

УДК: 691.168
DOI: 10.52409/20731523_2023_4_286
EDN: VEUF1Y



Исследование долговечности железобетонных блоков обделки тоннелей на примере казанского метрополитена

Д.С. Смирнов¹, Я.А. Фомина¹

¹Казанский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация. Объектом исследования являются блоки обделки тоннелей казанского метрополитена. Метро является сооружением, имеющим важнейшую хозяйственную значимость. Потому к нему предъявляются повышенные требования по долговечности. Долговечность сооружений в свою очередь зависит от долговечности строительных материалов, из которых они изготовлены. Целью работы является оценка фактической прочности бетона в тоннелях Казанского метрополитена изготовленных в разный период и построение кинетической кривой изменения прочности во времени. Задачами исследования являются: формирование базы данных контролируемых параметров и создание на их основе прогностической модели изменения характеристик конструкции в процессе эксплуатации.

Результаты. В работе была получена функция, которая дает возможность предсказать изменение прочности железобетонных блоков обделки Казанского метрополитена в процессе эксплуатации. Анализируя данные за 22-летний период эксплуатации, было обнаружено увеличение прочности на 20,8% по отношению к проектному показателю. Этот результат свидетельствует о положительной динамике долговечности железобетонных конструкций и указывает на их продолжительное использование в будущем.

Выводы. Результаты проведенного исследования позволят сделать вывод, что долговечность рассматриваемых железобетонных блоков обделки зависит от технического состояния их элементов.

Ключевые слова: метрополитен, тоннель, блоки обделки, прочность, бетон

Для цитирования: Смирнов Д.С., Фомина Я.А. Исследование долговечности железобетонных блоков обделки тоннелей на примере казанского метрополитена // Известия КГАСУ, 2023, № 4(66), с. 286-293, DOI: 10.52409/20731523_2023_4_286, EDN: VEUF1Y

Study of the durability of reinforced concrete blocks for tunnel lining on the example of the Kazan Metro

Smirnov D.S.¹, Fomina Y.A.¹

¹Kazan State University of Architecture and Engineering,
Kazan, Russian Federation

Abstract. The object of the study is the lining blocks of the tunnels of the Kazan metro. The metro is a structure of major economic importance. Therefore, increased durability requirements are imposed on it. The durability of structures, in turn, depends on the durability of the building materials from which they are made. The purpose of the work is to assess the actual strength of concrete in the Kazan metro tunnels manufactured in different periods and to construct a kinetic curve of changes in strength over time. The objectives of the study are the formation of a database of controlled parameters and the creation on their basis of a predictive model of changes in the characteristics of the structure during operation.

Results. The work obtained a function that makes it possible to predict the change in the strength of reinforced concrete blocks of the lining of the Kazan metro during operation. Analyzing the data for the 22-year period of operation, an increase in strength by 20.8% was found in relation to the design indicator. This result testifies to the positive dynamics of the durability of reinforced concrete structures and indicates their long-term use in the future.

Conclusions. The results of the study allow us to conclude that the durability of the considered reinforced concrete lining blocks depends on the technical condition of their elements.

Keywords: metro, tunnels, lining blocks, strength, concrete

For citation: Smirnov D.S., Fomina Y.A. Study of the durability of reinforced concrete blocks for tunnel lining on the example of the Kazan Metro // News KSUAE, 2023, № 4(66), p. 286-293, DOI: 10.52409/20731523_2023_4_286, EDN: VEUFY

1. Введение

Метрополитен это экологичный и безопасный вид транспорта. В крупных городах по объему пассажирских перевозок он превышает альтернативные виды городского общественного транспорта. Первая линия метро, протяженностью 6 км, проложенная в 1863 году в Лондоне, строилась со значительными перерывами в течение 8 лет. Более того на согласование этого революционного на тот момент проекта, потребовалось около 25 лет. На сегодняшний день общая протяженность линий метро во всем мире составляет более 11000 км, а скорость прокладки одной линии составляет в среднем 3 км в год. По мере развития технологии строительства метрополитенов, совершенствовались и применяемые материалы. Прогрессивные технологии в области производства бетона позволили со временем заменить дорогостоящие чугунные тубинги на железобетонные. На сегодняшний день, за счет использования инновационных технологий и материалов, возможно обеспечение бетону таких физико-механических характеристик, которые позволят отказаться и от оклеечной гидроизоляции наносимой на наружный контур кольца обделки тоннеля [1-3].

Метрополитены относятся к уникальным объектам, срок службы которых должен составлять не менее 100 лет. Следовательно, материалы, из которых выполнены данные сооружения, должны обладать высокой долговечностью и надежностью [4-6]. В процессе эксплуатации на конструкции метро оказывают влияние внешняя среда, а также силовые факторы, такие как давление грунта и динамическое воздействие от подвижного состава. Поэтому крайне важно осуществлять мониторинг состояния конструкций метрополитена, и особенно тоннелей, внешний визуальный осмотр которых затруднен. Необходимо своевременно фиксировать наличие деструктивных процессов в материале, изменение критических характеристик, правильно устанавливать причины наблюдаемых явлений и по возможности устранять их. Необходимая долговечность может быть обеспечена только при соблюдении правил проектирования, технологии производства строительно-монтажных работ, а также применении качественных, современных материалов [7-9].

Бетон это конструкционный материал, поэтому прочность является одной из главных его характеристик, а для железобетонной обделки тоннеля является наиболее значимой при оценке долговечности и дальнейшего прогнозирования сроков службы, т.к. циклических температурных переходов через ноль градусов в тоннелях метрополитена в большинстве случаев не наблюдается [10].

Целью данной работы является оценка фактической прочности бетона в тоннелях Казанского метрополитена изготовленных в разный период и построение кинетической кривой изменения прочности во времени.

Для достижения указанной цели поставлены следующие задачи: определение наиболее значимых внешних воздействий, влияющих на работоспособность конструкций; выбор методов оценки значимых характеристик для построения кривой прогноза; формирование базы данных контролируемых параметров и создание на их основе прогностической модели изменения характеристик конструкции в процессе эксплуатации.

2. Материалы и методы

Предметом исследования были железобетонные блоки обделки (тубинги) тоннелей Казанского метрополитена, произведённые в 2001-2022 годах на заводе ЖБИ (железобетонные изделия) «Казметрострой» (рис.1).

В соответствии с нормативной и проектной документацией: блоки должны изготавливаться из бетона класса В45 и по водонепроницаемости W10 с допускаемыми отклонениями в определенных размерах и арматурной сталью классов А240 (А-1), А400 (А-III). Бетонная смесь для блоков должна включать не менее двух фракций крупного заполнителя (например, 5-10 и 10-20 мм), мелкий заполнитель с модулем крупности $M = 2...3$; предел прочности при сжатии крупного заполнителя должен быть не ниже 1200. Разработанный состав бетона включает, помимо цемента, мелкого и крупного заполнителя и воды, полифункциональный модификатор из суперпластификатора и ускорителя твердения. Помимо соотношения компонентов, к составу бетона предъявляются требования к применению портландцемента бездобавочного марок 500 и 600 определенного минералогического состава трех заводов России, крупного заполнителя одного – Шершневого месторождения. В качестве мелкого заполнителя рекомендовано использовать местный песок, возможность применения которого доказана в процессе испытаний свойств бетона. Подобранный состав бетона обеспечивает получение класса бетона по прочности при сжатии не ниже В45, по морозостойкости F300 и водонепроницаемости W12. [6,7]

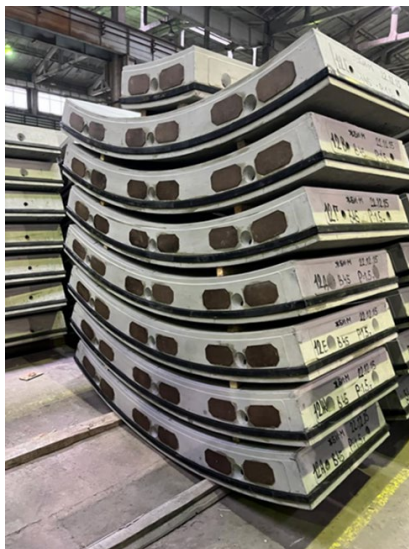


Рис. 1. – Железобетонные блоки обделки тоннелей (иллюстрация авторов)
Fig. 1. – Reinforced concrete blocks for tunnels lining (illustration by the authors)

При формировании базы данных прочностных характеристик проводилось по 20 измерений на каждом участке входной зоны тоннелей казанского метрополитена (использовались входные зоны от станции метро Кремлёвская до станции Дубравная) в каждом направлении (рис. 2) в соответствии с ГОСТ 2269-2015. Для получения данных использовался измеритель прочности бетона ИПС-МГ4.01 – это прибор, определяющий прочность бетона неразрушающим механическим методом [8].

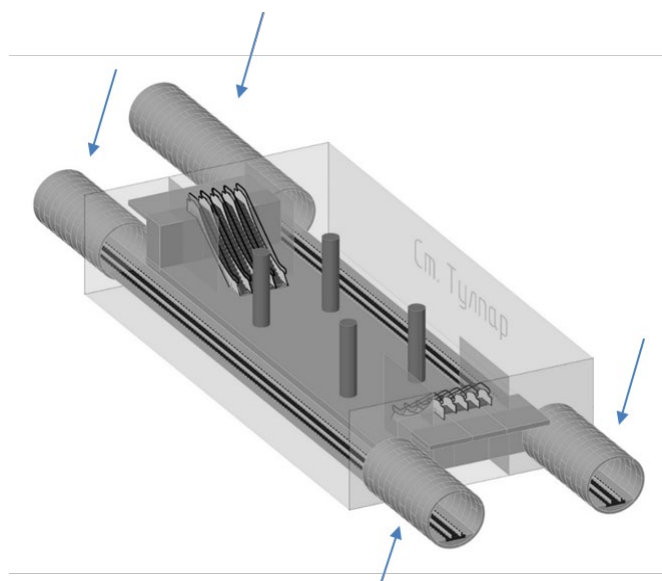


Рис.2. Модель станции метро и входных зон тоннелей (стрелками указаны места снятия прочностных характеристик блоков)
(иллюстрация авторов)

Fig.2. Model of the metro station and the entrance areas of tunnels (arrows indicate the places where the strength characteristics of the blocks are taken)
(illustration by the authors)

3. Результаты и обсуждение

На основании сформированной базы данных рассчитаны для каждого блока определенного возраста средние показатели прочности $R_{ср}$ (МПа) и среднеквадратические отклонения σ (МПа). [9-11] Данные показатели отражены в таблице.

Таблица 1

Рассчитанные показатели железобетонных блоков

Возраст блока, лет	$R_{ср}$, МПа	σ , МПа
1	59,22	3,13
4	62,41	3,41
5	67,40	6,57
15	69,17	6,36
16	68,02	5,45
18	68,75	6,70
19	70,59	6,27
20	68,94	6,70
21	68,64	6,06
22	69,80	6,02

Также построен график изменения прочности бетона на протяжении 22 летнего срока эксплуатации тубингов тоннелей. Для построения графика был использован программный комплекс MathCAD. [12]

Последовательность построения представлена ниже:

1. Построение функции изменения прочности бетона согласно рассчитанным данным.

$$X := \begin{pmatrix} 1 \\ 4 \\ 5 \\ 15 \\ 16 \\ 18 \\ 19 \\ 20 \\ 21 \\ 22 \end{pmatrix} \quad Y := \begin{pmatrix} 59.22 \\ 62.41 \\ 67.40 \\ 69.17 \\ 68.02 \\ 68.75 \\ 70.59 \\ 68.94 \\ 68.64 \\ 69.80 \end{pmatrix} \quad s := \begin{pmatrix} 3.31 \\ 3.41 \\ 6.57 \\ 6.36 \\ 5.45 \\ 6.70 \\ 6.27 \\ 6.70 \\ 6.06 \\ 6.02 \end{pmatrix}$$

2. Построение аппроксимирующей кривой F при помощи функции $\text{pwrfit}(vx, vy, vg)$. Данная функция возвращает вектор, содержащий коэффициенты кривой мощности вида $a \cdot x^b + c$, которая наилучшим образом аппроксимирует данные в векторах vx и vy . Вектор vg содержит начальные приближения для этих трех коэффициентов. [13]

$$K = \text{pwrfit} \left[X, Y, \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \right] \quad (1)$$

$$K = \begin{pmatrix} 1.252 \cdot 10^6 \\ 2.65 \cdot 10^{-6} \\ -1.252 \cdot 10^6 \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$F = K_0 \cdot X^{K_1} + K_2 \quad (3)$$

3. Функции доверительных интервалов $F1$ и $F2$ были построены следующим образом:

$$N := 20$$

$$\alpha := 0.1$$

$$qt \left(1 - \frac{\alpha}{2}, N - 1 \right) = 1.729 \quad (4)$$

$$\varepsilon := qt \left(1 - \frac{\alpha}{2}, N - 1 \right) \cdot \frac{s}{\sqrt{N}} \quad (5)$$

$$K1 = \text{pwrfit} \left[X, s, \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \right] \quad (6)$$

$$K1 = \begin{pmatrix} 5.158 \cdot 10^5 \\ 2.009 \cdot 10^{-6} \\ -5.158 \cdot 10^5 \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$\varepsilon := K1_0 \cdot X^{K1_1} + K1_2 \quad (8)$$

$$F1 := F + \varepsilon \quad (9)$$

$$F2 := F - \varepsilon \quad (10)$$

4. Функция $F3$ представляет собой проектное значение прочности бетона равное 57,8 МПа (класс бетона В45) [14-15].

В результате был построен следующий график, представленный на рисунке 3.



Рис. 3. - График изменения прочности блоков тоннелей Казанского метрополитена (иллюстрация авторов)

Fig. 3. - Graph of changes in the strength of the blocks of tunnels of the Kazan metro (illustration by the authors)

Условия, в которых эксплуатируется тоннель Казанского метрополитена можно считать благоприятными для бетона отделки, поскольку в нем всегда сохраняется положительная температура и достаточно высокая влажность. В целом полученная кинетическая кривая изменения прочности бетона согласуется с общепринятой теорией твердения цементных систем. Наблюдаемый прирост прочности постепенно замедляется, что очевидно потребует проведения повторного мониторинга конструкций в ближайшие годы.

4. Заключение

Поскольку в тоннелях Казанского метрополитена сохраняется положительная температура и высокая влажность, основной характеристикой позволяющей получить прогностическую модель и оценить долговечность железобетонных конструкций, является прочность. Используя неразрушающие методы контроля прочности железобетонных блоков, произведенных в разное время, можно выявить кинетику изменения данной характеристики, т.е оценив фактическую прочность бетона в тоннелях Казанского метрополитена можно построить кинетическую кривую изменения прочности во времени.

В результате проведения исследования получена функция, позволяющая прогнозировать изменение прочности бетона блоков отделки Казанского метрополитена в процессе эксплуатации. За период эксплуатации (22 года) наблюдается увеличение прочности по отношению к проектному показателю на 20,8 %. Однако данный процесс не линеен и прирост прочности со временем замедляется. Поэтому в ближайшие годы, вероятно, потребуется проведение повторного обследования.

Список литературы/References

1. Von Der Tann L, Sterling R., Zhou Y., Metje N. Systems approaches to urban underground space planning and management. A review // *Underground Space (China)*. 2020. Vol. 5. No. 2. DOI: 10.1016/j.undsp.2019.03.003
2. Cui J., Broere W, Lin D. Underground space utilisation for urban renewal // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2021. Vol. 108. No 5. DOI: 10.1016/j.tust.2020.103726.

3. Дашко Р.Э. Котюков П.В. Влияние гидрогеологических условий на безопасность освоения подземного пространства при строительстве транспортных тоннелей. // Записки Горного института Санкт-Петербург. 2012. №199. С. 9-16. [Dashko R.E. Kotyukov P.V. Influence of hydrogeological conditions on the safety of underground space development during the construction of transport tunnels. // Notes of the Mining Institute of St. Petersburg. 2012. No.199. P. 9-16.]
4. Загоршменный И.М., Загоршменный А.И. Водопроявления в тоннелях с высокоточной железобетонной обделкой и способы их устранения // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. №4. С. 17-32. [Zakorshmenny I.M., Zakorshmenny A.I. Water manifestations in tunnels with high-precision reinforced concrete lining and ways to eliminate them // Mining information and analytical bulletin. 2022. No. 4. P. 17-32.]
5. Баженов Ю.М., Баженова С.И., Алексеев В.А., Глейзер М.А. Метод повышения долговечности бетонных конструкций наземных транспортных сооружений // Современная техника и технологии. 2018. №3. С. 26-31. [Bazhenov Yu.M., Bazhenova S.I., Alekseev V.A., Glazer M.A. Method of increasing the durability of concrete structures of ground transport structures // Modern technique and technologies. 2018. No.3. P. 26-31.]
6. Рахимов Р.З., Смирнов Д.С., Хайретдинов М.Г., Рахимов М.М. Резиновые уплотнительные прокладки железобетонных блоков обделки тоннеля метрополитена // Проблемы развития транспортных и инженерных коммуникаций. Научнотехнический альманах. 2001. №2-3. С. 29-35. [Rakhimov R.Z., Smirnov D.S., Khayretdinov M.G., Rakhimov M.M. Rubber sealing gaskets of reinforced concrete blocks lining the subway tunnel // Problems of development of transport and engineering communications. Scientific and technical almanac. 2001. No.2-3. P. 29-35.]
7. Герасименко А.А., Козлов М.В. Обеспечение долговечности объектов транспортной инфраструктуры // Молодой учёный. 2020. №23 (313). С. 159-161. [Gerasimenko A.A., Kozlov M.V. Ensuring the durability of transport infrastructure facilities // Young scientist. 2020. No.23 (313). P. 159-161.]
8. Плешко М.С., Плешко М.В., Войнов И.В. Оценка технического состояния железнодорожных тоннелей с большим сроком эксплуатации // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. №1. С. 34-40. [Pleshko M.S., Pleshko M.V., Voynov I.V. Assessment of the technical condition of railway tunnels with a long service life // Mining information and analytical bulletin. 2018. No. 1. P. 34-40.]
9. Тошин Д.С., Ровенская Е.А. Влияние условий длительного твердения на прочность тяжелого бетона // Тольяттинский государственный университет. 2020. №2(45). С. 71-75. [Toshin D.S., Rovenskaya E.A. Influence of long-term hardening conditions on the strength of heavy concrete // Togliatti State University. 2020. No.2(45). P. 71-75.]
10. Cui J., Broere W., Lin D. Underground space utilisation for urban renewal. Tunnelling and Underground Space Technology. 2021. Vol. 108. DOI: 10.1016/j.tust.2020.103726.
11. Татаров Р.О., Дайронас М.В., Лениш А.Ф. Новые виды бетона: Виды, характеристики, особенности // Университетская наука. 2022. №2(14). С. 95-97. [Tatarov R.O., Dayronas M.V., Lenish A.F. New types of concrete: Types, characteristics, features // University science. 2022. No.2(14). P. 95-97.]
12. Поджарова К.Д., Быкова А.С., Рыба Н.С., Астапкович Н.П., Краснопер А.Д., Кильб А.С., Верминская Т.В. Оценка надежности железобетонных конструкций // Сибирский федеральный университет. 2019. №5. С.32. [Podzharova K.D., Bykova A.S., Ryba N.S., Astapkovich N.P., Krasnoper A.D., Kilb A.S., Verminskaya T.V. Reliability assessment of reinforced concrete structures // Siberian Federal University. 2019. No.5. P.32]
13. Xiangsheng Chen Research on combined construction technology for cross-subway tunnels in underground spaces // Engineering. 2018. Vol. 4. No. 1. DOI: 10.1016/j.eng.2017.08.001.

14. Yajie Xu, Xiangsheng Chen Quantitative analysis of spatial vitality and spatial characteristics of urban underground space (UUS) in metro area // Tunnelling and Underground Space Technology. 2021. Vol. 111. DOI: 10.1016/j.tust.2021.103875.
15. Ивойлов М.М., Павлова А.И. К вопросу о методиках определения прочности бетона при проведении обследований зданий и сооружений // Сборник докладов Национальной конференции с международным участием. 2022. №2. С. 114-118. [Ivoilov M.M., Pavlova A.I. On the issue of methods for determining the strength of concrete during surveys of buildings and structures // Collection of reports of the National Conference with international participation. 2022. No. 2. P. 114-118.]

Информация об авторах

Смирнов Денис Сергеевич, кандидат технических наук, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: denis27111974@yandex.ru

Фомина Яна Александровна, инженер - проектировщик 3 категории, АО Институт Татдорпроект, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: yana-lora@mail.ru

Information about the authors

Denis S. Smirnov, candidate of technical sciences, associate professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Russian Federation

Email: Denis27111974@yandex.ru

Yana A. Fomina, design engineer of the 3rd category, Tatdorproekt Institute, Kazan, Russian Federation

Email: yana-lora@mail.ru