

## Исследование механических свойств современного металлопроката строительного назначения при повышенных температурах

Владимир Ильич Голованов<sup>1✉</sup>, Геннадий Игоревич Крючков<sup>2</sup>,  
Александр Николаевич Стрекалев<sup>3</sup>, Александр Александрович Комиссаров<sup>4</sup>,  
Сергей Михайлович Тихонов<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Московская обл., г. Балашиха, Россия

<sup>2</sup>Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Москва, Россия

<sup>3</sup>Центральный научно-исследовательский институт строительных конструкций им. В.А. Кучеренко (ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко), НИЦ «Строительство», г. Москва, Россия

<sup>4</sup>Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Значимым недостатком расчетно-аналитических методов определения пределов огнестойкости строительных металлоконструкций является отсутствие практической информации по особенностям изменения прочностных характеристик наиболее распространенных марок современных строительных сталей при высокотемпературном воздействии. Целью настоящей работы стало получение таких данных для проката с повышенными показателями термостойкости при нагреве до критических температур.

**Материалы и методы.** В качестве объекта исследования использовали образцы металлопроката классов прочности: С255 (сталь СтЗсп), С345 (сталь 09Г2С), С390 (сталь 14Г2), а также проката с повышенными показателями термостойкости С355П (сталь 06МБФ). Статические испытания механических свойств на растяжение и сжатие проводили на малогабаритных цилиндрических образцах типа В, с резьбой М10 на головках и рабочим диаметром 4 мм. Методика определения высокотемпературных механических свойств проката предусматривала нагрев указанных образцов со скоростью не более 10 °С/мин до заданной температуры испытания, выдержку в течение 15 мин и проведение испытания на статическое одноосное растяжение/сжатие.

**Результаты и обсуждение.** Представлены результаты экспериментальных исследований механических свойств различных марок сталей наиболее широко применяемого в настоящее время строительного металлопроката, включая прокат с повышенными показателями термостойкости в условиях огневого воздействия. Полученные данные оформлены в виде графиков, позволяющих провести количественную оценку влияния повышения температуры в условиях огневого воздействия на прочностные характеристики строительного проката, что позволяет использовать эту информацию при проектировании и эксплуатации строительных металлоконструкций, а также при разработке расчетно-аналитических методов определения пределов огнестойкости строительных металлоконструкций.

**Заключение.** Полученные данные по огнестойкости указанной металлопродукции позволяют осуществлять более обоснованное проектирование в строительстве, обеспечивая повышение безопасности и устойчивости зданий и сооружений к огневому воздействию при пожаре. Расширение возможностей для использования сортамента проката с повышенной термостойкостью позволит снизить металлоемкость и себестоимость строительства, повысит конкурентоспособность и привлекательность применения стальных конструкций в строительстве зданий и сооружений различного назначения.

**Ключевые слова:** огнестойкость; класс прочности; модуль упругости; предел текучести; временное сопротивление

Исследования проведены в рамках комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства по теме «Разработка и освоение инновационной технологии производства высокопрочного стального проката для изготовления строительных конструкций с нормируемым пределом огнестойкости с целью обеспечения эксплуатационной безопасности производственных и гражданских объектов в экстремальных условиях» (Постановление Правительства РФ № 218 от 09.04.2010, договор № 075-11-2020-042 от 14.12.2020).

**Для цитирования:** Голованов В.И., Крючков Г.И., Стрекалев А.Н., Комиссаров А.А., Тихонов С.М. Исследование механических свойств современного металлопроката строительного назначения при повышенных

температурах // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 2. С. 52–62. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.02.52-62.

✉ Голованов Владимир Ильич, e-mail: pavelgol1@yandex.ru

# A study on mechanical properties of modern rolled structural metal at elevated temperatures

Vladimir I. Golovanov<sup>1</sup> ✉, Gennadiy I. Kryuchkov<sup>2</sup>, Aleksandr N. Strekalev<sup>3</sup>,  
Aleksandr A. Komissarov<sup>4</sup>, Sergey M. Tikhonov<sup>4</sup>

<sup>1</sup>All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, Balashikha, Moscow Region, Russian Federation

<sup>2</sup>The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Moscow, Russian Federation

<sup>3</sup>Research Institute of Building Constructions (TsNIIISK) named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction, Moscow, Russian Federation

<sup>4</sup>National University of Science and Technology "MISIS", Moscow, Russian Federation

## ABSTRACT

**Introduction.** The purpose of this work is to obtain experimental data on the numerical dependence between the strength characteristics of the most widely used grades of rolled structural metal products (including those featuring high heat resistance) and a critical increase in temperature.

**Materials and methods.** As the subject of research we used specimens of rolled metal of the following strength classes: C255 (steel St3sp), C345 (steel 09G2S), C390 (steel 14G2), and rolled metal that had high heat resistance properties S355P (steel 06MBF). Small cylindrical specimens of type B, with M10 thread on heads and the working diameter of 4 mm were used to conduct the static tension and compression tests of mechanical properties. The procedure encompassed the heating of the specimens to the pre-set testing temperature at the rate of not more than 10 °C/min, their 15-minute exposure, and testing for static uniaxial tension/compression.

**Results and discussion.** The results of the experimental research on mechanical properties of different widely used grades of rolled structural steel, including heat resistant rolled metal, subjected to the fire impact, are presented in the article. The data are presented in the form of diagrams used to make a quantitative assessment of the effect of elevated temperature on the strength properties of rolled structural metal under the impact of fire. This information can be contributed to the design and operation of structural metal constructions to develop analytical methods of identifying the fire-resistance limits of constructions made of structural metal.

**Conclusion.** The new data on the fire resistance of metal products allow for a more reasonable building design, higher safety and resistance of buildings and structures to the effect of fire. A wider area of application of the whole range of rolled products featuring higher heat resistance will reduce metal consumption and construction costs, boost competitiveness and attractiveness of steel structures and their application in the construction of buildings and structures of various purposes.

**Keywords:** fire resistance; strength class; modulus of elasticity; yield strength; temporary resistance

The research was conducted within the framework of an integrated project on the establishment of a high-tech production facility. The project is titled "Development and assimilation of an innovative high-strength rolled steel production technology towards the manufacturing of building structures featuring a regulated fire resistance limit to ensure the operating safety of production and civil engineering facilities under extreme conditions" (RF Government Resolution No. 218 of October 9, 2010, Agreement No. 075-11-2020-042 of December 14, 2020).

**For citation:** Golovanov V.I., Kryuchkov G.I., Strekalev A.N., Komissarov A.A., Tikhonov S.M. A study on mechanical properties of modern rolled structural metal at elevated temperatures. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(2):52-62. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.02.52-62 (rus).

✉ Vladimir Il'ich Golovanov, e-mail: pavelgol1@yandex.ru

## Введение

В настоящее время при строительстве зданий и сооружений широко используется стальной прокат. Основным требованием к этой металлопродукции является наличие высокой конструкционной прочности, под которой следует понимать сопротивление стали нагрузкам, имеющим место при эксплуатации сооружений: статическим, ударным, циклическим. Подобные нагрузки особенно опасны при экстремальном

нагреве стальных конструкций в условиях огневого воздействия при пожаре [1–5]. В этом случае элементы стальных конструкций, каркасов зданий, оказавшиеся в зоне высоких температур, теряют свои прочностные свойства, что приводит к снижению несущей способности металлоконструкций и разрушению сооружения [6–10]. Поэтому для строительных металлоконструкций особенно важным является максимально продолжительное сохранение нормативного уровня прочностных характеристик

при воздействии высоких температур, определяемое механическими свойствами стального проката, используемого для их изготовления. Действующими строительными и противопожарными нормами устанавливаются требования к пределам огнестойкости строительных конструкций [10, 11].

Современная наука располагает определенной информацией о металлофизических процессах, определяющих изменение структурно-фазовых характеристик стального металлопроката при экстремальном нагреве, установлены общие закономерности снижения прочностных характеристик стали при повышении температуры [11–15]. Однако в настоящее время отсутствует практическая информация по особенностям изменения прочностных характеристик наиболее распространенных марок современных строительных сталей (в том числе, прокат с повышенными показателями термостойкости) от температуры при нагреве.

Основной целью данной работы является получение экспериментальных данных о численной зависимости основных прочностных характеристик наиболее распространенных марок строительного проката от повышения температуры при нагреве до критических температур, необходимых для расчета пределов огнестойкости стальных строительных конструкций.

### Материалы, оборудование и методика проведения испытаний

В рамках выполнения данной работы были проведены исследования механических характеристик металлопроката при повышенных температурах в соответствии с ГОСТ 9651–84 «Металлы. Методы испытаний на растяжение при повышенных температурах». Использовали образцы проката классов прочности: С255, С345, С390, а также огнестойкого проката С355П. Статические испытания механических свойств на растяжение и сжатие проводили на малогабаритных цилиндрических образцах типа В, с резьбой М10 на головках и рабочим диаметром 4 мм. Методика определения высокотемпературных механических свойств проката предусматривала нагрев указанных образцов со скоростью не более 10 °С/мин до заданной температуры испытания, выдержку в течение 15 мин и проведение испытания на статическое одноосное растяжение. При проведении испытаний температуру образцов варьировали на различном уровне от комнатной (20 °С) до 650–700 °С с шагом 50–100 °С. Скорость движения захватов разрывной машины составляла 5 мм/мин.

Поскольку отдельные элементы металлоконструкций могут работать не только на растяжение, но и на сжатие (колонны), целесообразно оценивать

высокотемпературные прочностные характеристики рассматриваемых образцов металлопроката для этих условий нагружения. Для этого были дополнительно проведены высокотемпературные испытания малогабаритных образцов проката класса прочности С255 на сжатие по ГОСТ 25.503–97 «Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов».

На практике для оценки уровня термостойкости проката используют коэффициент огнестойкости  $\gamma_T$ , который определяется как отношение предела текучести образца при температуре 600 °С к его пределу текучести при комнатной температуре  $\gamma_T = \sigma_T^{600\text{ °С}} / \sigma_T^{20\text{ °С}}$ , номинальное значение которого для огнестойкого проката должно соответствовать соотношению  $\gamma_T \geq 0,6$ . Иначе говоря, огнестойкий прокат должен характеризоваться пределом текучести при 600 °С не ниже 60 % от его номинального значения при 20 °С [16–18].

Результаты анализа испытаний по определению прочностных свойств малогабаритных образцов при высоких температурах и огневых испытаний крупногабаритных балок по ГОСТ 30247.1–94 «Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Несущие и ограждающие конструкции» позволяют сделать вывод о возможности использования полученных экспериментальных данных при разработке расчетно-аналитического метода определения пределов огнестойкости стальных конструкций.

Для этого проводят теплотехнические расчеты по определению предела огнестойкости рассматриваемой металлоконструкции — критической температуры, соответствующей потере ее несущей способности, предусматривающие прочностной расчет и определение времени от начала теплового воздействия до достижения критической температуры [19–24]. Однако в настоящее время отсутствуют актуальные справочные данные об изменении прочностных параметров современного строительного металлопроката при повышенных температурах (включая прокат с повышенными показателями термостойкости), необходимые для практической реализации указанных расчетов.

Если задан требуемый предел огнестойкости конструкции (за исключением конструкций в составе противопожарных преград), не превышающий R15 (RE15, REI15), то допускается применение незащищенных стальных конструкций при условии, что их предел огнестойкости по результатам испытаний или расчетов составляет R8 и более, либо, независимо от их фактического предела огнестойкости, если их приведенная толщина металла в соответствии с п. 5.4.3 СП 2.13130.2020 составляет не менее 4,0 мм.

В соответствии с ГОСТ 27772–2015 «Прокат для строительных стальных конструкций. Общие технические условия», горячекатаный прокат, предназначенный для строительных стальных конструкций, изготавливается из металлопроката следующих классов прочности: С235, С245, С255, С345, С345К, С355, С355, С355-1, С355-К, С355П, С375, С390, С390-1, С440, С550, С590. Прочностные характеристики (класс прочности) при нормальной температуре, а также динамика изменения прочностных характеристик при повышении температуры зависят как от химического состава стали, так и от структурно-фазовых характеристик металлопроката, обусловленных технологическими режимами его производства.

Образцы строительного проката для проведения исследований прочностных характеристик при повышенных температурах выбирали исходя из следующих критериев.

1. Соответствие ГОСТ 27772–2015 «Прокат для строительных стальных конструкций. Общие технические условия».

2. Серийный выпуск металлопроката.

3. Широкое применение в строительстве.

4. Соответствие основным группам прочности.

Исходя из вышеизложенного, из каждой группы проката (включая огнестойкий) были выбраны марки стали для проведения испытаний. В рамках экспериментальных исследований были изготовлены образцы из стали следующих классов прочности:

- прокат обычной прочности — С255 (сталь СтЗсп);
- прокат повышенной прочности — С345 (сталь 09Г2С);
- прокат высокой прочности — С390 (сталь 14Г2);

- прокат с повышенными показателями термостойкости — С355П (сталь 06МБФ).

### Результаты эксперимента

Характер изменения прочностных характеристик проката при нагреве, необходимых для расчета строительных металлоконструкций, установленный для исследованных образцов в ходе экспериментальных исследований, показан на графиках (рис. 1–3). Ключевым параметром для оценки огнестойкости рассматриваемых опытных образцов проката является предел текучести при огневом воздействии, поскольку именно он определяет начало и интенсивность пластической деформации строительных металлоконструкций, сопровождающейся их разрушением в условиях пожара. По действующим нормативам за условную температуру этого огневого воздействия принимается 600 °С.

Для проката относительно низкой прочности (С255, С345) модуль упругости  $E$  интенсивно снижается по мере нагрева относительно номинальных значений, имеющих место при комнатной температуре (рис. 1). Наиболее медленно данный параметр снижается при нагреве огнестойкого проката С355П. Соответственно, можно считать, что прокат с повышенными показателями термостойкости сохраняет достаточно высокую упругую составляющую деформации до 700 °С без разрушения.

Изменение предела текучести при повышении температуры испытания характеризуется наиболее высокими значениями данного параметра для огнестойкого проката С355П для всех температурных точек (рис. 2). Термостойкий прокат теряет прочностные характеристики по мере нагрева менее интенсивно, чем, например, С390, хотя нормативные значения прочностных характеристик у последнего

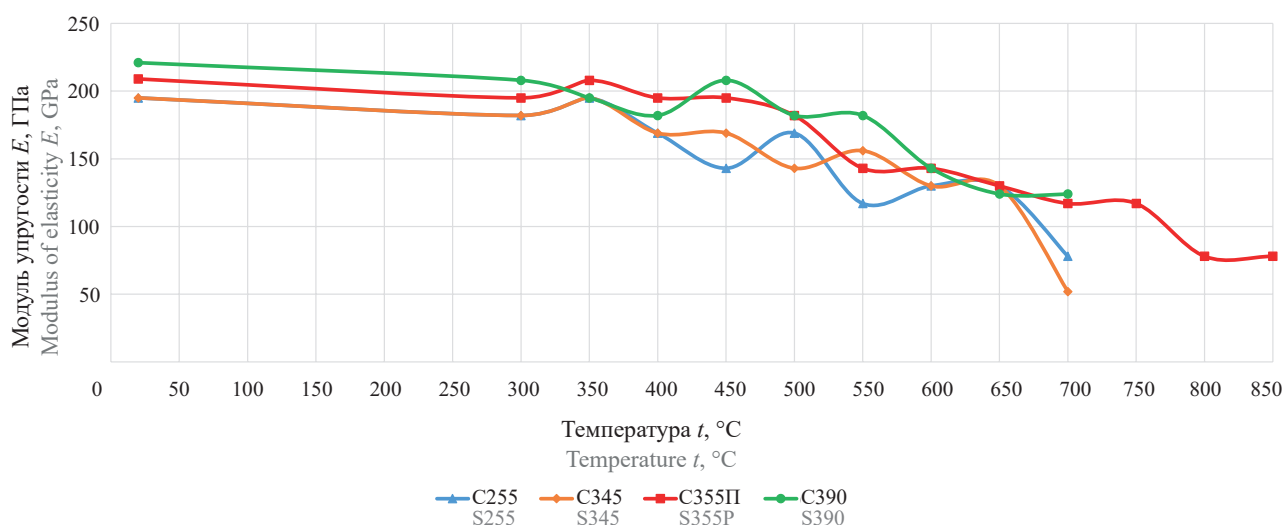


Рис. 1. График зависимости модуля упругости от температуры испытания

Fig. 1. The modulus of elasticity — test temperature dependence diagram

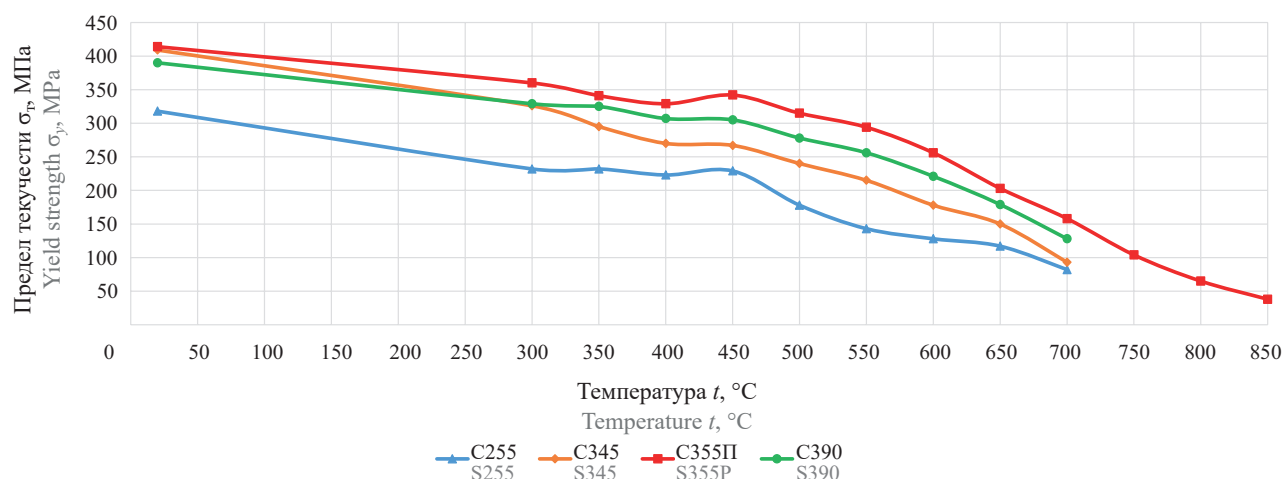


Рис. 2. График зависимости предела текучести от температуры испытания

Fig. 2. The yield strength — test temperature dependence diagram

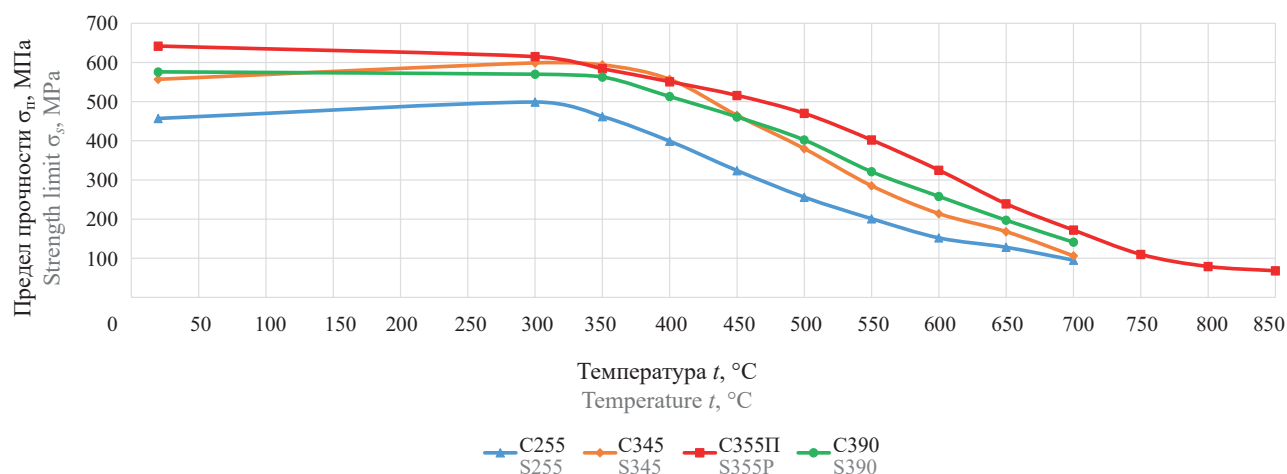


Рис. 3. График зависимости предела прочности от температуры испытания

Fig. 3. The strength limit — test temperature dependence diagram

должны быть выше. Примерно такая же зависимость характерна и для временного сопротивления (рис. 3).

Следует отметить, что для образцов проката рассматриваемого сортамента характерна более слабая зависимость предела текучести от температуры в низкотемпературной области (медленное разупрочнение), чем в высокотемпературной области (интенсивное разупрочнение). При этом медленное разупрочнение переходит в интенсивное разупрочнение при температуре около 400–450 °C. Получение сравнительно высокого уровня огнестойкости для проката C355П достигается за счет того, что интенсивное разупрочнение начинается при более высокой температуре. Это позволяет аппроксимировать зависимости прочностных характеристик от температуры в виде кусочно-гладкой функции, т.е. различных уравнений для определенных диапазонов температуры.

Диаграммы нагружения при испытаниях на растяжение и сжатие для малоуглеродистой стали

СтЗсп (класс прочности C255) имеют одинаковый характер, значения предела текучести при температуре 20 °C и при 400 °C незначительно отличаются друг от друга (таблица). Это позволяет принять допущение, что при использовании расчетно-аналитического метода определения пределов огнестойкости стальных конструкций, работающих на сжатие, возможно использование данных об изменении прочностных характеристик малоуглеродистых строительных сталей, полученных по результатам проведения высокотемпературных испытаний на растяжение.

Поскольку состав и свойства строительных сталей никогда не бывают строго одинаковыми, а результаты их испытаний отличаются значительным разбросом, для учета динамики изменения прочностных характеристик при повышении температуры могут быть использованы соответствующие усредненные кривые (рис. 4–6).

Проведенные испытания позволяют определить коэффициенты изменения механических



Результаты измерений предела текучести малоуглеродистой стали Ст3сп (класс прочности С255) при испытаниях на сжатие и растяжение

Results of measuring the yield strength of mild steel St3sp (strength class C255) in compression and tensile tests

Температура испытания, °C Test temperature, °C	При сжатии предел текучести $\sigma_y$ , МПа In compression yield strength $\sigma_y$ , MPa	При растяжении предел текучести $\sigma_y$ , МПа Tensile yield strength $\sigma_y$ , MPa
20	264	318
400	229	223

свойств проката рассмотренного сортамента при повышенных температурах (температурный коэффициент снижения модуля упругости  $\gamma_y$ , температурный коэффициент снижения предела текучести  $\gamma_T$ , температурный коэффициент снижения предела прочности  $\gamma_B$ ). Полученные графики для образцов металлопроката С255, С345, С390 были объединены в один методом нахождения обобщенного (среднего) значения коэффициента изменения механических свойств данного сортамента.

В результате регрессионного анализа экспериментальных данных были получены эмпирические зависимости прочностных характеристик строительного проката от температуры испытания.

Коэффициент снижения модуля упругости определяется следующим образом:

Марки классов прочности С255, С345, С390 в диапазонах:

- $20^\circ\text{C} < t < 300^\circ\text{C}$ ,  $\gamma_y = -0,0002 \cdot t + 1,0048$ ;
- $300^\circ\text{C} < t < 400^\circ\text{C}$ ,  $\gamma_y = -3 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 + 0,0179 \cdot t - 2,0267$ ;
- $400^\circ\text{C} < t < 700^\circ\text{C}$ ,  $\gamma_y = -2 \cdot 10^{-8} \cdot t^3 + 3 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 - 0,013 \cdot t + 3,0058$ .

Марка класса прочности С355П в диапазонах:

- $20^\circ\text{C} < t < 300^\circ\text{C}$ ,  $\gamma_y = -0,0003 \cdot t + 1,005$ ;
- $300^\circ\text{C} < t < 550^\circ\text{C}$ ,  $\gamma_y = -3 \cdot 10^{-8} \cdot t^3 + 2 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 - 0,0066 \cdot t - 1,5265$ ;

- $550^\circ\text{C} < t < 850^\circ\text{C}$ ,  $\gamma_y = 1 \cdot 10^{-8} \cdot t^3 - 3 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 + 0,0217 \cdot t - 4,2679$ .

Коэффициент снижения предела текучести определяется следующим образом.

Марки классов прочности С255, С345, С390 в диапазонах:

- $20^\circ\text{C} < t < 400^\circ\text{C}$ ,  $\gamma_T = -0,0007 \cdot t + 1,0147$ ;
- $400^\circ\text{C} < t < 700^\circ\text{C}$ ,  $\gamma_T = 5 \cdot 10^{-9} \cdot t^3 - 1 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 + 0,0058 \cdot t - 0,1535$ .

Марка класса прочности С355П в диапазонах:

- в диапазоне  $20^\circ\text{C} < t < 400^\circ\text{C}$ ,  $\gamma_T = -0,0005 \cdot t + 1,0147$ ;
- в диапазоне  $400^\circ\text{C} < t < 850^\circ\text{C}$ ,  $\gamma_T = 5 \cdot 10^{-9} \cdot t^3 - 1 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 + 0,0058 \cdot t - 0,1535$ .

Коэффициент снижения предела прочности определяется следующим образом.

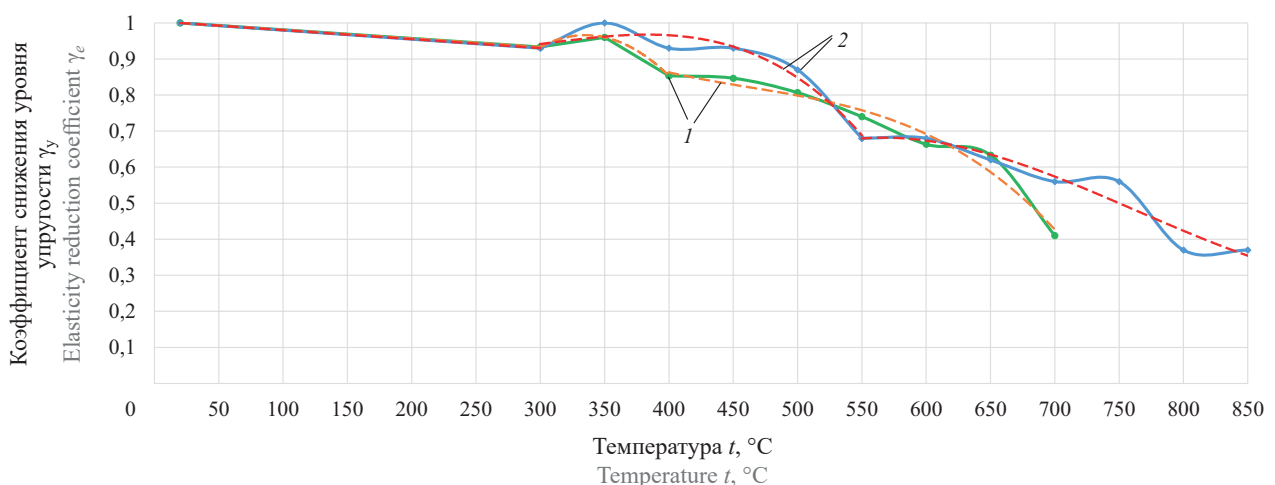
Марки классов прочности С255, С345, С390 в диапазонах:

- $20^\circ\text{C} < t < 300^\circ\text{C}$ ,  $\gamma_B = -0,0002 \cdot t + 0,9962$ ;
- $300^\circ\text{C} < t < 700^\circ\text{C}$ ,  $\gamma_B = 2 \cdot 10^{-8} \cdot t^3 - 3 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 + 0,0108 \cdot t - 0,2295$ .

Марка класса прочности С355П:

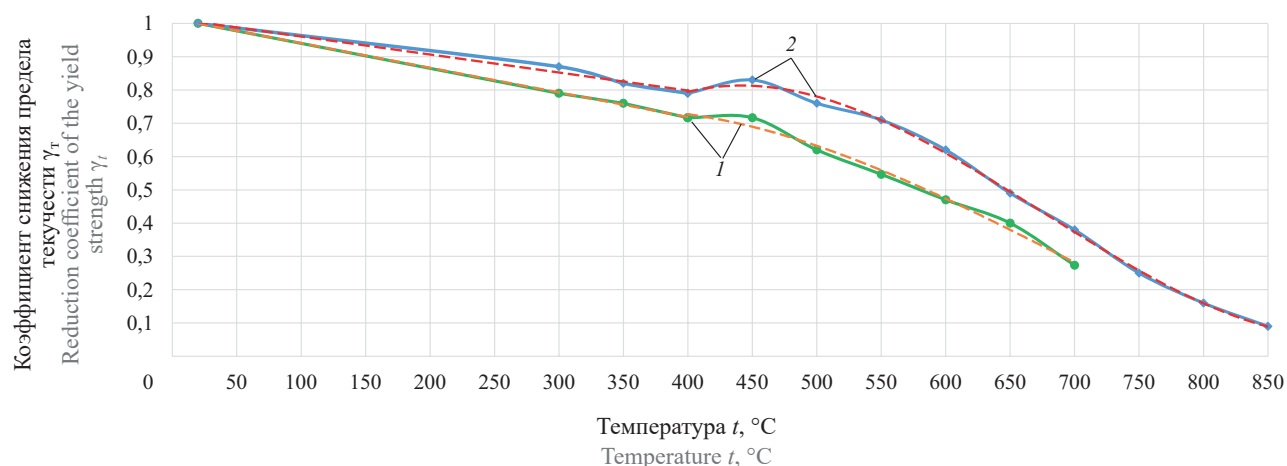
- $20^\circ\text{C} < t < 300^\circ\text{C}$ ,  $\gamma_B = -0,0001 \cdot t + 1,0029$ ;
- $300^\circ\text{C} < t < 850^\circ\text{C}$ ,  $\gamma_B = 1 \cdot 10^{-8} \cdot t^3 - 2 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 + 0,0082 \cdot t - 0,1936$ .

Полученные результаты подтверждают, что металлопрокат с повышенными показателями



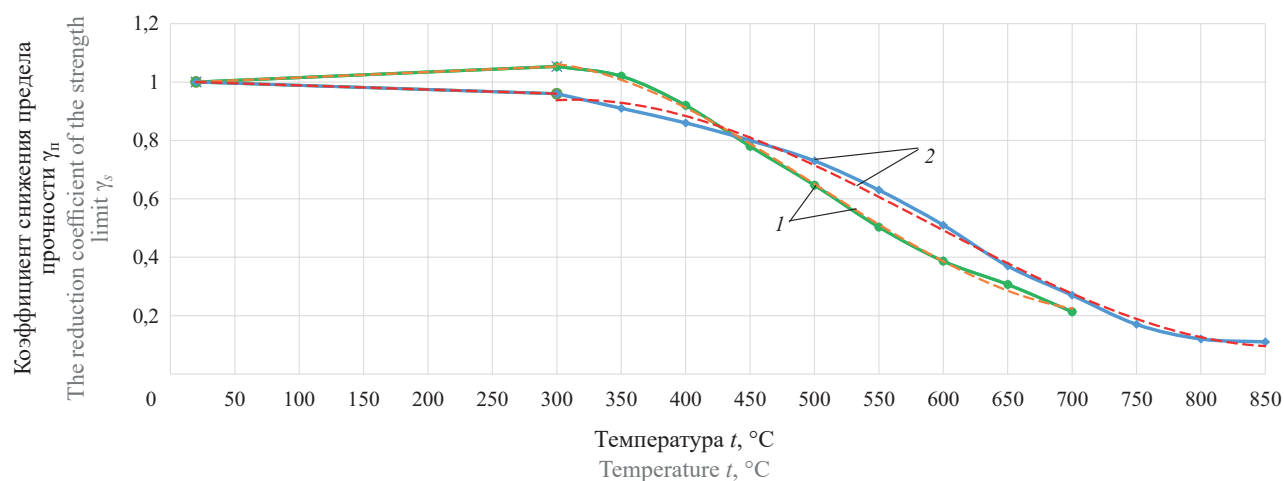
**Рис. 4.** Изменение коэффициента снижения модуля упругости строительных сталей (включая термостойкий прокат) при повышении температуры испытания: сплошная линия — эксперимент; пунктирная линия — расчет; 1 — С255, С345, С390; 2 — С355П

**Fig. 4.** A change in the reduction coefficient of the modulus of elasticity of structural steels (including heat-resistant rolled steel) at elevated test temperature: solid line — the experiment; dashed line — the calculation; 1 — C255, C345, C390; 2 — C355P



**Рис. 5.** Изменение коэффициента снижения предела текучести строительного проката (включая термостойкий прокат) при повышении температуры испытания: сплошная линия — эксперимент; пунктирная линия — расчет; 1 — C255, C345, C390; 2 — C355П

**Fig. 5.** A change in the reduction coefficient of the yield strength of rolled structural steel (including heat-resistant rolled steel) at elevated test temperature: solid line — the experiment; dashed line — the calculation; 1 — C255, C345, C390; 2 — C355P



**Рис. 6.** Изменение коэффициента снижения предела прочности строительных сталей (включая термостойкий прокат) при повышении температуры испытания: сплошная линия — эксперимент; пунктирная линия — расчет; 1 — C255, C345, C390; 2 — C355П

**Fig. 6.** A change in the reduction coefficient of the strength limit of structural steels (including heat-resistant rolled products) at elevated test temperature: solid line — experiment; dashed line — calculation; 1 — C255, C345, C390; 2 — C355P

термостойкости имеет более высокие показатели сохранности прочностных характеристик в области температур огневого воздействия при пожаре. Применение огнестойкого проката при изготовлении строительных металлоконструкций может рассматриваться как один из способов повышения огнестойкости зданий и сооружений, наряду с огнезащитными покрытиями.

Анализ технического регулирования в области строительства показывает, что в Российской Федерации действует комплекс нормативных технических и методических документов, определяющих регламент оценки огнестойкости строительных металлоконструкций и их применения.

Вместе с тем до настоящего времени остается открытым ряд вопросов в этой области. Не отработана методика практического применения расчетно-аналитических методов определения пределов огнестойкости стальных строительных конструкций, предусмотренных частью 10 ст. 87 Федерального закона «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» от 22.07.2008 № 123-ФЗ. Также необходимо отметить, что в отечественных строительных нормах не учитывается возможность применения современных сталей с повышенными показателями термостойкости для обеспечения требуемой пожарной устойчивости зданий и сооружений. Это определяет целесо-

образность разработки предложений по корректировке действующих и подготовки новых нормативных документов (национальных стандартов, сводов правил и т.п.), учитывающих возможность использования строительных металлоконструкций из термостойкого проката, что позволит снизить стоимость и сократить сроки строительства при обеспечении необходимого уровня пожарной безопасности.

### Выводы

Проведены исследования механических и эксплуатационных свойств наиболее распространенных видов низколегированного проката, используемых для изготовления строительных металлоконструкций, включая термостойкий прокат, обладающий повышенной сопротивляемостью к высокотемпературному воздействию.

По результатам проведенных испытаний образцов проката различных классов прочности С255 (сталь СтЗсп), С345 (сталь 09Г2С), С390 (сталь 14Г2), включая класс прочности с повышен-

ными показателями термостойкости С355П (сталь 06МБФ), определены показатели их прочностных характеристик при повышенных температурах, которые могут быть использованы при проектировании и изготовлении металлоконструкций строительного назначения, а также при разработке расчетно-аналитических методов определения пределов их огнестойкости. Рассмотрена динамика изменения этих свойств в процессе нагрева металлопроката в диапазоне температур, установленном для термостойких сталей.

Полученные данные по огнестойкости указанной металлопродукции позволяют осуществлять более обоснованное проектирование в строительстве, обеспечивая повышение безопасности и устойчивости зданий и сооружений к огневому воздействию при пожаре. Расширение возможностей для использования сортамента проката с повышенной термостойкостью позволит снизить металлоемкость и себестоимость строительства, повысит конкурентоспособность и привлекательность применения стальных конструкций в строительстве зданий и сооружений различного назначения.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Яковлев А.И. Расчет огнестойкости строительных конструкций. М. : Стройиздат, 1988. 144 с.
2. Голованов В.И., Пронин Д.Г. Влияние развития нормативной базы в области пожарной безопасности на применение стали в строительстве // Промышленное и гражданское строительство. 2021. № 10. С. 24–29. DOI: 10.33622/0869-7019.2021.10.24-29
3. Kordina K., Meyer-Ottens C. Beton Brandschutz Handbuch. 2 Auflage. Düsseldorf : Verlag Bau + Technik, 1999. 284 p.
4. Heo Y.-S., Sanjayan J.G., Han C.-G., Han M.-C. Synergistic effect of combined fibers for spalling protection of concrete in fire // Cement and Concrete Research. 2010. Vol. 40. Issue 10. Pp. 1547–1554. DOI: 10.1016/j.cemconres.2010.06.011
5. Дешевых Ю.И. Гармонизация российских и международных нормативных документов в области пожарной безопасности // Стандарты и качество. 2013. № 10. С. 42–43. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20465897>
6. Голованов В.И., Пехотиков А.В., Павлов В.В. Огнезащита стальных и железобетонных конструкций производственных зданий и сооружений // Безопасность труда в промышленности. 2021. № 9. С. 50–56. DOI: 10.24000/0409-2961-2021-9-50-56
7. Zilch K., Müller A., Reitmayer C. Erweiterte Zonenmethode zur brandschutztechnischen Bemessung von Stahlbetonstützen. URL: <https://www.zm-i.de/wp-content/uploads/2021/03/erweiterte-zonenmethode-zur-brandschutztechnischen-bemessung-von-stahlbetonstuetzen.pdf> (дата обращения: 30.06.2021).
8. Голованов В.И., Павлов В.В., Пехотиков А.В. Оценка огнезащитной эффективности покрытий для стальных конструкций // Пожарная безопасность. 2020. № 4. С. 43–54. DOI: 10.37657/vniipo.pb.2020.101.4.004
9. Gravit M., Klementev B., Shabunina D. Fire protection of steel structures with epoxy coatings under cryogenic exposure // Buildings. 2021. Vol. 11. Issue 11. P. 537. DOI: 10.3390/buildings11110537
10. Клементьев Б.А., Калач А.В., Гравит М.В. Сравнительный анализ требований России и США к огнестойкости строительных конструкций нефтеперерабатывающих и нефтехимических заводов // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2021. Т. 30. № 5. С. 5–22. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.05.5-22



11. Голованов В.И., Крючков Г.И. Оценка огнестойкости стальных конструкций при нормируемых температурных режимах пожара // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2021. № 3. С. 52–60. DOI: 10.25257/FE.2021.3.52-60
12. Moore D.B., Lennon T. Fire engineering design of steel structures // Progress in Structural Engineering and Materials. 1997. Vol. 1. Issue. 1. Pp. 4–9. DOI: 10.1002/pse2260010104
13. Федоров В.С., Левитский В.Е., Молчадский И.С., Александров А.В. Огнестойкость и пожарная опасность строительных конструкций. М. : Изд-во АСВ, 2009. 408 с.
14. Maraveas C., Irakas 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
15. Бартелеми Б., Крюппа Ж. Огнестойкость строительных конструкций / пер. с фр. М. : Стройиздат, 1985. 216 с.
16. Комиссаров А.А., Тихонов С.М., Тен Д.В., Матросов М.Ю., Глухов П.А., Пехотилов А.В., Кузнецов Д.В. Сравнительная огнестойкость современных строительных сталей // Сталь. 2021. № 11. С. 40–45.
17. Одесский П.Д., Ведяков И.И. Сталь в строительных металлических конструкциях. М. : Металлургиздат, 2018. 906 с.
18. Одесский П.Д., Кулик Д.В. Стали с высоким сопротивлением экстремальным воздействиям. М. : Интермет Инжиниринг, 2008. 239 с.
19. Ройтман В.М., Голованов В.И. Необходимость технического регулирования огнестойкости зданий с учетом возможности комбинированных особых воздействий с участием пожара // Пожарная безопасность. 2014. № 1. С. 86–92.
20. Гордиенко Д.М., Лагозин А.Ю., Мордвинова А.В., Шебеко Ю.Н., Некрасов В.П. Обеспечение пожарной безопасности морских стационарных нефтегазодобывающих платформ // Научно-технический сборник. Вести газовой науки. 2019. № 2 (39). С. 136–142.
21. Гордиенко Д.М., Вогман Л.П., Горшков В.И., Шебеко Ю.Н., Мелихов А.С., Леончук П.А., Мордвинова А.В. Обеспечение пожарной безопасности производственных объектов, исследования и разработка нормативных документов ФГБУ ВНИИПО МЧС России в области предупреждения пожаров и взрывов // Безопасность труда в промышленности. 2017. № 6. С. 5–20. DOI: 10.24000/0409-2961-2017-6-5-20
22. Stucchi R., Amberg F. A practical approach for tunnel fire // Structural Engineering International. 2020. Vol. 30. Issue 4. Pp. 515–529. DOI: 10.1080/10168664.2020.1772697
23. Dehn F., Werther N., Knitl J. Großbrandversuche für den City-Tunnel Leipzig. 2006 Ernst&Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH&Co.KG. Berlin : Beton-und Stahlbetonbau, 2006. Vol. 101. Heft 8. S. 631–635. DOI: 10.1002/best200608186
24. Dehn F., Werther N. Brandversuche an Tunnelinnenschalenbetonen für den 30-Nordtunnel in Madrid. 2006 Ernst&Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH&Co. KG. Berlin : Beton-und Stahlbetonbau, 2006. Vol. 101. Heft 9. S. 729–731. DOI: 10.1002/best.200608187

## REFERENCES

1. Yakovlev A.I. *Calculation of fire resistance of building structures*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1988; 143. (rus).
2. Golovanov V.I., Pronin D.G. The impact of the development of the regulatory framework in the field of fire safety on the use of steel structures in construction. *Promyshlennoe i Grazhdanskoe Stroitel'stvo/Industrial and Civil Engineering*. 2021; 10:24-29. DOI: 10.33622/0869-7019.2021.10.24-29
3. Kordina K., Meyer-Ottens C. *Beton brandschutz. Handbuch. 2 Auflage*. Düsseldorf, Verlag Bau + Technik, 1999; 284. (ger).
4. Heo Y.-S., Sanjayan J.G., Han C.-G., Han M.-C. Synergistic effect of combined fibers for spalling protection of concrete in fire. *Cement and Concrete Research*. 2010; 40(10):1547-1554. DOI: 10.1016/j.cemconres.2010.06.011
5. Deshevych Yu.I. Harmonization of the Russian and international regulatory documents in the field of fire safety. *Standards and Quality*. 2013; 10:42-43. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20465897> (rus).
6. Golovanov V.I., Pekhotikov A.V., Pavlov V.V. Fire protection of steel and reinforced concrete structures of industrial buildings and structures. *Occupational Safety in Industry*. 2021; 9:50-56. DOI: 10.24000/0409-2961-2021-9-50-56 (rus).

7. Zilch K., Müller A., Reitmayer C. *Erweiterte zonenmethode zur brandschutztechnischen bemessung von stahlbetonstützen*. URL: <https://www.zm-i.de/wp-content/uploads/2021/03/erweiterte-zonenmethode-zur-brandschutztechnischen-bemessung-von-stahlbetonstuetzen.pdf> (accessed: June 30, 2021).
8. Golovanov V.I., Pekhotikov A.V., Pavlov V.V. Evaluation of fire-retardant effectiveness of coatings for steel structures. *Pozharnaya bezopasnost/Fire Safety*. 2020; 4:43-54. DOI: 10.37657/vniipo.pb.2020.101.4.004 (rus).
9. Gravit M., Klementev B., Shabunina D. Fire protection of steel structures with epoxy coatings under cryogenic exposure. *Buildings*. 2021; 11(11):537. DOI: 10.3390/buildings11110537
10. Klementev B.A., Kalach A.V., Gravit M.V. A comparative analysis of the requirements of Russia and the United States to the fire resistance of building structures of oil refineries and petrochemical plants. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2021; 30(5):5-22. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.05.5-22 (rus).
11. Golovanov V., Kryuchkov G. Steel structures fire resistance assessment under standardized fire temperature regimes. *Fires and Emergencies: Prevention, Elimination*. 2021; 3:52-60. DOI: 10.25257/FE.2021.3.52-60 (rus).
12. Moore D.B., Lennon T. Fire engineering design of steel structures. *Progress in Structural Engineering and Materials*. 1997; 1(1):4-9. DOI: 10.1002/pse2260010104
13. Fedorov V.S., Levitskiy V.E., Molchadskiy I.S., Aleksandrov A.V. *Fire behavior and fire danger of building designs*. Moscow, ASV Publ., 2009; 408. (rus).
14. 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
15. Barthélémy B., Kruppa J. *Résistance au feu des structures béton — acier — bois*. Paris, Editions Eyrolles, 1978; 216. (fra).
16. Komissarov A.A., Tikhonov S.M., Ten D.V., Matrosov M.Yu., Glukhov P.A., Pekhotikov A.V., Kuznetsov D.V. Comparative fire resistance of modern building steels. *Steel*. 2021; 11:40-45. (rus).
17. Odessky P.D., Vedyakov I.I. *Steel in building metal structures*. Moscow, Metallurgizdat Publ., 2018; 906. (rus).
18. Odessky P.D., Kulik D.V. *Steels with high resistance to extreme impacts*. Moscow, Internet Engineering Publ., 2008; 239. (rus).
19. Roytman V.M., Golovanov V.I. Need for technical regulation of the buildings fire resistance taking into account the possible combined hazardous fire exposure. *Pozharnaya bezopasnost/Fire Safety*. 2014; 1:86-93. (rus).
20. Gordiyenko D.M., Lagozin A.Yu., Mordvinova A.V., Shebeko Yu.N., Nekrasov V.P. Fire protection support of fixed offshore platforms for oil and gas reduction. *Scientific-Technical Collection Book "Vesti gazovoy nauki"*. 2019; 2(39):136-142. (rus).
21. Gordienko D.M., Vogman L.P., Gorshkov V.I., Shebeko Yu.N., Melihov A.S., Leonchuk P.A., Mordvinova A.V. Ensuring fire safety of production objects, researches and development of normative documents of FGBU VNIPO EMERCOM of Russia in the field of fires and explosions prevention. *Occupational Safety in Industry*. 2017; 6:5-20. DOI: 10.24000/0409-2961-2017-6-5-20 (rus).
22. Stucchi R., Amberg F. A practical approach for tunnel fire. *Structural Engineering International*. 2020; 30(4):515-529. DOI:10.1080/10168664.2020.1772697
23. Dehn F., Werther N., Knitl J. Gro\_brandversuche für den City-Tunnel Leipzig. *Beton- und Stahlbetonbau*. 2006; 101(8):631-636 DOI: 10.1002\_best.200608186 (ger).
24. Dehn F., Werther N. Brandversuche an Tunnelinnenschalenbetonen für den 30-Nordtunnel in Madrid. 2006 Ernst&Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH&Co.KG. *Beton- und Stahlbetonbau*. 2006; 101(9):729-731. DOI: 10.1002/best.200608187 (ger).

Поступила 09.03.2022, после доработки 28.03.2022;

принята к публикации 04.04.2022

Received March 9, 2022; Received in revised form March 28, 2022;

Accepted April 4, 2022

### Информация об авторах

**ГОЛОВАНОВ Владимир Ильич**, д-р техн. наук, главный научный сотрудник, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обо-

### Information about the authors

**Vladimir I. GOLOVANOV**, Dr. Sci. (Eng.), Chief researcher, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and

роны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; РИНЦ ID: 731807; ORCID: 0000-0001-6043-0537; e-mail: pavelgoll@yandex.ru

**КРЮЧКОВ Геннадий Игоревич**, адъюнкт, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; РИНЦ ID: 1106326; Researcher ID: ACV-2350-2022; ORCID: 0000-0002-6906-1624; e-mail: dmuxa@bk.ru

**СТРЕКАЛЕВ Александр Николаевич**, заведующий сектором, Центральный научно-исследовательский институт строительных конструкций им. В.А. Кучеренко (ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко), НИЦ «Строительство», Россия, 109428, г. Москва, ул. 2-я Институтская, 6, стр. 1; РИНЦ ID: 761041; ORCID: 0000-0001-6146-7833; e-mail: alstrek@mail.ru

**КОМИССАРОВ Александр Александрович**, канд. техн. наук, заведующий лабораторией, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Россия, 119049, г. Москва, Ленинский пр-т, 4, стр. 1; РИНЦ ID: 755807; Scopus Author ID: 56553875000; Researcher ID: G-6717-2014; ORCID: 0000-0001-5125-9870; e-mail: komissarov.alex@gmail.com

**ТИХОНОВ Сергей Михайлович**, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Россия, 119049, г. Москва, Ленинский пр-т, 4, стр. 1; РИНЦ ID: 597006; Scopus Author ID: 7004844557; Researcher ID: AGJ-2867-2022; ORCID: 0000-0001-5305-9899; e-mail: tserg491@yandex.ru

#### Вклад авторов:

**Голованов В.И.** — научное руководство, обоснование концепции исследования, итоговые выводы, утверждение окончательного варианта статьи.

**Крючков Г.И.** — проведение исследования, проведение статистического анализа, подготовка и редактирование текста.

**Стрекалев А.Н.** — планирование исследований, анализ и обобщение данных литературы, доработка текста, итоговые выводы.

**Комиссаров А.А.** — проведение исследования, анализ и систематизация экспериментальных данных, развитие методологии, доработка текста.

**Тихонов С.М.** — проведение исследования, развитие методологии, доработка текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; ID RISC: 731807; ORCID: 0000-0001-6043-0537; e-mail: pavelgoll@yandex.ru

**Gennadiy I. KRYUCHKOV**, Adjunct, the State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ID RISC: 1106326; Researcher ID: ACV-2350-2022; ORCID: 0000-0002-6906-1624; e-mail: dmuxa@bk.ru

**Aleksandr N. STREKALEV**, Head of Sector, Research Institute of Building Constructions (TsNIISK) named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction, 2-ya Institutsкая St., 6, bld. 1, Moscow, 109428, Russian Federation; ID RISC: 761041; ORCID: 0000-0001-6146-7833; e-mail: alstrek@mail.ru

**Aleksandr A. KOMISSAROV**, Cand. Sci (Eng.), Head of Laboratory, National University of Science and Technology "MISIS", Leninskiy Prospect, 4, bld. 1, Moscow, 119049, Russian Federation; ID RISC: 755807; Scopus Author ID: 56553875000; Researcher ID: G-6717-2014; ORCID: 0000-0001-5125-9870; e-mail: komissarov.alex@gmail.com

**Sergey M. TIKHONOV**, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, National University of Science and Technology "MISIS", Leninskiy Prospect, 4, bld. 1, Moscow, 119049, Russian Federation; ID RISC: 597006; Scopus Author ID: 7004844557; Researcher ID: AGJ-2867-2022; ORCID: 0000-0001-5305-9899; e-mail: tserg491@yandex.ru

#### Contribution of the authors:

**Vladimir I. Golovanov** — scientific management, justification of the research concept, final conclusions, approval of the final version of the article.

**Gennadiy I. Kryuchkov** — conducting research, conducting statistical analysis, preparing and editing the text.

**Aleksandr N. Strekalev** — research planning, analysis and synthesis of the literature, finalization of the text, final conclusions.

**Aleksandr A. Komissarov** — conducting research, analyzing and systematizing experimental data, developing methodology, finalizing the text.

**Sergey M. Tikhonov** — conducting research, developing methodology, finalizing the text.

The authors declare no conflicts of interests.