УДК 624.1

М.С. Плешко, М.В. Плешко, И.В. Войнов

ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ТОННЕЛЕЙ С БОЛЬШИМ СРОКОМ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Рассмотрена проблема оценки технического состояния тоннелей с большим сроком эксплуатации. Приведен пример статического расчета обделки методом конечных элементов. Тоннель закреплен многослойной обделкой, состоящей из внутреннего слоя каменной кладки и наружного слоя набрызгбетона, возведенного при реконструкции тоннеля. Выявлены значительные отклонения фактической прочности бетона обделки от проектных значений, а также деформации земной поверхности. Установлено, что влияние неоднородности прочности материала обделки приводит к снижению ее запаса несущей способности в среднем на 17,3%. Моделирование фактического строения породного массива с зонами просадки несвязных грунтов снижает запас несущей способности обделки на 14,8%. Такая оценка не всегда позволяет своевременно выявить опасные процессы в рассматриваемой геотехнической системе и реализовать эффективные защитные мероприятия. В этом случае целесообразно использовать информационное моделирование на основе BIM-технологий. Предложена последовательность оценки технического состояния тоннеля при информационном моделировании.

Ключевые слова: тоннель, техническое состояние, эксплуатация, обделка, земная поверхность, породный массив, прочность, моделирование.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-1-0-34-40

Железнодорожные тоннели относятся к наиболее сложным и ответственным объектам транспортной инфраструктуры. Используемые в них конструкции и материалы должны обеспечивать срок службы тоннелей не менее 100 лет и межремонтные интервалы — не менее 50 лет [1].

В Российской Федерации функционируют ряд железнодорожных тоннелей, построенных во второй половине XIX, начале XX века. Срок их службы уже сегодня превышает нормативные показатели. Они продолжат эксплуатироваться и в среднесрочной перспективе.

Примером таких сооружений являются тоннели Крымской железной дороги. По трассе Симферополь — Севастополь пройдены 6 железнодорожных тоннелей протяженностью от 100 до 616 м. Проходка тоннелей осуществлялась в период с 1874 по 1978 гг. Первоначально все тоннели закреплены каменной кладкой. В дальнейшем они неоднократно реконструировались и подвергались капитальному ремонту. В процессе эксплуатации возникали различные аварийные ситуации, связанные с природными и техногенными факторами, несколько тоннелей были частично разрушены в годы Великий Отечественной войны.

Их текущее состояние характеризуется сверхнормативным износом конструкций, влиянием изменяющихся при-

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. № 1. С. 34–40.
© М.С. Плешко, М.В. Плешко, И.В. Войнов. 2018.

родно-техногенных факторов, уплотняющейся застройкой земной поверхности, увеличением транспортных нагрузок и др. В связи с этим правильная оценка технического состояния подобных тоннелей представляет собой сложную техническую задачу.

Ее важность подтверждается разработкой и введением в действие с 01.04.2017 г. нового нормативного документа — ГОСТ Р 57208-2016 «Тоннели и метрополитены. Правила обследования и устранения дефектов и повреждений при эксплуатации», в котором изложены основные требования по оценке технического состояния и выбора способа восстановления проектных характеристик конструкций транспортных тоннелей и метрополитенов при эксплуатации.

Данным документом впервые вводится требование по трехэтапной проверке несущей способности конструкций тоннеля:

Этап 1. Расчет проектного напряженно-деформационного состояния конструкций тоннелей и метрополитенов по их проектным характеристикам.

Этап 2. Расчет фактического напряженно-деформированного состояния конструкций объекта с учетом результатов обследования его технического состояния и состояния заобделочного пространства (дефекты конструкций и контактного слоя «грунт–обделка», воздействия нового строительства, ремонтно-восстановительных работ или реконструкции объекта.

Этап 3. Расчет фактического напряженно-деформированного состояния конструкций тоннелей и метрополитенов с учетом результатов обследования технического состояния конструкций, состояния заобделочного пространства и воздействия проектируемого объекта городской инфраструктуры.

Последний этап необходим в случае проектирования и строительства объекта городской инфраструктуры, способного оказать влияние на эксплуатируемый тоннель.

Реализация второго этапа вызывает необходимость рассмотрения сложной геотехнической системы «застроенная земная поверхность — техногенно измененный, неоднородный породный массив — многослойная обделка нерегулярного сопротивления» на основе данных комплексного обследования тоннеля. Статический расчет такой системы возможен в основном приближенными численными методами, например, методом конечных элементов [2—4].

Рассмотрим пример такого моделирования, выполненного по данным обследования одного из тоннелей Крымской железной дороги.

Тоннель закреплен многослойной обделкой, состоящей из внутреннего слоя известняковой каменной кладки и наружного слоя набрызгбетона, возведенного при реконструкции тоннеля.

В результате обследования выявлены следующие основные дефекты по трассе тоннеля:

1. Значительные отклонения фактической прочности бетона обделки от проектных значений (рис. 1).

2. Деформации земной поверхности и верхних грунтовых слоев с образованием над тоннелем мульды оседания из несвязного грунта.

В соответствии с исходными данными и выявленными дефектами разработаны две плоских численных модели тоннеля для выполнения первого и второго этапов проверки несущей способности обделки. Модели имели прямоугольную форму шириной 66 м и высотой 48 м, что обеспечило исключение влияния граничных условий на участок обделки тоннеля и окружающий породный массив.

При построении сетки конечно-элементной модели использован принцип совмещения густой и укрупненной сеток. Сечение обделки разбивалась на сетку

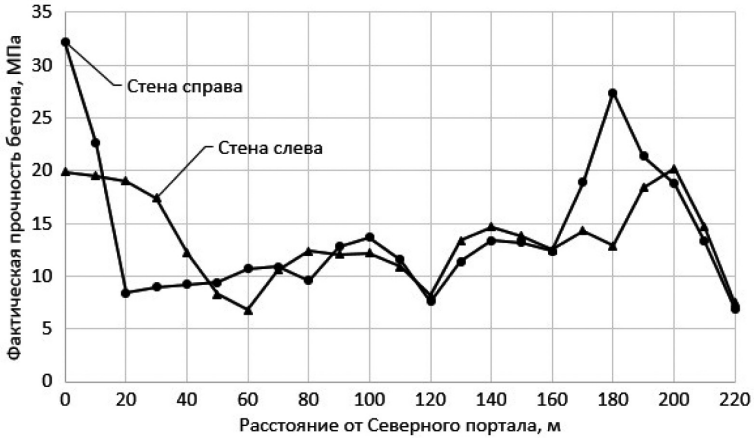

Рис. 1. Графики изменения фактической прочности бетона наружного слоя обделки по длине тоннеля

плоских (трехугольных и четырехугольных) конечных элементов (КЭ) с размером грани 10—20 см. Породный массив представлен в виде сетки плоских КЭ с постепенным увеличением размера граней от 20 до 30 см.

Окружающий тоннель породный массив принят по данным инженерно-геологического разреза неоднородным с учетом наличия на втором этапе зоны просадки несвязного грунта над тоннелем.

Обделка замоделирована многослойной: наружный слой — каменная кладка с приведенной приведенной средней прочностью, внутренний слой — монолитный набрызгбетон с изменяющейся на втором этапе по длине тоннеля фактической прочностью.

Задача рассматривалась в дополнительных напряжениях со следующими граничными условиями: по боковым и нижней граням модели заданы ограничения в смещениях по нормали к граням. Для КЭ обделки задан режим учета собственного веса. Нагрузки от горного давления приложены в виде равномерно распределенной на внешний контур обделки. Кратковременная нагрузка от подвижного состава приложена к верхней грани почвы тоннеля с учетом грузовой площади балластного слоя.

Задача решалась в упругопластической постановке. Граница перехода грунта в пластическое состояние определялась по условию разрушения Кулона-Мора.

Сбор нагрузок производился в соответствии с рекомендациями раздела 5.5 СП [1]. Собственный вес обделки определялся автоматизировано в программном комплексе на основе расчетного удельного веса материала обделки и ее фактической геометрии.

В результате расчета модели получены все компоненты напряженно-деформированного состояния конечных элементов и узлов. Далее определялись главные напряжения в элементах обделки и массива.

На рис. 2 представлены изополя главных напряжений σ_3 в тоннельной обделке и окружающем породном массиве (2 этап).

На рис. 3 представлены изополя вертикальных перемещений узлов тоннельной обделки и окружающего породного массива.

В таблице представлены сводные результаты расчета обделки.

Анализ полученных данных показал, что учет на втором этапе факторов, определяющих техническое состояние тоннеля и окружающих сред, позволяет более

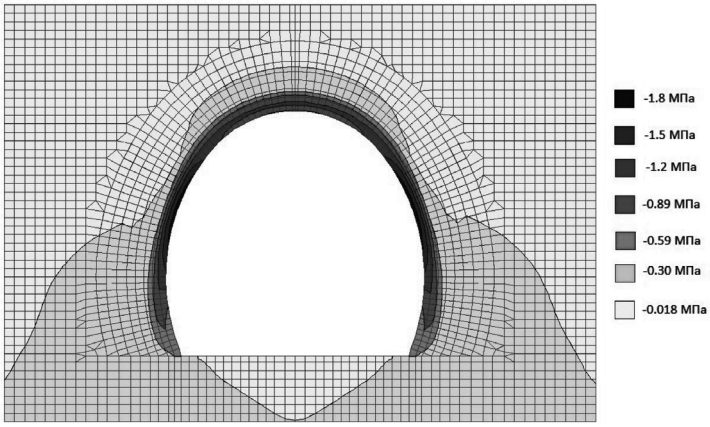

Рис. 2. Изополя главных напряжений σ_3 в тоннельной обделке и окружающем породном массиве

точно оценить запас несущей способности обделки.

В частности, установлено следующее:

• неоднородность прочности материала обделки приводит к снижению ее запаса несущей способности в среднем на 17,3%;

• моделирование фактического строения породного массива с зонами просадки несвязных грунтов снижает запас несущей способности обделки по сравнению с ненарушенным массивом на 14,8%.

В то же время поэтапный подход к оценке технического состояния тоннеля не всегда позволяет своевременно выявить опасные процессы в рассматриваемой геотехнической системе и реализовать эффективные защитные мероприятия. Необходимо не просто рассмотрение отдельных стадий эксплуатации тоннеля, а информационное моделирование всего жизненного цикла объекта путем создания информационной модели с применением BIM — технологий [5—11].

В настоящее время BIM-технологии активно внедряются во многих областях проектирования промышленных, гражданских и транспортных объектов. Их преимущества общеизвестны, но при-

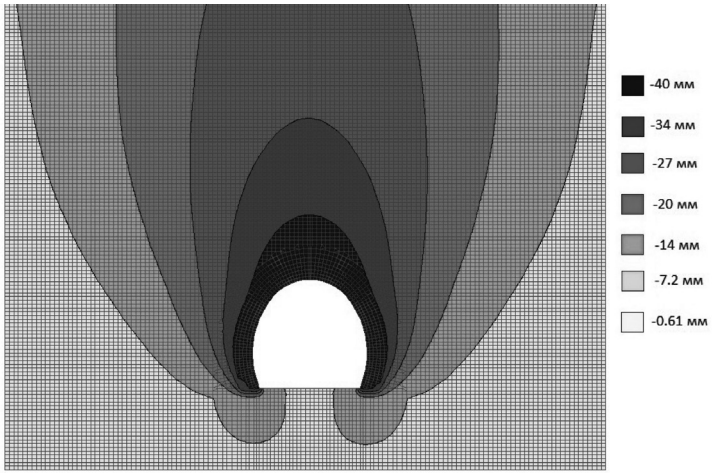

Рис. 3. Изополя вертикальных перемещений узлов тоннельной обделки и окружающего породного массива

Результаты расчета обделки (сжимающие напряжения приняты отрицательными)

Элемент конструкции обделки	Максимальные главные напряжения σ_3, МПа	Максимальные главные напряжения σ_1, МПа	Максимальные перемещения обделки, мм
Свод	-1,43	-0,09	-40,27 (вертикальные)
Левая стена	-1,84	0,229	-2,05 (горизонтальные)
Правая стена	-1,72	0,226	-2,05 (горизонтальные)

менительно к железнодорожным тоннелям с большим сроком службы и подобным им объектам не всегда очевидны. Если при проектировании обычных зданий и сооружений мы рассматриваем конструкции с известными проектными характеристиками, то в данном случае нужно корректно описать сложную природно-техногенную систему, подверженную влиянию изменчивых факторов.

Общий алгоритм оценки и поддержания работоспособного технического состояния тоннеля с применением BIM-технологий должен включать следующие этапы:

• Проведение необходимых инженерно-геологических и геофизических изысканий по трассе тоннеля.

• Разработку и внедрение системы мониторинга конструкций тоннеля. Сбор и анализ данных [12].

• Регулярный контроль тоннеля путеизмерительным вагоном (типа ЭРА).

• Создание цифровой модели тоннеля, наполнение ее данными, регулярное обновление и проверочные расчеты.

• Разработку и реализация необходимых ремонтных мероприятий.

Такой подход потребует выполнения достаточно дорогостоящих исследований с привлечением высококвалифицированных специалистов.

Сам процесс информационного моделирования является трудоемким, требующим применения специализированных программных средств, а также высокопроизводительной компьютерной техники.

Поэтому в современных условиях он может быть рекомендован в наиболее ответственных тоннелях с большим сроком эксплуатации и сверхнормативным износом конструкций, а также на объектах, где ранее происходили достаточно крупные аварии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Российская Федерация. Свод правил (2013). СП 122.13330.2012. Тоннели железнодорожные и автодорожные. Актуализированная редакция СНиП 32-04-97. — М., 2012. — 132 с.

2. *Плешко М.С.* Анализ напряженного состояния безбалластной конструкции верхнего строения пути и обделки железнодорожного тоннеля // Инженерный вестник Дона. — 2015. — № 1 (ч. 2). URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1p2y2015/2831.

3. *Прокопов А.Ю.*, *Прокопова М.В.*, *Ротенберг М.А.* Математическое моделирование взаимовлияния автодорожного тоннельного комплекса № 6—6а и действующего железнодорожного тоннеля № 5 в г. Сочи // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2013. — ОВ 7. Освоение подземного пространства мегаполисов. — С. 101—109.

4. *Pleshko M.S.*, *Stradanchenko S.G.*, *Maslennikov S.A.*, *Pashkova O.V.* Study of technical solutions to strengthen the lining of the barrel in the zone of influence of construction near-wellbore production // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2015. Vol. 10., no 1, January. Pp. 14—19.

5. *Скворцов А.В.* Нормативно-техническое обеспечение BIM автомобильных дорог // САПР и ГИС автомобильных дорог. — 2014. — № 2(3). — С. 22—32.
6. *Daller J., Žibert M., Exinger C., Lah M.* Implementation of BIM in the tunnel design — Engineering consultant's aspect. Geomechanics and Tunnelling. 2016. Vol. 9. pp. 674—683.
7. *Wang J., Hao X., Gao X.* The application of BIM technology in the construction of Hangzhou Zizhi tunnel. 3rd International Conference on Mechatronics, Robotics and Automation (ICMRA 2015). pp. 195 — 204.
8. *Jian-ping Z., Ding L., Jia-rui L.* Application of BIM in engineering construction [J]. Construction Technology, 2012, 41(371). pp. 10—14.
9. *You-quan X., Liu Xin L.* Study on flat organization structure of the large construction projects based on BIM[J]. Journal of Engineering Management, 2013, 27(1). pp. 44—47.
10. *Heikkilä R., Kaaranka A., Makkonen T*. Information Modelling based Tunnel Design and Construction Process. The 31st International Symposium on Automation and Robotics in Construction and Mining (ISARC 2014). pp. 672—675.
11. *Shen X., Lu M., Mao S., Wu X.* Integrated Approach to Machine Guidance and Operations Monitoring in Tunnel Construction The 31st International Symposium on Automation and Robotics in Construction and Mining (ISARC 2014). pp. 103—109.
12. *Страданченко С.Г.*, *Плешко М.С.*, *Армейсков В.Н.* О необходимости проведения комплексного мониторинга подземных объектов на различных стадиях жизненного цикла // Инженерный вестник Дона. — 2013. — № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1994. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Плешко Михаил Степанович[1] — доктор технических наук,
доцент, профессор, e-mail: mixail-stepan@mail.ru,
Плешко Марианна Викторовна[1] — кандидат технических наук,
доцент,
Войнов Иван Вячеславович[1] — аспирант,
[1] Ростовский государственный университет путей сообщения.

ISSN 0236-1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018. No. 1, pp. 34–40.

M.S. Pleshko, M.V. Pleshko, I.V. Voynov

ESTIMATION OF TECHNICAL STATE OF LONG-TERM SERVICE RAILWAY TUNNELS

The issues of estimation of railway tunnels being in service for a long time are discussed. Such tunnels were constructed in Russia in the first half of the 19th century and early in the 20th century. It is required to estimate technical state of such objects in order to understand the actual condition of the structure, surrounding rock mass and ground surface. The static design of the tunnel lining uses the finite element method. The article gives an example of the static design. A tunnel has a multi-layer lining composed of the outback stone masonry layer and the surface shotcrete layer applied during the tunnel reconstruction.

The studies reveal essential deviation of the lining concrete strength from the design values and point at the ground surface deformation. It is found that the nonuniformity of the lining strength results in the reduction of the load-bearing capacity of the lining by 17.3 % on average. Modeling of the factual condition of rock mass with the subsidence zones in incoherent ground yields the load-bearing capacity reduction by 14.8 %.

At the same time, the described estimation might fail to reveal and promptly prevent hazardous processes in the specified structure. In this case, it is expedient to use information modeling based on BIM technologies which need improvement to be applied to railway tunnels. It is suggested to carry out information modeling of a tunnel state by steps: geological and geophysical surveying along the tunnel; development and introduction of structural monitoring system in the tunnel, acquisition

and processing of monitoring data; regular tunnel control using a track geometry measurement car; digital modeling of the tunnel, regular updating of the model and check calculations; development and implementation of maintenance and repair package.

Key words: tunnel, technical state, operation, lining, ground surface rock mass, strength, modeling.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-1-0-34-40

AUTHORS

Pleshko M.S.[1], Doctor of Technical Sciences,
Assistant Professor, Professor,
e-mail: mixail-stepan@mail.ru,
Pleshko M.V.[1], Candidate of Technical Sciences,
Assistant Professor,
Voynov I.V.[1], Graduate Student,
[1] Rostov State Transport University,
344038, Rostov-on-Don, Russia.

REFERENCES

1. *Rossiyskaya Federatsiya. Svod pravil (2013), pp. 122.13330.2012. Tonneli zheleznodorozhnye i avtodorozhnye. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 32-04-97* (Russian Federation. Rulebook (2013). SP 122.13330.2012. Tunnels, rail and road. The updated edition of SNiP 32-04-97), Moscow, 2012, 132 p.

2. Pleshko M.S. *Inzhenernyy vestnik Dona*. 2015, no 1, part 2, available at: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1p2y2015/2831.

3. Prokopov A.Yu., Prokopova M.V., Rotenberg M.A. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2013, Special edition 7, pp. 101—109.

4. Pleshko M.S., Stradanchenko S.G., Maslennikov S.A., Pashkova O.V. Study of technical solutions to strengthen the lining of the barrel in the zone of influence of construction near-wellbore production. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2015. Vol. 10., no 1, January, pp. 14—19.

5. Skvortsov A.V. *SAPR i GIS avtomobil'nykh dorog*. 2014, no 2(3), pp. 22—32.

6. Daller J., Žibert M., Exinger C., Lah M. Implementation of BIM in the tunnel design Engineering consultant's aspect. *Geomechanics and Tunnelling*. 2016. Vol. 9. pp. 674—683.

7. Wang J., Hao X., Gao X. The application of BIM technology in the construction of Hangzhou Zizhi tunnel. *3rd International Conference on Mechatronics, Robotics and Automation (ICMRA 2015)*. pp. 195—204.

8. Jian-ping Z., Ding L., Jia-rui L. Application of BIM in engineering construction [J]. *Construction Technology*, 2012, 41(371). pp. 10—14.

9. You-quan X., Liu Xin L. Study on flat organization structure of the large construction projects based on BIM[J]. *Journal of Engineering Management*, 2013, 27(1). pp. 44—47.

10. Heikkilä R., Kaaranka A., Makkonen T. Information Modelling based Tunnel Design and Construction Process. *The 31st International Symposium on Automation and Robotics in Construction and Mining (ISARC 2014)*. pp. 672—675.

11. Shen X., Lu M., Mao S., Wu X. Integrated Approach to Machine Guidance and Operations Monitoring in Tunnel Construction. *The 31st International Symposium on Automation and Robotics in Construction and Mining (ISARC 2014)*. pp. 103—109.

12. Stradanchenko S.G., Pleshko M.S., Armeyskov V.N. *Inzhenernyy vestnik Dona*. 2013, no 4, available at: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1994.

FIGURES

Fig. 1. Variation in the actual strength of the surface concrete layer in the lining along the tunnel.
Fig. 2. Isofields of principal stresses σ3 in the lining and adjacent rock mass.
Fig. 3. Isofields of vertical displacements of at the test points in the lining and adjacent rock mass.

TABLE

Lining design results (compressive stresses are assumed negative).