LINING IN THE FORM OF Z-SHAPED SEGMENTS

Aleksey S. Elizarov¹, Aleksey B. Pavlikov¹,
Aleksey V. Kamenchukov¹, Aleksey A. Piotrovich²

¹Pacific National University, Khabarovsk, Russia

²Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, Russia

Abstract. This work focuses on the analysis of the behavior of prestressed reinforced concrete tunnel lining elements as a function of the geometric configuration of segments. Particular attention is paid to the influence of the segment shape on the structural stability, stress redistribution, and deformation characteristics of structural elements.

Purpose: The aim of the work is to identify the most effective options. Design solutions are analyzed to improve the reliability and constructability of the tunnel lining with the use of boring machines.

Methodology: Numerical simulation methods are used to assess the stress-strain state of the lining for various segment arrangements. Structural and technological aspects are studied for implementing new geometric configurations.

Research findings: The obtained results can be used to improve the design and construction processes of precast tunnel lining and the performance characteristics of tunnel structures under various geotechnical conditions.

Keywords: transport construction, tunnel, anchorage, segment, numerical simulation

For citation: Elizarov, A.S., Pavlikov, A.B., Kamenchukov, A.V., Piotrovich, A.A. Tunnel Lining in the Form of Z-Shaped Segments. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2026; 28 (2): 268–275. <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2026-28-2-268-275>. EDN: YWRRVA

Введение

К 2030 г. ожидается, что около 60 % населения мира будет проживать в городах [1]. Прогрессивная урбанизация требует возведения современной инфраструктуры для формирования новых связей внутри городских центров и между ними. Проектные организации и строительные площадки активно работают над удовлетворением растущей потребности в еще более эффективной инфраструктуре. Для этого почти всегда задействуются механизированные комплексы для бурения туннелей (ТПМК).

Использование ТПМК позволяет значительно повысить скорость и безопасность строительства туннелей, обеспечивая высокую точность бурения и возможность работы даже в сложных геологических условиях. Разработка конструктивных решений для сборного железобетона, используемого совместно с ТПМК, непосредственно влияет на долговечность, надежность и экономичность возводимых сооружений [2, 3]. Таким образом, изучение новых форм сегментов, которые могли бы более эффективно воспринимать нагрузки, снижать деформации и продлевать срок службы покрытия, является особенно актуальным направлением исследований.

Общие положения

Зависимость российской индустрии туннелестроения от импортного оборудования негативно сказывается на развитии отрасли. Высокие расходы на при-

обретение зарубежных машин увеличивают стоимость проектов и снижают рентабельность компаний. Ограниченность поставок и колебание валютных курсов создают операционную уязвимость, приводящую к задержкам и дополнительным затратам. Отсутствие достаточного опыта и компетенций для самостоятельного создания аналогичного оборудования сдерживает инновационное развитие отрасли. Политические и экономические риски, включая возможные санкции, дополнительно осложняют ситуацию [4, 5]. Однако меры по поддержке отечественного машиностроения помогают постепенно снизить зависимость и создать условия для успешного перехода на отечественное оборудование. Согласно последним данным, более 90 % используемого оборудования составляют машины иностранного производства, преимущественно от ведущих производителей рынка, таких как Herrenknecht (Германия), LOVAT (Канада) и Hitachi (Япония).

Экономическое положение отрасли испытывает серьезные трудности, в том числе в связи с санкционными ограничениями. По оценкам исследовательской группы DISCOVERY Research Group, в 2023 г. объем российского рынка новых ТПК составил всего 2 единицы техники на 10 млн долл (импортная продукция). Недостаточное массовое производство компенсируется арендой и ремонтом существующих машин, однако этот подход не способен удовлетворить потребности крупных инфраструктурных проектов, реализуемых в стране.

Материалы и методы исследования

При продолжающемся развитии и создании все более сложных проектов тоннелестроения методом щитовой проходки особое внимание уделяется совершенствованию методов соединения сегментов сборной обделки [6–8]. Повышение прочности, долговечности и эффективности соединений сегментов позволяет инженерам создавать более безопасные и стабильные тоннели, способные выдерживать испытания временем [8, 9].

Основными материалами для создания сегментов тоннельной кепи являются армированные бетоны и чугун. Оба материала имеют существенные недостатки: они достаточно тяжелые и подвержены коррозии. Так как конструкция работает как сжатая оболочка, активно развивается поиск новых форм и материалов сегментов, поскольку одной из значительных проблем существующих решений является неоптимальная конструкция сегментов, приводящая к перерасходу материалов. Также многие конструкции плохо адаптированы к эксплуатации в сложных инженерно-геологических условиях. Это может приводить к неравномерному распределению нагрузок, созданию локальных зон концентрации напряжений, увеличивающих риск образования трещин и преждевременного разрушения. Традиционные конструкции сегментов часто недостаточно приспособлены к изменению давления грунта, что приводит к неэффективности дизайна. Часто сегменты проектируются главным образом для статических нагрузок, без должного учета динамических сил, таких как сейсмические явления, вибрации от строительных работ или транспортные нагрузки в городских тоннелях. Этот недостаток может поставить под угрозу стабильность тоннеля под воздействием таких факторов.

По геометрическим формам сегменты представляют собой простые объемные геометрические формы: прямоугольная, шестиугольная (сотовая), трапециевидальная, восьмиугольная. Такая форма обусловлена необходимостью наибо-

лее плотного (беззазорного) соединения сегментов для обеспечения устойчивости и изоляции конструкции. Сложные формы сегментов, например С-образную, чаще всего применяют для усиления конструкции [10]. В целом выбор формы сегментов – это всегда поиск компромиссов между технологичностью производства, простотой сборки и эффективностью эксплуатации и работы конструкции. Однако анализ показывает, что ни одна из существующих форм не гарантирует одновременно оптимального сопряжения, минимальных напряжений в стыках, простоту изготовления и высокую сопротивляемость внешним нагрузкам. Концентрация напряжений в углах, потребность в дополнительной подгонке, чувствительность к качеству установки и ограниченная геометрическая приспособляемость свидетельствуют о том, что существующие решения не универсальны и нуждаются в инженерных усовершенствованиях.

С целью повышения устойчивости конструкции, за счет увеличения площади бокового давления и сил сцепления блоков между собой, авторами предложена Z-образная (зигзагообразная) форма сегментов (рис. 1). Потенциальная эффективность сегментов достигается за счет эффекта самоблокировки элементов, который повышает устойчивость к боковому смещению и снижает зависимость конструкции от болтовой стяжки сегментов между собой, но не исключает ее.

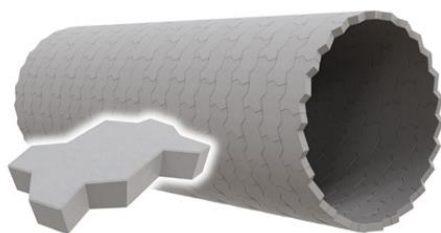


Рис. 1. Форма и расположение Z-образных сегментов в конструкции
Fig. 1. The shape and location of Z-shaped segments in the structure

Для сравнения устойчивости конструкции к внешним воздействиям выполнен численный эксперимент в программном комплексе Midas GTS NX. В качестве исходной была принята упрощенная конструкция тоннеля с обделкой из железобетонных сегментов. Глубина заложения тоннеля составляет 40 м, внутренний диаметр сегментной части обделки – 10 м, толщина сегментов – 0,45 м. Сравнивались две формы сегментов: прямоугольная и Z-образная.

Инженерно-геологический массив грунта задан сплошным однородным массивом из полутвердых суглинков с включением щебня или гравия. Физико-механические характеристики и состав грунта определены на основе материалов инженерных изысканий и систематизированы в табл. 1 и 2.

Для оценки напряженно-деформированного состояния конструкции под воздействием природного давления грунта принята модель Мора – Кулона. Сегменты тоннельной обделки были заданы как трехмерные твердые тела, выполненные из бетона В20. Между сегментами установили интерфейсные элементы, имитируя контакт поверхностей сегментов, что позволило адекватно отразить поведение стыков под действием внешней нагрузки. Границы условий исключали движение на нижней поверхности массива, а боковые края были за-

фиксированы вдоль нормали, чтобы обеспечить реалистичное моделирование в замкнутом массиве.

Таблица 1

Гранулометрический состав грунта

Table 1

Grain size distribution of soil

Наименование грунта	Гранулометрический состав (содержание частиц, %, диаметр, мм)								
	10–5	5–2	2–1	1–0,5	0,5–0,25	0,25–0,1	0,1–0,05	0,05–0,002	Менее 0,002
Суглинок легкий тугопластичный	1,4	0,9	1,7	1,6	1,5	2,7	1,4	51,2	37,5

Таблица 2

Физико-механические свойства грунта

Table 2

Physical and mechanical properties of soil

Наименование грунта	Плотность ρ , г/см ³	Влажность, д. е.			Число пластичности I_p , д. е.	Показатель текучести I_L , д. е.	Сцепление, кПа	Угол внутреннего трения, град
		W	W_L	W_p				
Суглинок легкий тугопластичный	1,94	0,246	0,204	0,313	0,108	0,0039	15,9	14,3

Результаты

Напряженно-деформированное состояние конструкции оценивалось после консолидации напряжений и деформаций от собственного веса грунта. В расчетах не учитывались этапы и время строительства тоннеля. Предполагалось, что нагрузка на обделку начинает действовать не моментально, а последовательно. В процессе анализа фиксировались перемещения обделки, напряжения в теле сегментов, относительные смещения между сегментами, а также зоны, где происходило раскрытие стыков или их смятие. Результаты расчета перемещений в сегментах обделки представлены на рис. 2.

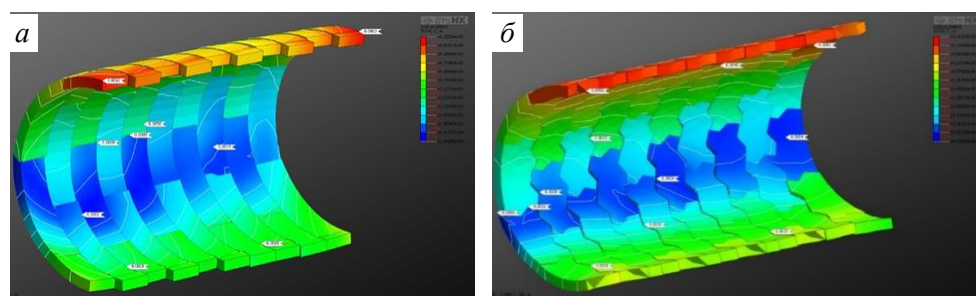


Рис. 2. Распределение перемещений в сегментах:

a – прямоугольные сегменты; b – Z-образные сегменты

Fig. 2. Distribution of displacements in different segments:

a – rectangular; b – Z-shaped

Для каждого варианта обделки фиксировались максимальные перемещения, которые составили:

– прямоугольные сегменты: положительные 6,3 мм (преобладающие в верхнем поясе от 4,5 до 5,5 мм);

– Z-образные сегменты: положительные 5,6 мм (преобладающие в верхнем поясе от 4,5 до 5,1 мм).

Минимальная величина перемещений наблюдается в среднем поясе и не превышает 0,5 мм. В целом характер перемещений соответствует основным теориям деформации цилиндрических оболочек [11, 12]. Для прямоугольных сегментов наиболее характерны перемещения и деформации угловых зон сегментов, а для Z-образных – равномерное распределение перемещений и деформаций вдоль граней сегмента. Такое обстоятельство свидетельствует о том, что прямоугольные элементы более чувствительны к изгибно-крутильным деформациям и перемещениям, возникающим от действия вертикальной и боковой нагрузки от грунта. В свою очередь, Z-образные сегменты показывают хорошую сопротивляемость изгибно-крутильным деформациям, что, прежде всего, обусловлено эффектом самозаклинивания элементов и их взаимным расположением в конструкции.

Заключение

В результате выполненного исследования можно заключить, что устойчивость и надежность работы тоннельной крепи зависит от формы и взаимной ориентации сегментов. Численный эксперимент показал, что сегменты прямоугольной формы более чувствительны к деформациям изгиба, особенно в угловой зоне сегмента, чем сегменты Z-образной формы. Кроме того, сегменты Z-образной формы демонстрируют более равномерное распределение перемещений и деформаций по площади верхнего пояса нагружения, что свидетельствует о совместной работе элементов.

Результаты численного моделирования подтверждают возможность использования новых геометрических форм тоннельных обделок. Дальнейшие исследования будут направлены на выполнение лабораторных (модельных) экспериментов по оценке эффективности применения Z-образных сегментов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Павленков, М.Н., Павленков, И.М. Направления и приоритеты развития муниципального образования // Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2025. Т. 15. № 8-1. С. 541–549. DOI: 10.34670/AR.2025.82.64.057. EDN: QCIZGA
2. Федунец, Б.И., Бойко, Ф.А. Повышение эффективности строительства перегонных тоннелей метрополитенов тоннелепроходческими механизированными комплексами // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2014. № 5. С. 115–121. EDN: SCVOPT
3. Tarakanova, V.V., Romanenko, A.I., Buriy, A.I. Prevention and elimination of emergency situations during the construction and operation of metro structures // International Journal of Advanced Studies. 2023. V. 13. № 1–2. P. 7–19. DOI: 10.12731/2227-930X-2023-13-1-2-7-19. EDN: PFCPLN
4. Маковский, Л.В., Кравченко, В.В. Подводные транспортные тоннели в Сибири и на Дальнем Востоке // Метро и тоннели. 2024. № 1. С. 28–29. EDN: CNXSTO
5. Маковский, Л.В., Кравченко, В.В. Современное состояние и перспективы строительства горных транспортных тоннелей // Транспортное строительство. 2022. № 1. С. 29–32. EDN: UIDWDM

6. Боброва, Т.В. Обоснование эффективности инноваций в транспортном строительстве. Омск : Изд-во СибАДИ, 2019. 52 с. EDN: ZBMMCD
7. Меркин, В.Е., Устинов, Д.В., Хохлов, И.Н. Способы усиления тоннельных обделок и оценка их эффективности // Транспортное строительство. 2023. № 2. С. 19–22. EDN: BSULTC
8. Русанов, В.Е. Определение прочностных и деформативных свойств сталефибробетона для расчета тоннельных обделок // Вестник МГСУ. 2010. № 2. С. 189–197. EDN: MUXQJJ
9. Гуськов, И.А., Пестрякова, Е.А. Численное исследование сейсмостойкости сборных тоннельных обделок кругового очертания // Транспортные сооружения. 2023. Т. 10. № 2. DOI: 10.15862/02SATS223. EDN: IBIDYQ
10. Сокольников, А.А., Коньков, А.Н., Веселов, В.В. Оценка гибкости тоннельных обделок подковообразного и кругового очертания при расчете на внецентренное сжатие // Путь навигатор. 2021. № 48 (74). С. 28–35. EDN: CZPVXV
11. Иванов, В.Н., Шмелева, А.А. Геометрические характеристики деформированного состояния оболочек с ортогональной системой координат срединной поверхности // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2020. Т. 16. № 1. С. 38–44. DOI: 10.22363/1815-5235-2020-16-1-38-44. EDN: RCKRJR
12. Никоноров, Р.Н., Русанов, В.Е. Учет пригрузки забоя в расчетах осадки земной поверхности при щитовой проходке тоннелей в дисперсных грунтах // Транспортное строительство. 2023. № 4. С. 35–38. EDN: JCBWWU

REFERENCES

1. Pavlenkov, M.N., Pavlenkov, I.M. Directions and Priorities of Municipal Education Development. *Ekonomika: vchera, segodnya, zavtra*. 2025; 15(8-1): 541–549. DOI: 10.34670/AR.2025.82.64.057. EDN: QCIZGA (In Russian)
2. Fedunets, B.I., Boyko, F.A. Efficiency Improvement of Subway Tunnel Construction by Tunnel-Boring Mechanized Systems. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2014; 5: 115–121. EDN: SCVOPT (In Russian)
3. Tarakanova, V.V., Romanenko, A.I., Buriy, A.I. Prevention and Elimination of Emergency Situations during the construction and Operation of Metro Structures. *International Journal of Advanced Studies*. 2023; 13(1-2): 7–19. DOI: 10.12731/2227-930X-2023-13-1-2-7-19. EDN: PFCPLN
4. Makovskiy, L.V., Kravchenko, V.V. Underwater Transport Tunnels in Siberia and the Far East. *Metro i tonneli*. 2024; 1: 28–29. EDN: CNXSTO (In Russian)
5. Makovskiy, L.V., Kravchenko, V.V. The Current State and Prospects of Construction of Mining Transport Tunnels. *Transportnoe stroitel'stvo*. 2022; 1: 29–32. EDN: UIDWDM (In Russian)
6. Bobrova, T.V. Effectiveness Substantiation of Innovations in Transport Construction. Омск, 2019. 52 p. (In Russian)
7. Merkin, V.E., Ustinov, D.V., Khokhlov, I.N. Methods of Reinforcing Tunnel Lining and Evaluating their Effectiveness. *Transportnoe stroitel'stvo*. 2023; 2: 19–22. EDN: BSULTC (In Russian)
8. Rusanov, V.E. Determination of Strength and Deformation Properties of Steel Fiber Concrete for Tunnel Lining. *Vestnik MGSU*. 2010; 2: 189–197. EDN: MUXQJJ (In Russian)
9. Guskov, I.A., Pestryakova, E.A. Numerical study of seismic resistance of prefabricated tunnel lining of circular shape. *Transportnye sooruzheniya*. 2023; 10(2). DOI: 10.15862/02SATS223. EDN: IBIDYQ (In Russian)
10. Sokornov, A.A., Konkov, A.N., Veselov, V.V. Assessment of Flexibility of Horseshoe-Shaped and Circular Tunnel Linings in Off-Center Compression Analyses. *Putevoi navigator*. 2021; 48(74): 28–35. EDN: CZPVXV (In Russian)
11. Ivanov, V.N., Shmeleva, A.A. Geometric Characteristics of Deformed State of Shells with an Orthogonal Coordinate System on the Mid-Surface. *Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruktсий i sooruzhenii*. 2020; 16(1): 38–44. DOI: 10.22363/1815-5235-2020-16-1-38-44. EDN: RCKRJR (In Russian)
12. Nikonorov, R.N., Rusanov, V.E. Accounting for Face Load in Calculations of Ground Settlement during Shield Tunneling in Loose Soils. *Transportnoe stroitel'stvo*. 2023; 4: 35–38. EDN: JCBWWU (In Russian)

Сведения об авторах

Елизаров Алексей Сергеевич, аспирант, Тихоокеанский государственный университет, 680035, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136, 2023105212@togudv.ru

Павликов Алексей Борисович, преподаватель, Тихоокеанский государственный университет, 680035, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136, 012429@togudv.ru

Каменчуков Алексей Викторович, канд. техн. наук, доцент, Тихоокеанский государственный университет, 680035, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136, 006641@togudv.ru

Пиотрович Алексей Анатольевич, докт. техн. наук, профессор, Дальневосточный государственный университет путей сообщения, 680021, г. Хабаровск, ул. Серышева, 47, piotrovich@rambler.ru

Authors Details

Aleksey S. Elizarov, Research Assistant, Pacific National University, 136, Tikhookeanskaya Str., 680035, Khabarovsk, Russia, 2023105212@togudv.ru

Aleksey B. Pavlikov, Lecturer, Pacific National University, 136, Tikhookeanskaya Str., 680035, Khabarovsk, Russia, 012429@togudv.ru

Aleksey V. Kamenchukov, PhD, A/Professor, Pacific National University, 136, Tikhookeanskaya Str., 680035, Khabarovsk, Russia, 006641@togudv.ru

Aleksey A. Piotrovich, DSc, Professor, Far Eastern State Transport University, 47, Seryshev Str., 680021, Khabarovsk, Russia, piotrovich@rambler.ru

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

The authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 26.02.2026
Одобрена после рецензирования 18.03.2026
Принята к публикации 20.03.2026

Submitted for publication 26.02.2026
Approved after review 18.03.2026
Accepted for publication 20.03.2026