

Влияние параметров сечения чугунных тубингов обделки тоннелей метро на их огнестойкость

Дмитрий Александрович Корольченко, Федор Александрович Портнов ✉

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В настоящее время чугун используют в области метростроения для производства специальных изделий — тубингов обделки тоннелей метро. Возникает острая необходимость учета возможности возникновения пожара в тоннеле метро и воздействия его на тубинги. В настоящее время отсутствуют способы прогнозирования поведения тубингов в условиях пожара.

Цель исследования. Оценка влияния характера сечения чугунных тубингов обделки тоннелей метро на их огнестойкость.

Задачи. Разработка методик и проведение экспериментальных и аналитических оценок огнестойкости чугунных тубингов; определение корреляции огнестойкости от параметров сечения чугунных тубингов обделки тоннелей метро.

Объекты исследования. В качестве объекта исследования рассматривались фрагменты тубингов обделки тоннелей метро, выполненные из чугуна СЧ20.

Методология исследования. В ходе экспериментальной оценки производилась оценка деформации образцов при огневом воздействии. В ходе аналитической оценки — расчет прочности сечения тубинга с оценкой выполнения условия прочности — определялась критическая температура, при которой сохраняется несущая способность, производилась оценка предельной нагрузки на тубинг, при которой сохраняется прочность.

Результаты и обсуждение. Для проведения исследования были выбраны экспериментальный и аналитический методы по огнестойкости. В ходе экспериментальной оценки огнестойкости производилась оценка деформации образцов, что также служило показателем достижения предельного состояния образцов, оценка температуры на необогреваемой поверхности образца для дальнейшего использования в аналитической оценке огнестойкости. В ходе аналитической оценки огнестойкости производился расчет прочности сечения тубинга с оценкой выполнения условия прочности, определялась критическая температура, при которой сохраняется несущая способность. На основании расчета производилась оценка предельной нагрузки на тубинг, при которой сохраняется прочность. В результате проводимой экспериментальной и аналитической оценки огнестойкости были получены критические величины нагружения для выбранных образцов.

Заключение. Получены экспериментальные зависимости деформации и прогрева чугунных тубингов обделки от времени огневого воздействия, а также время достижения предельных состояний по потере несущей способности. Определены величины предельных нагрузок на тубинги, при которых спустя 90 мин от начала огневого воздействия наступает предельное состояние по потере несущей способности. Получена математическая зависимость величины предельной вертикальной нагрузки на образцы, при которой достигается предельное состояние по потере несущей способности, от приведенной толщины сечения тубингов обделки тоннелей метро.

Ключевые слова: пожарная опасность; строительство подземных сооружений; прогнозирование огнестойкости; аналитические методы оценки огнестойкости

Благодарности. Данная работа была реализована в рамках программы развития передовой инженерно-строительной школы НИУ МГСУ.

Для цитирования: Корольченко Д.А., Портнов Ф.А. Влияние параметров сечения чугунных тубингов обделки тоннелей метро на их огнестойкость // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2024. Т. 33. № 5. С. 72–86. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.05.72-86

✉ Портнов Федор Александрович, e-mail: PortnovFA@mgsu.ru

Influence of cross-section parameters of cast-iron tubbings of metro tunnel lining on their fire resistance

Dmitriy A. Korolchenko, Fedor A. Portnov ✉

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Nowadays, cast-iron is used in the field of metro construction for the production of special products — tubbings of metro tunnel finishing. There is an urgent need to take into account the possibility of a fire in the metro tunnel and its impact on the tubbings. At present, there are no ways to predict the behaviour of tubbings in fire conditions.

Aim. Assessment of the influence of the nature of the cross-section of cast-iron tubbings of metro tunnel lining on their fire resistance.

Objectives. Development of methods and carrying out of experimental and analytical assessments of the fire resistance of cast-iron tubbings; determination of the correlation of fire resistance from the cross-section parameters of cast-iron tubbings lining of metro tunnels.

Objects of research. As an object of research, fragments of tubbings of metro tunnel lining, made of cast-iron SCh20, were considered.

Research methodology. In the course of experimental evaluation the deformation of specimens under fire action was assessed. In the course of analytical evaluation — calculation of the strength of the tubing cross-section with the assessment of the strength condition fulfillment — the critical temperature at which the bearing capacity is preserved was determined, the limiting load on the tubing at which the strength is preserved was assessed.

Results and discussion. Experimental and analytical methods on fire resistance were chosen for the study. In the course of the experimental assessment of fire resistance, the deformation of the specimens was assessed, which also served as an indicator of the achievement of the limit state of the specimens, the temperature on the unheated surface of the specimen was estimated for further use in the analytical assessment of fire resistance. During the analytical assessment of fire resistance, the strength of the tubing section was calculated with an assessment of the fulfillment of the strength condition, the critical temperature at which the bearing capacity is preserved was determined. Based on the calculation, the maximum load on the tubing was estimated, at which the strength is maintained. As a result of the experimental and analytical assessment of fire resistance, critical load values for the selected specimens were obtained.

Conclusion. Experimental dependencies of deformation and heating of cast-iron lining tubbings on the time of fire exposure, as well as the time of reaching the limit states for the loss of bearing capacity, were obtained. The values of the maximum loads on the tubbings are determined, at which after 90 minutes from the beginning of the fire impact, the limit state for the loss of bearing capacity occurs. The mathematical dependence of the value of the maximum vertical load on the specimens, at which the limit state for the loss of bearing capacity is achieved, on the reduced thickness of the section of the tubbings of metro tunnel lining is obtained

Keywords: fire hazard; construction of underground structures; fire resistance forecasting; analytical methods for fire resistance assessment

Acknowledgments. The research was funded by Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), (MGSU Advanced Civil Engineering School development programme).

For citation: Korolchenko D.A., Portnov F.A. Influence of cross-section parameters of cast-iron tubbings of metro tunnel lining on their fire resistance. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2024; 33(5):72-86. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.05.72-86 (rus).

✉ Fedor Alexandrovich Portnov, e-mail: PortnovFA@mgsu.ru

Введение

В настоящее время проводится разработка новых видов тубингов обделки тоннелей метро. Как известно, данные конструкции требуют особого внимания в плане обеспечения их устойчивости в связи с воздействием больших нагрузок грунта, а также особенностями распределения нагрузок в сборной конструкции кольцеобразной формы [1–3]. Для строительства тоннелей метрополитенов можно использовать различные материалы, такие как сборные чугунные или железобетонные элементы, монолитный бетон и железобетон (рис. 1). Эти материалы обладают высокой прочностью и долговечностью, что позволяет эффективно осуществлять работы с применением промышленных методов. Для обделки перегонных тоннелей часто используют сборные блоки из железобетона, а в сложных условиях, связанных с гидрогеоло-

гическими особенностями строительства, например нестабильными водонасыщенными грунтами, большим гидростатическим давлением и высоким горным давлением, предпочтение отдают сборным обделкам из чугунных тубингов [4, 5].



Рис. 1. Тоннель Московского метро
Fig. 1. Moscow Metro Tunnel

Одно из распространенных технических решений по созданию тоннелей метро связано с производством железобетонных тубингов. Железобетонные конструкции обладают рядом преимуществ, но их применение для строительства подземных сооружений связано с рядом затруднений, основанных на изменении механических свойств железобетонных конструкций по причине коррозии и особых температурных условиях при взаимодействии с грунтом, а также в случае воздействия повышенных температур [6–9]. Существует большое количество научных работ, в которых рассматриваются тубинги обделки из железобетона, в которых описаны общие подходы к безопасности данного типа сооружений [10, 11]. В том числе множество работ направлено на рассмотрение вопросов пожаро- и взрывобезопасности тоннелей метро с использованием железобетонных тубингов. В ряде работ рассматривается влияние различных добавок для бетона, обеспечивающих уменьшение влияния высоких температур [12, 13]. Важно отметить, что огнестойкость железобетонных конструкций определяется рядом факторов, таких как геометрия, уровень нагрузок, тип арматуры, влажность бетона и другие. На практике огнестойкость конструкций обеспечивается путем учета потери прочности бетона при нагреве, теплового расширения арматуры, появления трещин и потери теплоизоляции [14].

Одним из наиболее перспективных материалов с точки зрения прочностных характеристик являются чугун [15–17].

В литературе рассмотрено влияние особенностей состава чугуна, а также характера отлива изделий на их прочностные характеристики [18–21], тем не менее поведение новых видов чугунной обделки при воздействии пожара рассмотрено недостаточно. В работах [22–24] изучены вопросы взрывного воздействия на тубинги. В научной литературе представлен опыт экспериментальной оценки огнестойкости тубингов и аналитические подходы к изучению поведения чугунных тубингов в условиях пожара с использованием нестационарного уравнения теплопроводности с граничными условиями на лучистый и конвективный теплообмен, результаты которых сводятся к тому, что влажный грунт способен обеспечить достаточный отвод тепла от тубингов [25–27]. В данных работах не рассматривается статическая задача и конструктивные особенности тубингов, их элементов крепления и ребер жесткости, которые при воздействии повышенных температур могут прогреваться значительно по сравнению с остальной конструкцией, а также выступать более хрупкими в таких усло-

виях элементами. Кроме того, в рамках аналитических исследований не учитывают изменение теплофизических характеристик при нагреве. В работе [28] рассмотрена проблема обеспечения огнестойкости путевых тоннелей метрополитена с обделкой из чугунных тубингов. В ряде работ описаны варианты конструктивной огнезащиты тубингов, исследование которой основывается на оценке теплоизолирующей способности огнезащитных материалов [29–31]. Таким образом, в настоящее время актуальным является изучение огнестойкости новых видов чугунной обделки на основании результатов экспериментов. Научная новизна работы состоит в том, что исследование огнестойкости чугунных тубингов будет сопровождаться детальным анализом прогрева тубинга с последующим аналитическим исследованием их поведения в условиях воздействия повышенных температур. В настоящее время имеется задел в виде проведенных исследований огнестойкости железобетонных тубингов и других видов строительных конструкций.

С целью оценки влияния характера сечения чугунных тубингов обделки тоннелей метро на их огнестойкость были поставлены следующие задачи: разработать методики экспериментального исследования и аналитической оценки огнестойкости чугунных тубингов обделки тоннелей метро; провести экспериментальную и аналитическую оценку огнестойкости чугунных тубингов; определить корреляцию огнестойкости от параметров сечения чугунных тубингов обделки тоннелей метро.

Объекты исследования

Для проведения экспериментальной оценки огнестойкости тубингов обделки тоннелей метро подготавливается образец — фрагмент тубинга обделки, представляющего собой единицу продукции, которая используется при сборе полного кольца обделки тоннеля. В качестве объекта исследования рассматривались фрагменты тубингов обделки тоннелей метро, выполненные из чугуна СЧ20. Всего для испытаний были выбраны элементы 4 типоразмеров, представленных в табл. 1.

Каждый из образцов имеет по 5 поперечных ребер жесткости (в том числе опорных). Образцы длиной 1000 мм (образец 1 и образец 2) имеют по 3 продольных ребра жесткости, а образцы длиной 750 мм (образец 3 и образец 4) — по 2 продольных ребра жесткости.

Общий вид тубинга приведен на схемах (рис. 2, 3).

Таблица 1. Перечень образцов чугуных тубингов обделки тоннелей метро

Table 1. List of specimens of cast-iron tubings metro tunnel lining

Номер образца Specimen Number	Длина дуги тубинга L_1^* , мм Length of the tubing arc L_1^* , mm	Длина тубинга L_2 , мм Tubbing length L_2 , mm	Ширина тубинга b , мм Tubbing width b , mm	Высота тубинга h , мм Tubbing height h , mm	Минимальная толщина покрытия тубинга a_1 , мм Minimum thickness of tubing covering a_1 , mm	Минимальная толщина ребра жесткости тубинга a_2 , мм Minimum thickness of tubing stiffening rib a_2 , mm
1	1563,81	1653,82	1000	200	22	30
2	1691,6	1735,05	1000	250	25	50
3	1604,1	1676,8	750	350	30	65
4	1812,8	1871,6	750	350	40	65

* — по нижней грани фрагмента тубинга.

* — along the lower edge of the tubing fragment.

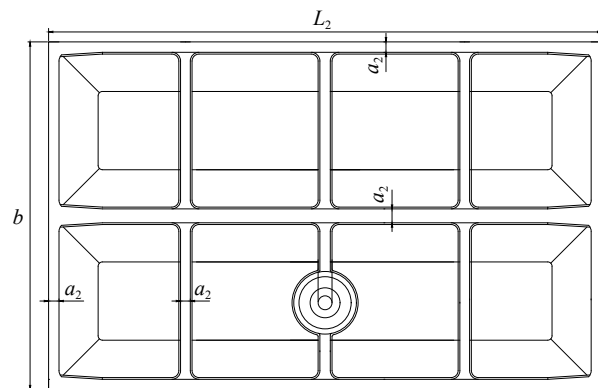


Рис. 2. Общий вид образцов. Вид снизу

Fig. 2. General view of the specimens. Bottom view

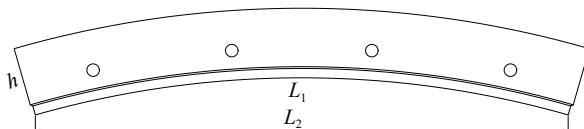


Рис. 3. Общий вид образцов. Вид сбоку

Fig. 3. General view of the specimens. Bottom view

Методология исследования

Для реализации исследования разработана блок-схема исследования, приведенная на рис. 4.

Для исследований всех типов описанных конструкций использовалось оборудование — испытательные печи, обеспечивающие возможность воздействия «стандартного» режима пожара, описываемого зависимостью $T - T_0 = 345 \lg(8t + 1)$, где T — температура в огневом пространстве на расстоянии 100 мм от испытываемого объекта исследования, T_0 — начальная температура, t — время испытания, мин.

График зависимости среднеобъемной температуры в огневой камере от времени теплового воздействия приведен на рис. 5.

Исследования проводились при температуре окружающей среды от 20 до 30 °С и при скорости движения воздуха не более 0,5 м/с. Общими критериями оценки всех исследований являются

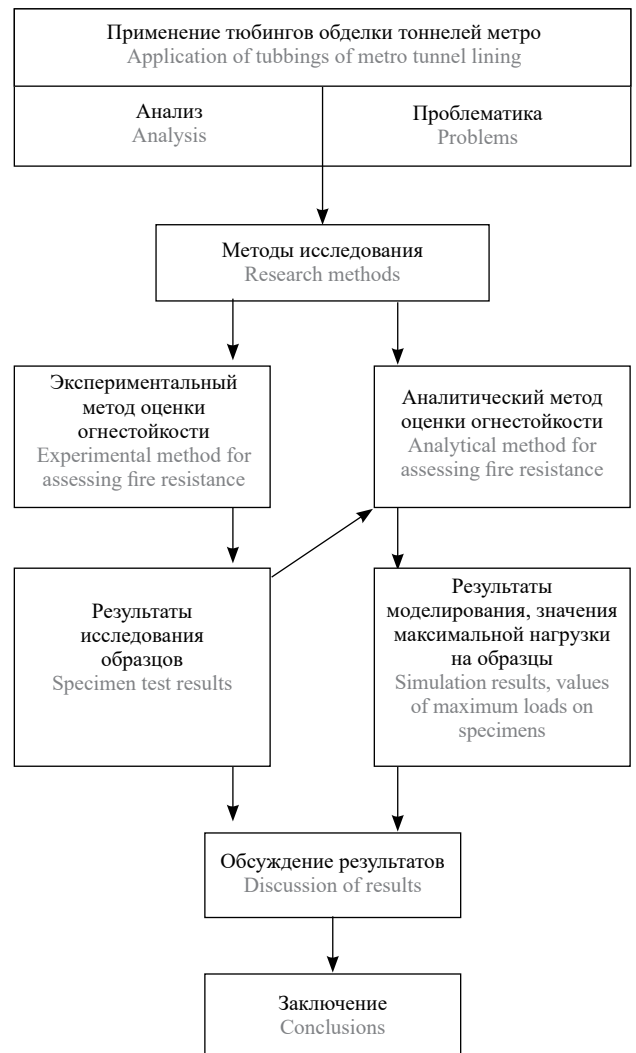


Рис. 4. Блок-схема исследования

Fig. 4. Flow chart of the study

температура в печи и на необогреваемой поверхности объектов исследования, деформация объектов исследования, время появления пламени на необогреваемой поверхности объектов исследования, время появления и характер трещин, отверстий, отслоений, а также другие явления (например, нарушение условий опирания, появление дыма).

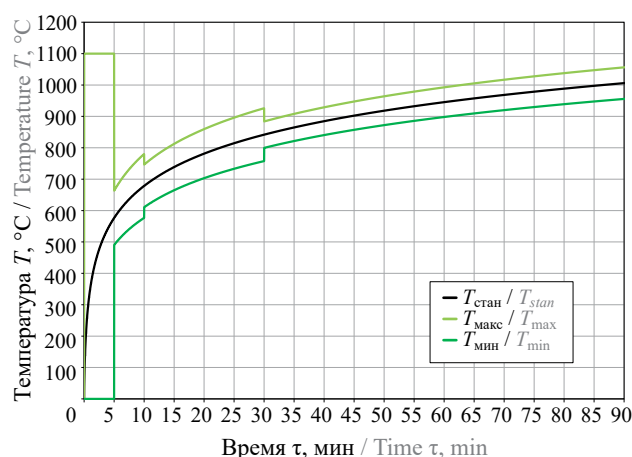


Рис. 5. Зависимость среднеобъемной температуры ($T_{\text{реал}}$) в огневой камере печи от времени теплового воздействия на образцы (τ)

Fig. 5. Dependence of the average volume temperature (T_{real}) in the furnace fire chamber on the time of thermal exposure of specimens (τ)

Экспериментальный метод оценки огнестойкости чугунных тубингов

Для проведения экспериментальной оценки огнестойкости тубингов обделки тоннелей метро подготавливается образец — фрагмент тубинга обделки тоннеля метро, представляющего собой единицу продукции, которая используется при сборе полного кольца обделки тоннеля. Фрагмент тубинга устанавливается в печь для испытаний строительных конструкций на огнестойкость. Для проведения испытаний должны быть обеспечены условия нагружения, приближенные к реальным. Нагрузка на фрагмент тубинга должна состоять из вертикальной и горизонтальной составляющих. Вертикальная нагрузка моделирует воздействие грунта и других вертикальных воздействий. Горизонтальная нагрузка моделирует напряженно-деформированное состояние, возникающее при работе совместно с другими фрагментами тубинга обделки тоннелей метро. Для обеспечения горизонтальной нагрузки фрагмент тубинга фиксируется с одной стороны подвижным упором с гидравлическим домкратом, с другой — шарнирной опорой. При этом подвижный упор с гидравлическим домкратом должны обеспечивать движение только в сторону сжатия тубинга. Для обеспечения вертикальной нагрузки над фрагментом тубинга устанавливается траверса, закрепленная к прессу, которая передает нагрузку на спинку тубинга через стальные пластины. Расположение стальных пластин зависит от конструктивных особенностей фрагмента тубинга. В случае отсутствия особых требований по передаче нагрузки на спинку тубинга стальные пластины должны быть расположены на удалении 250 мм от центра спинки тубинга. Вертикальную и горизонтальную нагрузки должны устанавливать не позднее чем за 30 мин до начала испытания. Схема

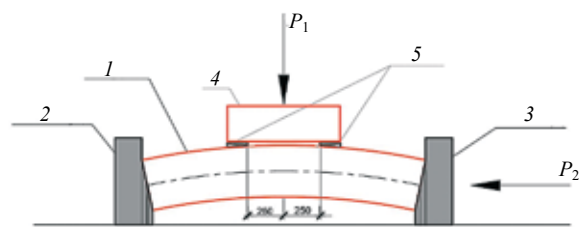


Рис. 6. Схема расположения фрагмента тубинга и его нагружения: 1 — фрагмент тубинга; 2 — неподвижный упор; 3 — подвижный упор; 4 — траверса для передачи нагрузки; 5 — стальные пластины; P_1 — вертикальная нагрузка; P_2 — горизонтальная нагрузка

Fig. 6. Scheme of the location of the tubbing fragment and its loading: 1 — tubbing fragment; 2 — fixed stop; 3 — movable stop; 4 — crosshead for load transfer; 5 — steel plates; P_1 — vertical load; P_2 is the horizontal load

нагружения на образец представлена на рис. 6. Величина нагружения образцов представлена в табл. 2.

Для получения дополнительных характеристик для последующей аналитической оценки огнестойкости фрагмента тубинга обделки тоннелей метро необходима оценка температуры на необогреваемой поверхности тубинга.

Схема расстановки термоэлектрических преобразователей (ТЭП) на фрагменте тубинга представлена на рис. 7.

При приложении нагрузки необходимо обеспечить условие неизменяемости схемы, чтобы при деформации конструкции не изменялись условия теплообмена и не оказывалось влияние на определение величины предела огнестойкости.

Испытание проводят до наступления предельного состояния по потере несущей способности вследствие разрушения конструкции или возникновения предельных деформаций. Предельными состояниями по потере несущей способности (R) являются:

- максимальное значение горизонтальной деформации образца — $L/20$ мм, где L — длина пролета между опорами;
- максимальная скорость нарастания деформаций (см/мин), рассчитываемая по формуле $L2/(9000h)$, где h — расчетная высота сечения конструкции (толщина плит).

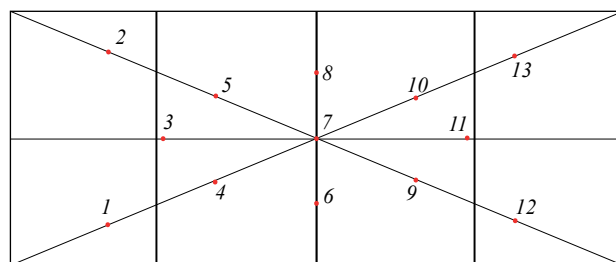


Рис. 7. Схема расположения термоэлектрических преобразователей на необогреваемой поверхности фрагмента тубинга
Fig. 7. Diagram of the location of thermoelectric transducers on the unheated surface of the tubbing fragment

Таблица 2. Величина нагрузок на образцы
Table 2. Specimen loads

Номер образца Specimen Number	Нагрузка по вертикали, кН Vertical load, kN	Нагрузка по горизонтали, кН Horizontal load, kN
1	392,27*	468,7
2	668,25	592,0
3	980,0**	698,8
4	825,0	813,0

* — предложенная нагрузка соответствует величине, полученной предварительным расчетом как максимально возможная, при которой образец 1 достигает предельного состояния по потере несущей способности спустя 90 мин.

** — предложенная нагрузка соответствует максимальной величине нагружения, создаваемого испытательным оборудованием. Оценка максимальной нагрузки, при которой достигается предельное состояние по потере несущей способности образца 2 спустя 90 мин, будет произведена расчетным путем на основании экспериментальных данных.

* — the proposed load matches to the value obtained by the preliminary calculation as the maximum possible at which specimen 1 reaches the limit state of loss of load-bearing capacity after 90 minutes.

** — the proposed load matches to the maximum load generated by the test equipment. The assessment of the maximum load at which the limit state is reached for the loss of load-bearing capacity of specimen 2 after 90 minutes will be made by calculation on the basis of experimental data.

Значения предельных состояний испытуемых образцов приведены в табл. 3.

В процессе испытаний регистрировались следующие параметры: время наступления предельного состояния; температура в печи, на необогреваемых поверхностях конструкции, а также в других предварительно установленных местах; избыточное давление в печи при испытании конструкций, огнестойкость которых определяется по предельным состояниям; наличие видимых деформаций несущих конструкций; время появления пламени на необогреваемой поверхности; время появления и характер трещин, отверстий, отслоений, а также другие явления (нарушение условий опирания, появление дыма). После полного остывания образца производится обследование состояния образца и измерение его повреждений.

Таблица 3. Предельные состояния образцов по несущей способности
Table 3. Ultimate Capacity Limit States of Specimens

Номер образца Specimen Number	Максимальное значение деформации, мм Maximum deformation value, mm	Максимальная скорость нарастания деформаций, мм/мин Maximum deformation growth rate, mm/min
1	79,5	14
2	86,7	13
3	83,8	9
4	93,6	11

Аналитический метод оценки огнестойкости

Для проведения аналитической оценки огнестойкости тубингов обделки тоннелей метро используется проектно-вычислительный комплекс, основанный на методе конечных элементов. Программный комплекс выбирается с учетом возможности применения для расчетов задач механики твердого деформируемого тела, устойчивости, динамических и нелинейных процессов, определения собственных и критических частот и форм колебаний, анализа контактных взаимодействий, аэроупругости, а также для решения задач теплопереноса и акустики.

В основу расчета положен метод конечных элементов с использованием в качестве основных неизвестных перемещений и поворотов узлов расчетной схемы. В связи с этим идеализация конструкции выполнена в форме, приспособленной к использованию этого метода, а именно: система представлена в виде набора тел стандартного типа (стержней, пластин, оболочек и т.д.), называемых конечными элементами и присоединенных к узлам.

Тип конечного элемента определяется его геометрической формой, правилами, определяющими зависимость между перемещениями узлов конечного элемента и узлов системы, физическим законом, определяющим зависимость между внутренними усилиями и внутренними перемещениями, и набором параметров (жесткостей), входящих в описание этого закона и другого.

Узел в расчетной схеме метода перемещений представляется в виде абсолютно жесткого тела исчезающе малых размеров. Положение узла в пространстве при деформациях системы определяется координатами центра и углами поворота трех осей, жестко связанных с узлом. Узел представлен как объект, обладающий шестью степенями свободы — тремя линейными смещениями и тремя углами поворота. Статический расчет системы выполняется в линейной постановке.

В качестве исходных данных используются: материал тубинга, механические свойства материала. 3D-моделирование производится на основе комплекта чертежей с допущениями. Место приложения, схема нагружения, граничные условия, а также значения нагрузок определяются согласно утвержденной программе испытаний.

В результате аналитической оценки должна быть получена критическая температура тубинга и время ее достижения с учетом поведения тубинга и характера его нагрева при экспериментальной оценке огнестойкости. На основе анализа полученных результатов делается вывод об огнестойкости фрагмента тубинга, а также производится верификация результатов. При этом возможно проведение дальнейшей аналитической оценки тубинга аналогичной конструкции при других уровнях нагружения.

Результаты и обсуждение

Экспериментальная оценка огнестойкости
тюбингов

В результате проведенных огневых испытаний образцов тюбингов были получены зависимости деформации (рис. 8) и скорости деформации (рис. 9) образцов от времени теплового воздействия. Также были получены данные об изменении температуры на необогреваемой поверхности образцов в ходе испытаний. На рис. 10 приведена зависимость средней температуры на необогреваемой поверхности в зависимости от времени теплового воздействия.

В табл. 4 приведено время достижения предельного состояния по деформации образцами тюбингов.

На рис. 11–18 приведены фотографии образцов до и после огневого воздействия.

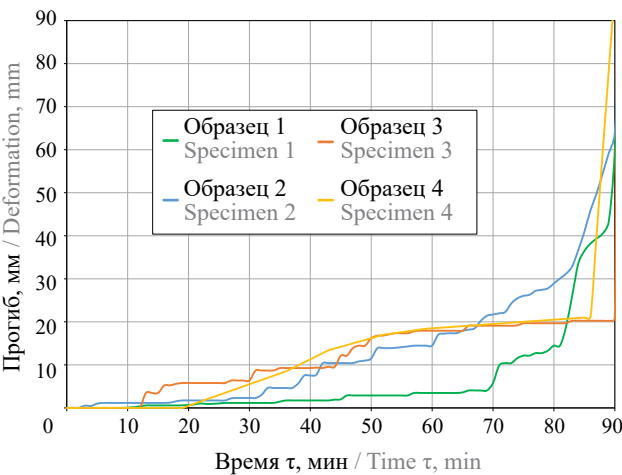


Рис. 8. Зависимость деформации образцов от времени теплового воздействия
Fig. 8. Dependence of deformation of specimens on the time of heat exposure

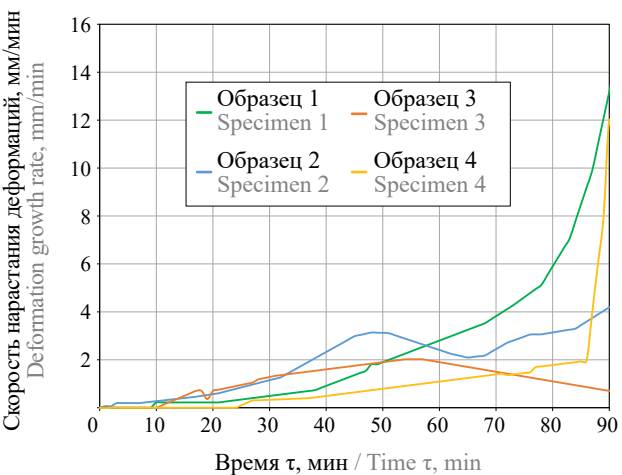


Рис. 9. Зависимость скорости деформации образцов от времени теплового воздействия
Fig. 9. Dependence of the rate of deformation of specimens on the time of heat exposure

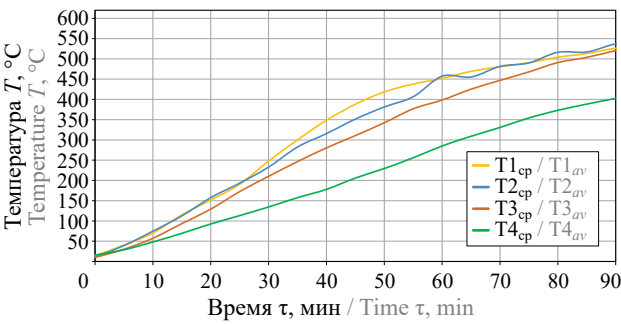


Рис. 10. Зависимость средней температуры на необогреваемой поверхности образца, полученной исходя из данных, полученных термопарами (1)–(13), установленными на необогреваемой поверхности образцов, от времени теплового воздействия
Fig. 10. Dependence of the mean temperature on the unheated surface of the specimen, obtained on the basis of the data obtained by thermocouples (1)–(13) installed on the unheated surface of the specimens, on the time of heat exposure

Таблица 4. Время достижения предельного состояния
Table 4. Time to reach the limit state

Номер образца Specimen Number	Время достижения предельного состояния, мин Time to reach the limit state, min
1	91
2	Не менее 90 / No less than 90
3	90
4	90



Рис. 11. Фото образца № 1 до теплового воздействия
Fig. 11. Photo of specimen No. 1 before heat exposure



Рис. 12. Фото образца № 1 после теплового воздействия
Fig. 12. Photo of specimen No. 1 after heat exposure



Рис. 13. Фото образца № 2 до теплового воздействия
Fig. 13. Photo of specimen No. 2 before heat exposure



Рис. 16. Фото образца № 3 после теплового воздействия
Fig. 16. Photo of specimen No. 3 after heat exposure



Рис. 14. Фото образца № 2 после теплового воздействия
Fig. 14. Photo of specimen No. 2 after heat exposure



Рис. 17. Фото образца № 4 до теплового воздействия
Fig. 17. Photo of specimen No. 4 before heat exposure



Рис. 15. Фото образца № 3 до теплового воздействия
Fig. 15. Photo of specimen No. 3 before heat exposure



Рис. 18. Фото образца № 4 после теплового воздействия
Fig. 18. Photo of specimen No. 4 after heat exposure

Аналитическая оценка огнестойкости тубингов *Исходные данные*

В качестве материала тубинга в расчетной модели применялся чугун СЧ20. Общий вид тубинга приведен на рис. 19.

Расчет модели производился в ПК ЛИРА 10 с использованием Nastran In-CAD.

В расчетной модели применялся ряд допущений:

- ребра жесткости по периметру приняты толщиной 40 мм (фактическая толщина переменная и варьируется в диапазоне от 30 до 34 мм);
- центральное продольное ребро жесткости принято толщиной 40 мм (фактическая толщина переменная и варьируется в диапазоне от 34 до 40 мм);
- конструктивные отверстия в ребрах жесткости тубинга исключены из расчета.

Таблица 5. Нагрузки на образец 3
Table 5. Loads on specimen 3

Характеристика Characteristic	Значение Value
Нагрузка по вертикали, кН Vertical load, kN	1684,0
Нагрузка по горизонтали, кН Horizontal load, kN	698,8
Ускорение свободного падения, м/с ² Acceleration due to gravity, m/s ²	9,80665

Нагрузки и воздействия на тьюбинг определены согласно табл. 5.

Схема приложения нагрузок соответствует натурным испытаниям.

Характеристики чугуна СЧ20 в соответствии с ГОСТ¹ приведены в табл. 6.

Для расчетной модели приняты следующие характеристики:

- твердость материала: HB 10–1 = 143 — 255 МПа;
- предел прочности — 275,79 МПа;
- предел текучести — 213,74 МПа.

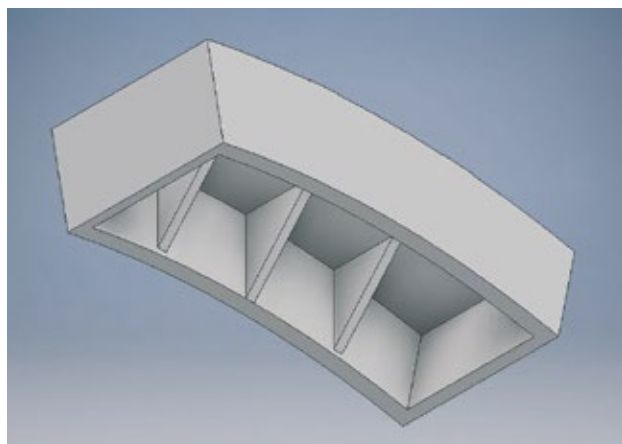


Рис. 19. Общий вид конструкции
Fig. 19. General view of the structure

Таблица 6. Характеристики чугуна СЧ20
Table 6. Characteristics of cast-iron SCh20

Свойства чугуна СЧ20 Properties of cast-iron SCh20						
Механические при $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ Mechanical at $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$	Физические при T_1 Physical at T_1					
σ_s , МПа σ_s , MPa	T_1 , $^{\circ}\text{C}$	$E \cdot 10^6$, МПа $E \cdot 10^6$, MPa	$a \cdot 10^6$, 1/град $a \cdot 10^6$, 1/deg	I , Вт/(м·град) I , W/(m·deg)	r , кг/м ³ r , kg/m ³	C , Дж/(кг·град) C , J/(kg·deg)
200	20	1	—	54	7100	—
	100	—	9,5	—	—	480

¹ ГОСТ 1412–85. Чугун с пластинчатым графитом для отливок. Марки (утв. постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 24 сентября 1985 г. № 3009).



Рис. 20. Граничные условия в первой опоре
Fig. 20. Boundary conditions in the first support

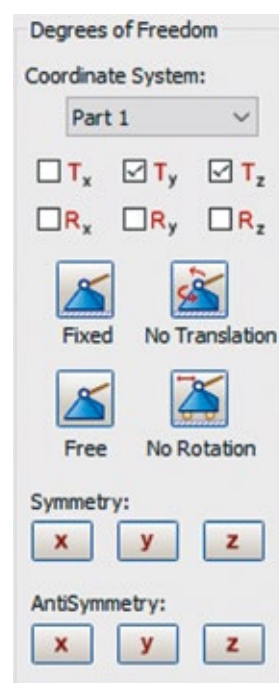


Рис. 21. Граничные условия во второй опоре
Fig. 21. Boundary conditions in the second support

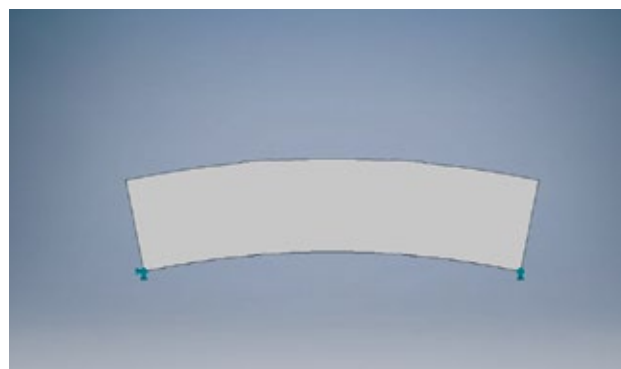


Рис. 22. Общая схема опирания
Fig. 22. General reliance scheme

Тюбинг шарнирно оперт на два ребра жесткости (рис. 20). По одной опоре разрешены горизонтальные перемещения, согласно приведенной схеме опирания (рис. 21).

Нагрузки приложены к поверхностям модели согласно приложенной схеме (рис. 22, 23).

Результаты расчета

Вид сетки конечных элементов тюбинга представлен на рис. 24. Внутренние напряжения в тюбинге представлены на рис. 25. Схема перемещений тюбинга представлена на рис. 26. Схема деформаций тюбинга представлена на рис. 27. Карта зон разрушения материала в модели тюбинга представлена на рис. 28.

Согласно проведенному анализу, несущая способность конструкции обеспечена.

Теплофизическая задача

По результатам расчетов без термического воздействия образец № 3 сохраняет свою несущую способность при приложении к нему вертикальной нагрузки

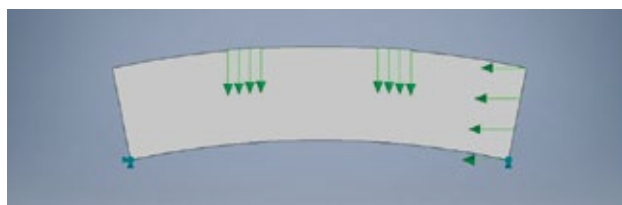


Рис. 23. Схема приложения нагрузок
Fig. 23. Load application scheme

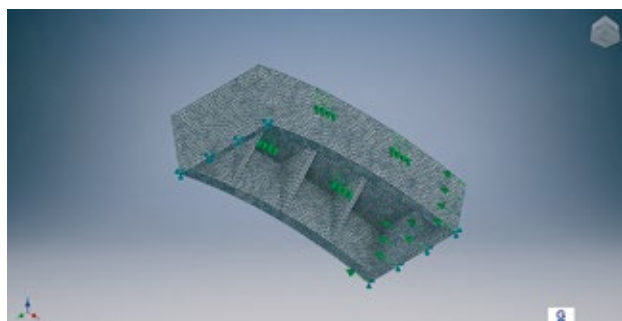


Рис. 24. Вид сетки конечных элементов
Fig. 24. Finite element mesh view

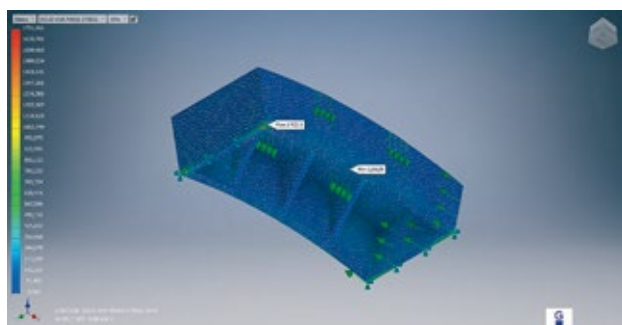


Рис. 25. Внутренние напряжения, МПа
Fig. 25. Internal stresses, MPa

в 980 кН и горизонтальной в 698,8 кН. Условие прочности выполняется:

$$\sigma = \frac{M}{W} + \frac{N}{A} = \frac{2\,582\,312,69}{17\,680,433} + \frac{82\,313,86}{795} \approx 249,6 \text{ кгс/см}^2 < \sigma_b = 2000 \text{ кгс/см}^2$$

где M — максимальный изгибающий момент;

W — момент сопротивления;

N — продольная сила в сечении с максимальным изгибающим моментом;

A — площадь сечения;

σ_b — предел кратковременной прочности.

При оказании на образец термического воздействия его прочностные характеристики уменьша-

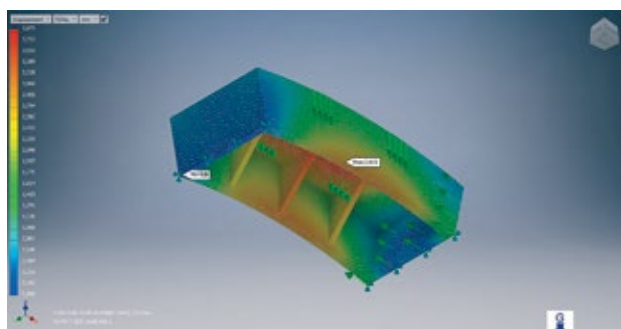


Рис. 26. Схема перемещений
Fig. 26. Movement scheme

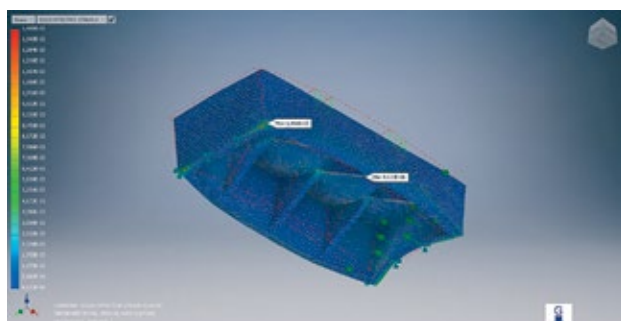


Рис. 27. Схема деформаций
Fig. 27. Scheme of deformations

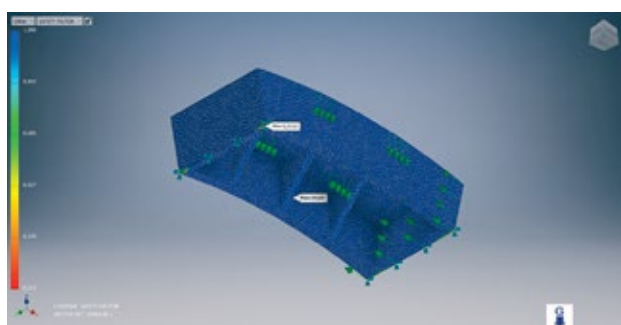


Рис. 28. Карта зон разрушения материала в модели
Fig. 28. Map of material failure zones in the model

ются. Решая статическую задачу огнестойкости, получим γ_{tem} — коэффициент, учитывающий изменение прочности стали при нагреве:

$$\gamma_{tem} = \frac{M}{W_{pl} \cdot R_{yn}} = \frac{253,32}{0,0198 \cdot 200\,000} = 0,064,$$

где M — максимальный изгибающий момент;
 W — пластический момент сопротивления;
 R_{yn} — предел прочности к разрыву.

Критическая температура, при которой он сохраняет несущую способность для данного нагружения:

$$t_{cr} = (750 - 440 \cdot \gamma_{tem}) \cdot k = \\ = (750 - 440 \cdot 0,064) \cdot 0,92 = 664^\circ\text{C},$$

где k — поправочный коэффициент.

Согласно лабораторным данным, максимальная температура образца в ходе исследования составляла 594°C , что меньше, чем критическая температура для данного вида нагружения, а значит условие прочности при термическом воздействии выполняется.

Повторим расчет, увеличив вертикальную нагрузку до значения в 1684 кН , горизонтальная остается прежней. Предел кратковременной прочности при таком нагружении не превышен. Условие прочности выполняется:

$$\sigma = \frac{M}{W} + \frac{N}{A} = \frac{4\,496\,019,69}{17\,680,433} + \\ + \frac{90\,012,68}{795} \approx 367,5\text{ кгс/см}^2 < \sigma_B = \\ = 2000\text{ кгс/см}^2$$

где M — максимальный изгибающий момент;
 W — момент сопротивления;
 N — продольная сила в сечении с максимальным изгибающим моментом;
 A — площадь сечения;
 σ_B — предел кратковременной прочности.

При оказании на образец термического воздействия его прочностные характеристики уменьшаются. Решая статическую задачу огнестойкости, получим γ_{tem} — коэффициент, учитывающий изменение прочности стали при нагреве:

$$\gamma_{tem} = \frac{M}{W_{pl} \cdot R_{yn}} = \frac{441,06}{0,0198 \cdot 200\,000} = 0,111,$$

где M — максимальный изгибающий момент;
 W — пластический момент сопротивления;
 R_{yn} — предел прочности к разрыву.

Критическая температура, при которой он сохраняет несущую способность для данного нагружения:

$$t_{cr} = (750 - 440 \cdot \gamma_{tem}) \cdot k = \\ = (750 - 440 \cdot 0,111) \cdot 0,92 = 645^\circ\text{C},$$

где k — поправочный коэффициент.

Согласно лабораторным данным, максимальная температура образца в ходе исследования составляла 594°C , что меньше, чем критическая температура для данного вида нагружения, а значит условие прочности при термическом воздействии выполняется. Соответственно, образец 3 обеспечивает предел огнестойкости $R90$ при воздействии нагрузки 1684 кН по вертикали и $813,0\text{ кН}$ по горизонтали.

Аналогичным способом был проведен расчет предельных нагрузок на образец 4. Образец 3 обеспечивает предел огнестойкости $R90$ при воздействии нагрузки 1651 кН по вертикали и $813,0$ по горизонтали.

Исходя из данных, полученных в результате проведенного исследования, мы получили информацию о действительных нагрузках, в результате которых исследуемые образцы обеспечивают огнестойкость в течение 90 мин. На основании информации о температуре на необогреваемой поверхности образцов, а также с использованием теплофизических расчетов видно, что предельное состояние по потере несущей способности спустя 90 мин наступало при температурах около $+645\text{--}665^\circ\text{C}$. В связи с тем, что чугун имеет высокую теплопроводность и толщина покрытия и ребер жесткости образцов незначительно влияют на характер нагрева.

Из литературы известно, что одной из характерных зависимостей в области огнестойкости строительных конструкций является зависимость характера сечения конструкции от времени достижения предельного состояния. Одним из способов описания сечения конструкции является приведенная толщина сечения, равная отношению площади сечения к обогреваемому периметру.

Для исследуемых образцов была произведена оценка приведенной толщины сечения (табл. 7),

Таблица 7. Сводные данные по предельным нагрузкам на образцы

Table 7. Summary of specimen load limits

Номер образца Specimen Number	Нагрузка по вертикали, кН Vertical load, kN	Нагрузка по горизонтали, кН Horizontal load, kN	Приведенная толщина сечения, мм Effective section thickness, mm
1	392,27	468,7	28
2	668,25	592,0	39
3	1684	698,8	58
4	1791	813,0	61



Рис. 29. Зависимость величины вертикальной нагрузки на образцы от приведенной толщины сечения

Fig. 29. Dependence of the value of the vertical load on the specimens on the effective thickness of the section

а также получена зависимость величины вертикальной нагрузки на образцы от приведенной толщины сечения (рис. 29).

На основании графика зависимости величины вертикальной нагрузки на образцы от приведенной толщины сечения можно выразить математическую зависимость:

$$y = 2 \cdot 10^{-8} \cdot x^3 - 6 \cdot 10^{-5} \cdot x^3 + 0,0934x + 0,2812.$$

Приведенная зависимость может быть использована для предварительной оценки огнестойкости тубингов обделки тоннелей метро.

Заключение

Проведено исследование поведения чугунных тубингов обделки тоннелей метро в условиях высоко-

температурного воздействия. Для исследования были разработаны методики огневых испытаний тубингов обделки тоннелей метро, а также аналитической оценки их огнестойкости, в которых учитываются особенности поведения выбранных конструкций — горизонтальные и вертикальные нагрузки и возможность прогрева при высокотемпературном воздействии.

В рамках проводимых исследований были проведены натурные испытания фрагментов чугунных тубингов обделки тоннелей метро, зафиксированы предельные состояния исследуемых конструкций, а также проведен анализ поведения образцов тубингов обделки тоннелей метро. Получены зависимости деформации и прогрева образцов в зависимости от времени огневого воздействия.

Получены величины предельных нагрузок на исследуемые образцы, при которых спустя 90 мин после начала огневого воздействия достигается предельное состояние по потере несущей способности с использованием разработанных аналитических методов исследования.

Получена зависимость величины предельной вертикальной нагрузки на образцы, при которой достигается предельное состояние по потере несущей способности, от приведенной толщины сечения тубингов обделки тоннелей метро, выражаемая в виде математической зависимости.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Wei Shi, Zenglin Hong, Min Yang, Ning Li, Tianxiang Tan. Impact of subway shield tunnel construction on deformation of existing utility tunnel // *Frontiers in Earth Science*. 2023. No. 11. P. 1104865. DOI: 10.3389/feart.2023.1104865
2. Demenkov P., Shubin A.A. Improvement of design, geomechanical substantiation and development of construction technologies for the closed column station type of the deep-laid subway // *International Journal of Applied Engineering Research*. 2016. Vol. 11. No. 3. Pp. 1754–176. EDN WWEMJZ.
3. Zhou Qihui, Zhang Qiongfang, Sun Miaomiao, Huang Xin, Huang Zhanggong, Wen Xuewei et al. Measuring Vibrations of Subway Tunnel Structures with Cracks // *Buildings*. 2024. Vol. 14. No. 9. P. 2660. DOI: 10.3390/buildings14092660
4. Bao Yan, Zheng Yexin, Tang Chao, Meng Xiaolin, Sun Zhe, Zhang Dongliang. Lateral convergence deformation prediction of subway shield tunnel based on Kalman model // *Sustainability*. 2024. No. 16. P. 2798. DOI: 10.20944/preprints202401.0398.v1
5. Dong Sihui, Zhang Xinyu, Wang Kang. Study on fire ventilation control of subway tunnel: a case study for Dalian subway // *Sustainability*. 2022. Vol. 14. No. 14. DOI: 10.3390/su14148695
6. Конопляник А.Ю., Ильев И.М. Исследование характеристик жаростойких бетонов с добавками вспученного перлитового песка // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2019. № 1–2. С. 62–66. DOI: 10.33101/s001-150002091
7. Akhlaq Muhammad, Moiz Muhammad, Ahmed Shehryar. A review of concrete's performance under the influence of fire and remedial solutions // *1st International Conference on Engineering and Applied Natural Sciences (ICEANS)*. Konya, Turkey, 2022.
8. Elsayd Alaa, Fathy Islam. Experimental Study of fire effects on compressive strength of normal-strength concrete supported with nanomaterials additives // *IOSR Journal of Engineering (IOSRJEN)*. 2019. Vol. 16. Issue 1. Pp. 28–37. DOI: 10.9790/1684-1601032837

9. Agrawal Dr. Exploration and comparison between regular concrete and concrete with mineral additives // International journal of scientific research in engineering and management. 2024. No. 08. Pp. 1–5. DOI: 10.55041/IJSREM33980
10. Golovanov V., Pehotikov A., Gravit M., Novikov N., Pavlov V. Influence of microfiber on fire resistance of reinforced concrete tunnel tubings // Safety In Aviation And Space Technologies. Select Proceedings of the 9th World Congress “Aviation in the XXI Century”. “Lecture Notes in Mechanical Engineering” Cham, 2022. DOI: 10.1007/978-3-030-85057-9_24. EDN GLQZNM.
11. Annerel E., Boch K., Lemaire T. Passive fire protection end life safety // Topic Safety of Tunnel and Underground Structure. “SEE Tunnel: Promoting in SEE Region” ITA WTS 2015 Congress and 41st General Assambly. Dubrovnik, Croatia, 2015. Pp. 1–10.
12. Maraveas C., Vrakas A.A. Design of concrete tunnel linings for fire safety // Structural Engineering International. 2014. Vol. 24. Issue 3. Pp. 319–329. DOI: 10.2749/101686614X13830790993041
13. Cong Wei, Shi Long, Shi Zhicheng, Peng Min, Yang Hui, Zhang Shaogang et al. Effect of train fire location on maximum smoke temperature beneath the subway tunnel ceiling // Tunnelling and Underground Space Technology. 2020. No. 97. P. 103282. DOI: 10.1016/j.tust.2020.103282
14. Kordina K. Brände in unterirdischen Verkehrsanlagen // Bautechnik. 2003. Nr. 80. Heft 5. Pp. 327–338. DOI: 10.1002/bate.200302620
15. Ruiz López Agustin, Tsiampousi Aikaterini, Standing Jamie, Potts David. The influence of tunnel joints on the present-day condition of a grey cast iron tunnel // Computers and Geotechnics. 2023. P. 105701. DOI: 10.1016/j.compgeo.2023.105701
16. Kropivnyi V., Bosyi M., Kuzyk O., Kropivna A., Molokost L. On the question of structural formation of high-compression cast iron using state diagrams system “Fe-Si”, “Mg-Si” and “Fe-Si-Mg” // Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences. 2023. No. 2. Pp. 34–42. DOI: 0.32515/2664-262X.2023.7(38).2.34-42
17. Sosnovskiy L., Sherbakov S. New cast iron Monica loses its brittleness with increasing strength // International Journal of Materials and Structural Integrity. 2023. No. 15. Pp. 24–41. DOI: 10.1504/IJMSI.2023.135888
18. Sirenko K.A. Directions for the development of a methodology for regulating the chemical composition and properties of cast iron in foundry production based on a probabilistic approach // Metaloznavstvo ta obrobka metaliv. 2023. No. 29. Pp. 23–33. DOI: 10.15407/mom2023.04.023
19. Panichkin A., Kenzhegulov A., Mamaeva A., Uskenbayeva A., Kshibekova B., Imbarova A. et al. Effect of carbon and cooling rate on the structure of hypereutectic high chromium cast iron in the cast state and after heat treatment // J. Compos. Sci. 2023. Vol. 7. Issue. 12. P. 483. DOI: 10.3390/jcs7120483
20. Chen C., Wang J., Ge Y., Zhuang M., Ma Z. Microstructure and wear resistance of high-chromium cast iron with multicomponent carbide coating via laser cladding // Coatings. 2023. No. 13. P. 1474. DOI: 10.3390/coatings13081474
21. Mingjian Peng, Hongbing Liu, Yang Xuan, Xu Liu, Lei Xu, Zhishui Yu. Evaluation of the microstructural and mechanical properties of ductile cast iron and alloy steel dissimilar materials welded by magnetically impelled arc butt // Journal of Materials Research and Technology. 2021. Vol. 15. Pp. 4623–4635. DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.10.059
22. Fischer G., Nellesen J., Anar N.B., Ehrig K., Riesemeier H., Tillmann W. 3D analysis of micro-deformation in VHCF-loaded nodular cast iron by μ CT // Materials Science and Engineering: A. 2013. Vol. 577 (4). Pp. 202–209. DOI: 10.1016/j.msea.2013.04.057
23. Liu H. Damage of cast-iron subway tunnels under internal explosions // Geotechnical Special Publication. 2011. Pp. 1524–1533. DOI: 10.1061/41165(397)156
24. Liu Huabei. Soil-structure interaction and failure of cast-iron subway tunnels subjected to medium internal blast loading // Journal of Performance of Constructed Facilities. 2012. No. 26. Pp. 691–701. DOI: 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000292
25. Dehn F., Werther N., Knitl J. Großbrandversuche für den city-tunnel Leipzig // Beton- und Stahlbetonbau. 2006. Nr. 101. Heft 8. Pp. 631–636. DOI: 10.1002/best200608186
26. Голованов В.И., Пехотиков А.В., Павлов В.В., Новиков Н.С. Огневые испытания тубингов тоннельной обделки // Пожарная безопасность. 2019. № 4 (97). С. 50–55. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.01.21-39. EDN FELKLH.
27. Голованов В.И., Пехотиков А.В., Новиков Н.С., Павлов В.В., Кузнецова Е.В. Огнестойкость железобетонных тубингов подземных сооружений с полипропиленовой фиброй // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2019. Т. 28. № 5. С. 60–70. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.05.60-70. EDN CDPGLL.
28. Голиков А.Д., Черкасов Е.Ю., Данилов А.И., Сиваков И.А. Предел огнестойкости конструкций чугунных тоннельных обделок метрополитена без огнезащитных покрытий // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2014. Т. 23. № 12. С. 20–27. EDN VUBAKH.
29. Gravit M., Antonov S., Nedryshkin O. Research features of tunnel linings with innovations fireproof panels // Procedia Engineering. 2016. No. 165. Pp. 1651–1657. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.906

30. Гаращенко А.Н., Антонов С.П., Марченкова С.В., Павлов В.В. Теплотехнический анализ результатов огневых испытаний под нагрузкой чугунных тюбингов обделок тоннелей метрополитена, обеспечение их рациональной огнезащиты и заданной огнестойкости // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. № 31. С. 21–39. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.01.21-39. EDN VSXTGY.
31. Голиков А.Д., Черкасов Е.Ю., Данилов А.И., Сиваков И.А. Способ огнезащиты обделки транспортных тоннелей из чугунных тюбингов // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2016. № 25 (12). С. 22–29. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.12.22-29

REFERENCES

1. Wei Shi, Zenglin Hong, Min Yang, Ning Li, Tianxiang Tan. Impact of subway shield tunnel construction on deformation of existing utility tunnel. *Frontiers in Earth Science*. 2023; 11:1104865. DOI: 10.3389/feart.2023.1104865
2. Demenkov P., Shubin A.A. Improvement of design, geomechanical substantiation and development of construction technologies for the closed column station type of the deep-laid subway. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2016; 11(3):1754-1761. EDN WWEMJZ.
3. Zhou Qihui, Zhang Qiongfang, Sun Miaomiao, Huang Xin, Huang Zhanggong, Wen Xuewei et al. Measuring vibrations of subway tunnel structures with cracks. *Buildings*. 2024; 14(9):2660. DOI: 10.3390/buildings14092660
4. Bao Yan, Zheng Yexin, Tang Chao, Meng Xiaolin, Sun Zhe, Zhang Dongliang et al. Lateral convergence deformation prediction of subway shield tunnel based on Kalman model. *Sustainability*. 2024; 16:2798. DOI: 10.20944/preprints202401.0398.v1
5. Dong Sihui, Zhang Xinyu, Wang Kang. Study on fire ventilation control of subway tunnel: a case study for Dalian subway. *Sustainability*. 2022; 14(14). DOI: 10.3390/su14148695
6. Konoplianyk A.Yu., Iliev I.M. Research of characteristics of heat-resistant concretes with additives of expanded perlite sand. *Metallurgical and mining industry*. 2019; 1-2:62-66. DOI: 10.33101/s001-150002091 (rus).
7. Akhlaq Muhammad, Moiz Muhammad, Ahmed Shehryar. A review of concrete's performance under the influence of fire and remedial solutions. *Conference: 1st International Conference on Engineering and Applied Natural Sciences (ICEANS)*. Konya, Turkey, 2022.
8. Elsayd Alaa, Fathy Islam. Experimental Study of fire effects on compressive strength of normal-strength concrete supported with nanomaterials additives. *IOSR Journal of Engineering (IOSRJEN)*. 2019; 16(1. III):28-37. DOI: 10.9790/1684-1601032837.
9. Agrawal Dr. Exploration and comparison between regular concrete and concrete with mineral additives. *International journal of scientific research in engineering and management*. 2024; 8:1-5. DOI: 10.55041/IJSREM33980
10. Golovanov V., Pehotikov A., Gravit M., Novikov N., Pavlov V. Influence of microfiber on fire resistance of reinforced concrete tunnel tubings. *Safety in Aviation and Space Technologies. Select Proceedings of the 9th World Congress "Aviation in the XXI Century". Series "Lecture Notes in Mechanical Engineering" Cham*. 2022. DOI: 10.1007/978-3-030-85057-924. EDN GLQZNM.
11. Annerel E., Boch K., Lemaire T. Passive fire protection end life safety. *Topic Safety of Tunnel and Underground Structure. "SEE Tunnel: Promoting in SEE Region" ITA WTS 2015 Congress and 41st General Assembly*. Dubrovnik, Croatia, 2015; 1-10.
12. Maraveas C., Vrakas A.A. Design of concrete tunnel linings for fire safety. *Structural Engineering International*. 2014; 24(3):319-329. DOI: 10.2749/101686614X13830790993041
13. Cong Wei, Shi Long, Shi Zhicheng, Peng Min, Yang Hui, Zhang Shaogang et al. Effect of train fire location on maximum smoke temperature beneath the subway tunnel ceiling. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2020; 97:103282. DOI: 10.1016/j.tust.2020.103282.
14. Kordina K. Brände in unterirdischen Verkehrsanlagen. *Bautechnik*. 2003; 80(5):327-338. DOI: 10.1002/bate.200302620 (ger).
15. Ruiz López Agustin, Tsiampousi Aikaterini, Standing Jamie, Potts David. The influence of tunnel joints on the present-day condition of a grey cast iron tunnel. *Computers and Geotechnics*. 2023; 105701. DOI: 10.1016/j.compgeo.2023.105701
16. Kropivnyi V., Bosyi M., Kuzyk O., Kropivna A., Molokost L. On the question of structural formation of high-compression cast iron using state diagrams system "Fe-Si", "Mg-Si" and "Fe-Si-Mg". *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*. 2023; 2:34-42. DOI: 0.32515/2664-262X.2023.7(38).2.34-42
17. Sosnovskiy L., Sherbakov S. New cast iron Monica loses its brittleness with increasing strength. *International Journal of Materials and Structural Integrity*. 2023; 15:24-41. DOI: 10.1504/IJMSI.2023.135888
18. Sirenko K.A. Directions for the development of a methodology for regulating the chemical composition and properties of cast iron in foundry production based on a probabilistic approach. *Metallurgy and processing of metals*. 2023; 29:23-33. DOI: 10.15407/mom2023.04.023
19. Panichkin A., Kenzhegulov A., Mamaeva A., Uskenbayeva A., Kshibekova B., Imbarova A. et al. Effect of carbon and cooling rate on the structure of hypereutectic high chromium cast iron in the cast state and after heat treatment. *J. Compos. Sci*. 2023; 7(12):483. DOI: 10.3390/jcs7120483

20. Chen C., Wang J., Ge Y., Zhuang M., Ma Z. Microstructure and wear resistance of high-chromium cast iron with multicomponent carbide coating via laser cladding. *Coatings*. 2023; 13:1474. DOI: 10.3390/coatings13081474
21. Mingjian Peng, Hongbing Liu, Yang Xuan, Xu Liu, Lei Xu, Zhishui Yu. Evaluation of the microstructural and mechanical properties of ductile cast iron and alloy steel dissimilar materials welded by magnetically impelled arc butt. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021; 15:4623–4635. DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.10.059
22. Fischer G., Nellesen J., Anar N.B., Ehrig K., Riesemeier H., Tillmann W. 3D analysis of micro-deformation in VHCF-loaded nodular cast iron by μ CT. *Materials Science and Engineering: A*. 2013; 577(4):202–209. DOI: 10.1016/j.msea.2013.04.057
23. Liu H. Damage of cast-iron subway tunnels under internal explosions. *Geotechnical Special Publication*. 2011; 1524–1533. DOI: 10.1061/41165(397)156
24. Liu Huabei. Soil-structure interaction and failure of cast-iron subway tunnels subjected to medium internal blast loading. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 2012; 26:691–701. DOI: 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000292
25. Dehn F., Werther N., Knitl J. Großbrandversuche für den city-tunnel Leipzig. *Beton- und Stahlbetonbau*. 2006; 101(8):631–636. DOI: 10.1002/best200608186 (ger).
26. Golovanov V.I., Pekhotikov A.V., Pavlov V.V., Novikov N.S. Fire tests of tubings of tunnel lining. *Fire safety*. 2019; 4(97):50–55. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.01.21-39. EDN FELKLH. (rus).
27. Golovanov V.I., Pekhotikov A.V., Novikov N.S., Pavlov V.V., Kuznetsova E.V. Fire resistance of reinforced concrete tubings of underground structures with polypropylene fiber. *Pozharovzryvobezopasnost' / Fire and Explosion Safety*. 2019; 28(5):60–70. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.05.60-70. EDN CDPGLL. (rus).
28. Golikov A.D., Cherkasov E.Yu., Danilov A.I., Sivakov I.A. Fire resistance limit of cast-iron tunnel lining structures of the metro without fire protection coatings. *Pozharovzryvobezopasnost' / Fire and Explosion Safety*. 2014; 23(12):20–27. EDN VUBAKH. (rus).
29. Gravit M., Antonov S., Nedryshkin O. Research features of tunnel linings with innovations fireproof panels. *Procedia Engineering*. 2016; 165:1651–1657. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.906
30. Garashchenko A., Danilov A., Antonov S., Marchenkova S., Pavlov V. The thermal analysis of fire test results obtained for loaded cast iron tubing used to line subway tunnels, their rational fire protection and pre-set fire resistance. *Pozharovzryvobezopasnost' / Fire and Explosion Safety*. 2022; 31:21–39. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.01.21-39. EDN VSXTGY (rus).
31. Golikov A.D., Cherkasov E.Yu., Danilov A.I., Sivakov I.A. Method of fire protection for lining transport tunnels made of cast iron tubings. *Pozharovzryvobezopasnost' / Fire and Explosion Safety*. 2016; 25(12):22–29. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.12.22-29 (rus).

Поступила 01.10.2024, после доработки 04.10.2024;

принята к публикации 07.10.2024

Received October 1, 2024; Received in revised form October 04, 2024;

Accepted October 7, 2024

Информация об авторах

КОРОЛЬЧЕНКО Дмитрий Александрович, д.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Комплексная безопасность в строительстве», Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 352067; Scopus AuthorID: 55946060600; ResearcherID: E-1862-2017; ORCID: 0000-0002-2361-6428; e-mail: KorolchenkoDA@mgsu.ru

ПОРТНОВ Федор Александрович, к.т.н., доцент кафедры «Комплексная безопасность в строительстве», Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 1134480; Scopus AuthorID: 57192372795; ResearcherID: AAD-9374-2019; ORCID: 0000-0001-7409-0844; e-mail: PortnovFA@mgsu.ru

Вклад авторов: авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors

Dmitriy A. KOROLCHENKO, Dr. Sci. (Eng.), Docent, Head of Institute of Complex Safety in Construction, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavl'skoe Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 352067; Scopus AuthorID: 55946060600; ResearcherID: E-1862-2017; ORCID: 0000-0002-2361-6428; e-mail: ikbs@mgsu.ru

Fedor A. PORTNOV, Cand. Sci. (Eng.), Associate professor at the Department of Integrated Safety in Civil Engineering, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavl'skoe Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; РИНЦ ID: 1134480; Scopus AuthorID: 57192372795; ResearcherID: AAD-9374-2019; ORCID: 0000-0001-7409-0844; e-mail: wastingtimefilmart@gmail.com

Authors' contributions: the authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors declare no conflict of interest.