

ПОЖАРОВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2024. Т. 33. № 3. С. 47–56
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2024; 33(3):47-56

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH PAPER

УДК 614.841.334.2

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2024.33.03.47-56>

Огнестойкость строительных конструкций из стального проката с повышенными показателями термостойкости

Владимир Ильич Голованов¹, Андрей Владимирович Пехотиков¹,
Дмитрий Николаевич Приступюк², Геннадий Игоревич Крючков²✉

¹ 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

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Статья посвящена экспериментальному и аналитическому исследованию несущей способности изгибаемых конструкций из обычного и огнестойкого стального проката при стандартном температурном режиме. Огневые испытания проводились с прокатными двутавровыми балками № 20Б1, изготовленными по ГОСТ Р 57837–2017 из сталей классов прочности С255, С390, и сварными двутавровыми балками 180 × 90 × 10 из сталей С355, С390, С355П, С390П длиной 3500 мм. Проведены эксперименты по определению высокотемпературных механических свойств новых марок стали.

Материалы и методы. Значения фактических пределов огнестойкости балок, полученные экспериментально, определены по ГОСТ 30247.1–94 и ГОСТ 30247.0–94. Теплотехническая часть расчета температуры в поперечном сечении стальных балок выполнена в программном комплексе ANSYS Mechanical. Расчет несущей способности проводился по разработанному методу и зарегистрированной программе для ЭВМ. Эксперименты по определению механических свойств металлопроката при высокотемпературном нагреве проводились на малогабаритных образцах в соответствии с ГОСТ 9651–84.

Результаты и их обсуждение. Экспериментально получены значения фактических пределов огнестойкости для балок двутаврового сечения из обычного и огнестойкого стального проката. Определены усредненные значения коэффициентов изменения предела текучести при повышенных температурах строительного проката, в том числе огнестойкого, которые можно использовать в расчетных моделях оценки огнестойкости стальных конструкций. Разработан программный комплекс расчета предела огнестойкости с учетом неравномерного распределения температуры в поперечном сечении конструкции. Расчетные значения пределов огнестойкости, полученные с использованием разработанной модели, коррелируют с экспериментальными данными для двутавровых балок из строительных и огнестойких сталей.

Выводы. Предел огнестойкости балок из огнестойкого стального проката С355П, С390П при стандартном температурном режиме наступает на 10–15 мин позднее, чем балок из рядового строительного проката. Результаты экспериментальных и расчетно-аналитических исследований подтвердили предположение о том, что для конструкций из огнестойких сталей время нагрева металла от начала огневого воздействия до достижения критической температуры в расчетном сечении увеличится. Это позволит обосновать их использование при проектировании зданий и сооружений в соответствии с требованиями нормативных документов по пожарной безопасности, а также способствует сокращению объемов применения огнезащитных материалов и уменьшению металлоемкости конструкций.

Ключевые слова: предел огнестойкости; стальные конструкции; предел текучести стали; несущая способность; огнестойкий металлопрокат

Для цитирования: Голованов В.И., Пехотиков А.В., Приступюк Д.Н., Крючков Г.И. Огнестойкость строительных конструкций из стального проката с повышенными показателями термостойкости // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2024. Т. 33. № 3. С. 47–56. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.03.47-56

✉ Крючков Геннадий Игоревич, e-mail: dmuha@bk.ru

Fire resistance of building structures made of rolled steel with increased heat resistance indicators

Vladimir I. Golovanov¹, Andrey V. Pekhotikov¹, Dmitry N. Pristupyuk², Gennadiy I. Kryuchkov²✉

¹ 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

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

ABSTRACT

Introduction. The paper is devoted to experimental and analytical study of the load-bearing capacity of bending structures made of ordinary and fire-resistant rolled steel under standard temperature conditions. Fire tests were carried out with rolled I-beams No. 20B1 manufactured according to GOST R 57837–2017 from steels of strength classes C255, C390 and welded I-beams 180 × 90 × 10 from steels C355, C390, C355P, C390P with the length of 3,500 mm. Experiments on determination of high-temperature mechanical properties of new steel grades were carried out.

Materials and methods. The values of actual fire resistance limits of beams obtained experimentally are determined according to GOST 30247.1–94 and GOST 30247.0–94. The thermotechnical part of the calculation of the temperature in the cross-section of steel beams was performed in the ANSYS Mechanical programme complex. The calculation of bearing capacity was carried out according to the developed method and the registered programme for computer. Experiments on determination of mechanical properties of rolled metal products under high-temperature heating were carried out on small-sized specimens in accordance with GOST 9651–84.

Results and discussion. Experimentally obtained values of actual fire resistance limits for I-beams made of ordinary and fire-resistant rolled steel. The averaged values of coefficients of change of yield strength at elevated temperatures of construction rolled steel, including fire-resistant steel, which can be used in calculation models of fire resistance assessment of steel structures, were determined. A programme complex for calculation of fire resistance limit taking into account non-uniform temperature distribution in the cross-section of the structure was developed. The results of calculations of fire resistance limits according to the proposed model are close to the experimental data obtained on I-beams made of building steels, including fire-resistant ones.

Conclusions. The fire resistance limit of beams made of fire-resistant rolled steel C355P, C390P at standard temperature regime occurs 10–15 minutes later than beams made of ordinary construction steel. The results of experimental and analytical studies of fire resistance limits of structures made of new types of fire-resistant steels confirm the increase in the time of metal heating from the beginning of fire exposure to the achievement of critical temperature in the design cross-section, which allows to justify their use in the design of buildings and structures in accordance with the requirements of standardized documents on fire safety, as well as to reduce the use of fireproof materials, reduce the metal intensity and cost of construction.

Keywords: fire resistance limit; steel structures; yield strength of steel; load-bearing capacity; fire-resistant rolled steel

For citation: Golovanov V.I., Pekhotikov A.V., Pristupyuk D.N., Kryuchkov G.I. Fire resistance of building structures made of rolled steel with increased heat resistance indicators. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2024; 33(3):47–56. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.03.47-56 (rus).

✉ Gennadiy Igorevich Kryuchkov, e-mail: dmuxa@bk.ru

Введение

При строительстве современных зданий и сооружений широко применяются стальные конструкции. При этом основным показателем надежности сооружения служат прочностные характеристики используемых конструкционных материалов. Однако при возникновении пожара влияние высокой температуры негативно сказывается на прочностных и деформативных свойствах стального проката. Потеря несущей способности стальных конструкций при стандартном температурном режиме может происходить через 10–15 мин после начала огневого воздействия, что может привести к прогрессирующему обрушению всего здания [1–4].

Целью исследования в данной статье является разработка математической модели расчета предела огнестойкости стальных изгибаемых стержневых конструкций при неравномерном прогреве поперечного сечения. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- разработка математической модели расчета предела огнестойкости стальных изгибаемых стержневых конструкций;
- экспериментальное определение механических свойств современного строительного металлопроката для получения исходных данных при

аналитической оценке предела огнестойкости металлоконструкций;

- проведение огневых испытаний стальных балок из обычных марок сталей для верификации математической модели.

В последние годы с увеличением количества строительных проектов и повышением требований к безопасности актуальность применения огнестойких стальных несущих конструкций значительно возросла. В результате этого исследователи и инженеры активно занимаются разработкой новых марок конструкционной стали с повышенными показателями термостойкости (огнестойкие стали). Одним из ключевых факторов, влияющих на огнестойкость стальных конструкций, является их способность сохранять несущую способность при высоких температурах. Ведущие металлургические предприятия, занимающиеся производством стали для строительных конструкций, приступили к разработке огнестойкого проката, способного сохранять свои прочностные свойства при более высоких температурах, чем у обычных строительных сталей [5–7]. Концентрация углерода в сплавах строго контролируется на уровне не более 0,1 %, что является критическим для поддержания минимизации утраты механических свойств при термической нагрузке. Элементы легирования, такие как ниобий и молибден, играют ведущую роль: микроструктурные фазы

Nb (C, N) являются ключевыми для сохранения огнестойкости, а молибден, активируясь на границах карбонитридов при температурном воздействии, противодействует их слиянию, тем самым усиливая огнестойкость материала. Введение ванадия в микролегировании приводит к образованию дополнительных дисперсных фаз карбонитридов ванадия, увеличивающих термостойкость сплава в диапазоне температур 570–620 °С. Ограничение содержания марганца до 1 % обусловлено необходимостью предотвращения снижения прочностных характеристик сплава при высоких температурах [8–11].

Материалы, оборудование и методика проведения исследований

При оценке огнестойкости стержневых стальных конструкций принимается допущение, что сталь обладает огромным коэффициентом температуропроводности, из-за чего температура по всему поперечному сечению элемента конструкции считается одинаковой в каждый момент времени нагрева. Для колонн и ферм, которые обогреваются с четырех сторон при стандартном температурном режиме пожара, это допущение вполне приемлемо. Однако балки междуэтажных перекрытий и некоторые другие несущие конструкции при пожаре обогреваются с трех сторон, что приводит к неравномерному прогреву их поперечного сечения [5, 12, 13]. Эксперименты по определению пределов огнестойкости балок из стального проката показали разницу в 150 °С между нижней и верхней полками двутаврового сечения в момент потери несущей способности.

Для сравнения температурных полей в поперечном сечении проводился расчет прогрева в программном комплексе Ansys Mechanical при двух вариантах обогрева балки. Как видно из рис. 1, результаты расчета температурных полей в поперечном сечении балки на 20-й минуте огневого воздействия по стандартному температурному режиму при 3- и 4-стороннем обогреве поперечного сечения двутавровой балки имеют отличия. Градиент температуры между верхней и нижней полками балки при 3-стороннем обогреве достигает 156 °С и соответствует эксперименту. При обогреве балки с 4 сторон температура нижней и верхней полок имеет одинаковые значения.

Оценка огнестойкости по методике А.И. Яковлева [14] основана на определении времени нагрева нижней полки стальной балки до критической температуры по формуле:

$$\gamma_t = \frac{M_n}{R_{yn} \cdot W_{пл}}, \quad (1)$$

где γ_t — температурный коэффициент снижения предела текучести стали;

$W_{пл}$ — пластический момент сопротивления сечения, м³.

Очевидно, что расчет пределов огнестойкости изгибаемых стальных конструкций, обогреваемых при стандартном пожаре с трех сторон, по критической температуре нижней полки приводит к заниженным показателям фактического предела огнестойкости, что, в свою очередь, влияет на увеличение стоимости строительства.

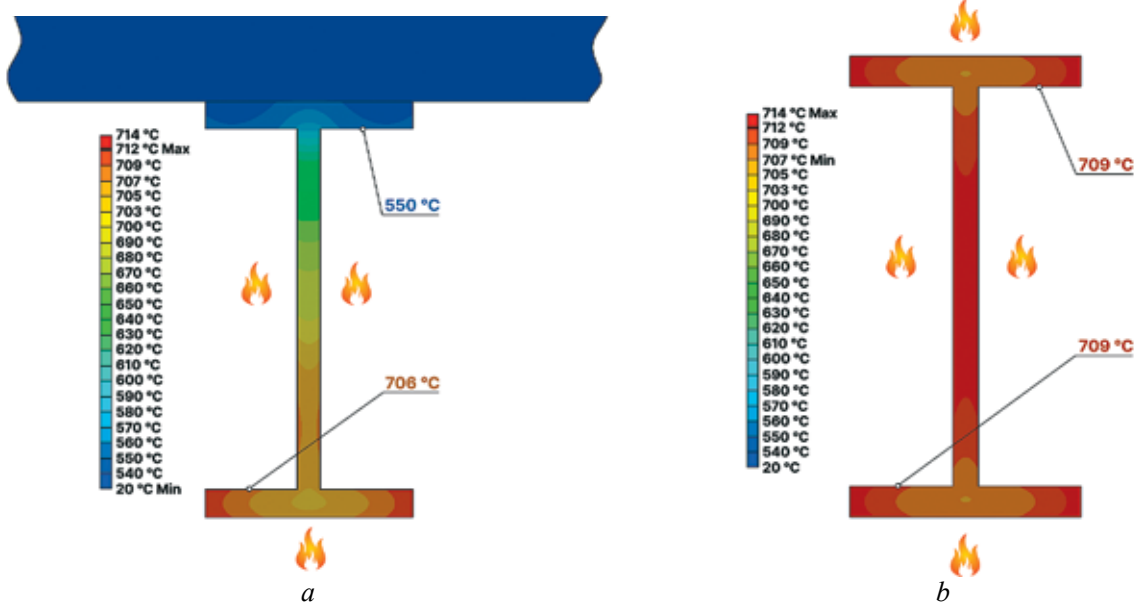


Рис. 1. Температурные поля стальной балки на 20 мин при численном моделировании: а — 3-сторонний обогрев; б — 4-сторонний обогрев

Fig. 1. Temperature fields of a steel beam at 20 min in numerical simulation: a — 3-sided heating; b — 4-sided heating

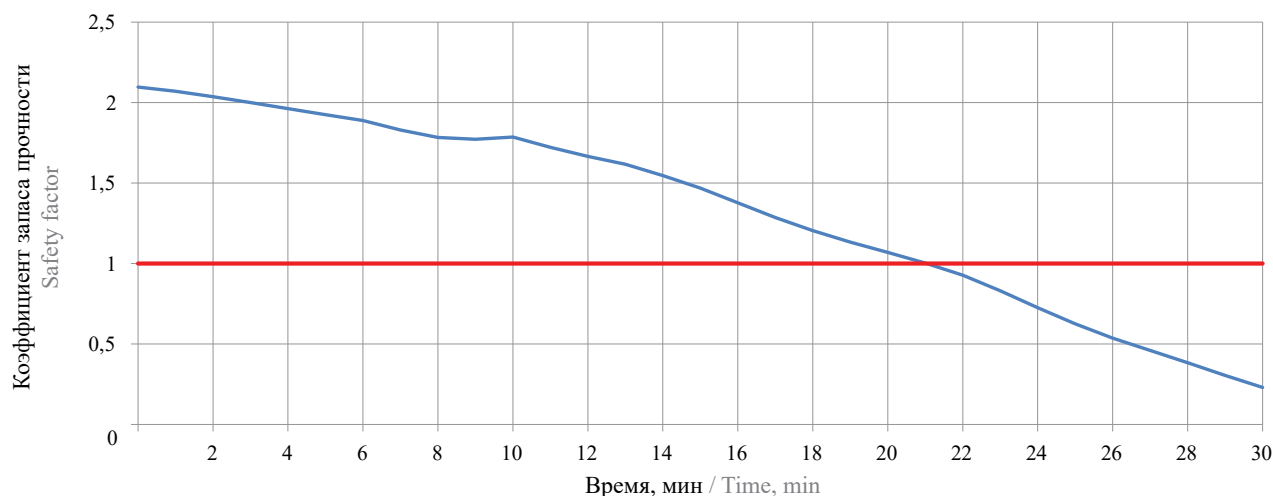


Рис. 2. Схема расчета предела огнестойкости балки из стального проката класса прочности С355П с нормативной нагрузкой $M_n = 48,8$ кНм по разработанной программе для ЭВМ

Fig. 2. Scheme of calculation of fire resistance limit of a beam made of rolled steel of strength class C355P with normative load $M_n = 48.8$ kNm by the developed programme for the computer

В целях совершенствования метода расчета пределов огнестойкости балок предложен подход, учитывающий неравномерный прогрев поперечного сечения. Расчет огнестойкости стальных балок при трехстороннем обогреве с учетом неравномерного прогрева поперечного сечения балок соответствует рекомендациям EN 1993-1-2¹. Неоднородность температурного поля обуславливает отличие в значениях нормативного сопротивления стали на отдельных элементарных участках поперечного сечения, что может привести к значительным погрешностям при расчете предела огнестойкости.

Предлагаемый метод расчета огнестойкости стальных неравномерно нагретых изгибаемых элементов производится в результате определения несущей способности наиболее напряженного поперечного сечения конструкции с учетом длительности воздействия стандартного режима пожара. Расчетное сечение разбивается на малые участки с близкими по значению показателями температуры. Для каждого участка, в зависимости от температуры стали, принимают свой коэффициент условий работы на растяжение γ_t .

В результате расчетов строится график снижения ее несущей способности во времени. По этому графику определяют предел огнестойкости, т.е. время нагревания, по истечении которого несущая способность конструкции $M_{p,t}$ снизится до величины нормативной нагрузки M_n , т.е. когда будет иметь место равенство: $M_{p,t} = M_n$. Затем определяют положение нейтральной оси, которая разделяет сечение на растянутую и сжатую зоны. Несущая способность поперечного сечения определяется как сумма моментов всех малых участков. В расчетах значение температуры в процессе

нагрева стали принимали по результатам огневых испытаний. Термопары, которые фиксировали изменение температуры, были установлены в трех точках поперечного двутаврового сечения: на верхней полке, в середине стенки и на нижней полке. Таким образом, несущую способность балки двутаврового сечения предлагается рассчитывать по формуле:

$$M_{p,t} = \sum_{i=1}^n A_i \cdot Z_i \cdot R_{yn} \cdot \gamma_{ti}, \quad (2)$$

где A_i — элементарная площадь поперечного сечения с температурой t_i ;

Z_i — расстояние от нейтральной оси сечения до центра тяжести элементарной площадки A_i с температурой t_i ;

R_{yn} — предел текучести стали при температуре 20 °C;

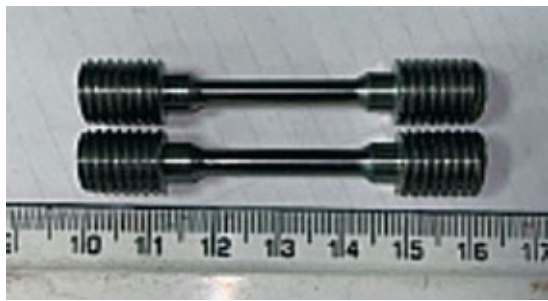
γ_{ti} — коэффициент снижения предела текучести стали при растяжении и сжатии и температуре t_i .

Предложенный метод расчета предела огнестойкости с учетом неравномерного распределения температуры в поперечном сечении конструкции реализован в форме программного комплекса². Схема расчета по разработанной программе для ЭВМ балки из стального проката класса прочности С355П с нормативной нагрузкой $M_n = 48,8$ кНм при стандартном температурном режиме представлена на рис. 2.

Основным параметром для оценки огнестойкости изгибаемых стержневых конструкций при огневом воздействии является предел текучести,

¹ EN 1993-1-2. Проектирование стальных конструкций. Часть 1-2. Общие правила определения огнестойкости.

² Свидетельство № RU 2023610664 о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа для расчета предела огнестойкости с учетом неравномерного распределения температуры в поперечном сечении конструкции / Г.И. Крючков, В.И. Голованов, Н.С. Новиков; заявл. 28.02.2022; опубл. 12.01.2023.



a



b

Рис. 3. Внешний вид образцов из металлопроката С390П на растяжение при нагреве: *a* — до испытания на растяжение при нагреве; *b* — после испытания на растяжение

Fig. 3. Appearance of C390P rolled metal specimens in tensile test under heating: *a* — before the heating tensile test; *b* — after the tensile test

поскольку именно он определяет начало и интенсивность пластической деформации строительных металлоконструкций, сопровождающейся их разрушением в условиях пожара [4]. В отечественной и зарубежной литературе в качестве основного показателя для перевода обычного строительного проката в разряд «огнестойкий» принят критерий, который соответствует значению коэффициента снижения предела текучести $\gamma_t \geq 0,6$ при температуре 600 °С [15, 16]. Таким образом, у огнестойких сталей предел текучести при нагреве до 600 °С не должен снижаться более чем 40 % от значения их нормативного сопротивления при 20 °С [17–19].

Анализ прочностных и деформативных характеристик новых марок стали при повышенных температурах стоит в ряду приоритетных научных задач, ввиду того что эти новые виды огнестойкой конструкционной стали обладают уникальными характеристиками, позволяющими им сохранять несущую способность конструкций в течение более длительного периода времени при высоких температурах [20]. В рамках решения второй задачи были проведены эксперименты в соответствии с ГОСТ 9651–84³ на цилиндрических образцах

с резьбой М10 на головках и рабочим диаметром 4 мм. Методика определения высокотемпературных механических свойств проката предусматривала нагрев образцов до заданной температуры испытания и проведение испытания на одноосное растяжение в гидравлической разрывной машине. Испытания образцов проводились при температуре от 20 до 700 °С (для огнестойких сталей до 850 °С) с шагом 50–100 °С. Внешний вид малогабаритных образцов до и после испытаний на растяжение при нагреве представлен на рис. 3.

Малогабаритные образцы, испытываемые на растяжение, изготовлены из стали классов обычной прочности С255, повышенной прочности С355, а также высокой прочности — С390. Отдельно выделен подкласс — огнестойкий прокат, к которому относятся стали С355П и С390П. Образцы изготавливались после их вырезки из серии сварных и прокатных балок, предназначенных для огневых испытаний [5].

С учетом влияния на прочностные характеристики отклонения в свойствах и составе сталей коэффициенты изменения предела текучести при повышенных температурах в проведенных исследованиях приняты по усредненным значениям отдельно для обычных и огнестойких сталей. Как видно из рис. 4, по мере нагрева предел текучести огнестойкого проката снижается менее интенсивно, чем у обычных сталей такого же класса прочности, и характеризуется наиболее высокими значениями данного параметра.

Применение регрессионного анализа к экспериментальным данным позволило вывести эмпирические зависимости, отражающие взаимосвязь температурных условий испытаний с прочностными показателями строительного металлопроката [7].

Изменение коэффициента снижения предела текучести от температуры для обычных строительных сталей предлагается определять по зависимости:

- в диапазоне 20 °С < t < 400 °С $\gamma_m = -0,0007 \cdot t + 1,0147$;
- в диапазоне 400 °С < t < 700 °С $\gamma_m = 5 \cdot 10^{-9} \cdot t^3 - 1 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 + 0,0058 \cdot t - 0,1535$.

Изменение коэффициента снижения предела текучести от температуры для огнестойких сталей предлагается определять по зависимости:

- в диапазоне 20 °С < t < 400 °С $\gamma_m = -0,0005 \cdot t + 1,0147$;
- в диапазоне 400 °С < t < 850 °С $\gamma_m = 1 \cdot 10^{-8} \cdot t^3 - 3 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 + 0,0018 \cdot t - 2,5075$.

В ходе реализации третьего исследовательского вопроса проведен комплекс испытаний крупногабаритных образцов (балок) по определению фактических пределов огнестойкости. Основными целями исследований являются сопоставление результатов

³ ГОСТ 9651–84. Металлы. Методы испытаний на растяжение при повышенных температурах.

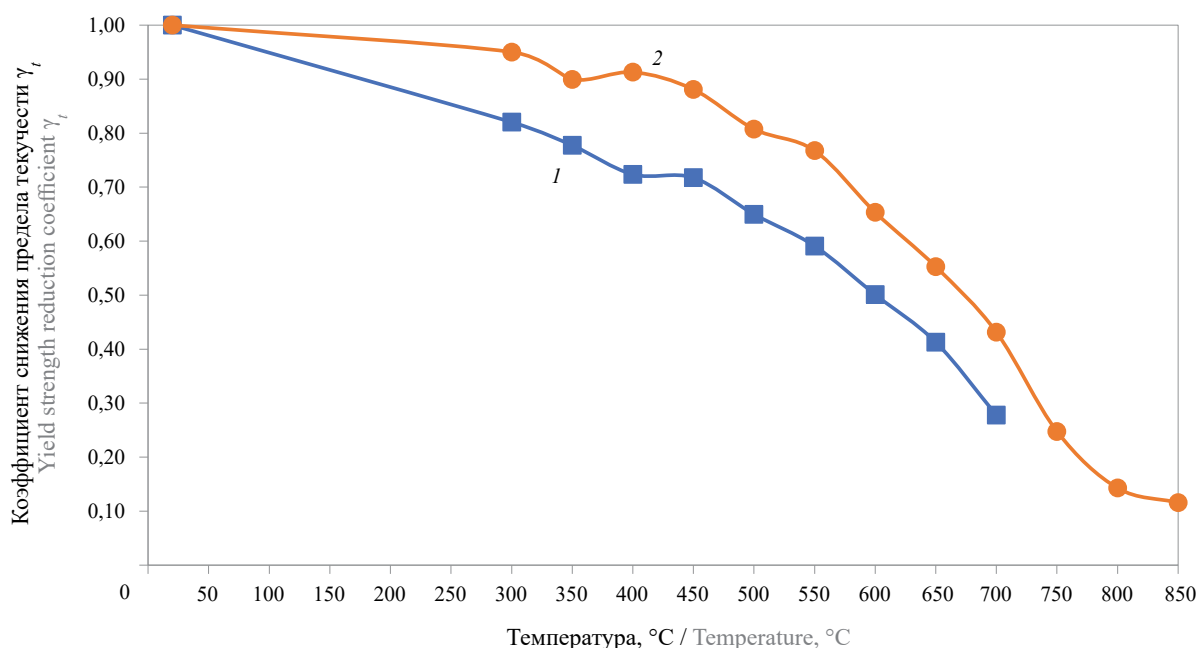


Рис. 4. Изменение коэффициента снижения предела текучести при повышенных температурах испытания: 1 — обычный строительный прокат стали; 2 — огнестойкий прокат стали

Fig. 4. Change of yield strength reduction coefficient at elevated test temperatures: 1 — ordinary construction rolled steel; 2 — fire-resistant rolled steel

испытаний образцов, изготовленных из обычного и огнестойкого строительного проката, а также оценка сходимости результатов определения пределов огнестойкости стальных конструкций расчетно-аналитическим методом.

Огневые испытания по определению фактических пределов огнестойкости металлоконструкций проведены на экспериментальной базе ФГБУ ВНИИПО МЧС России. Огневые испытания проводились с прокатными двутавровыми балками № 20Б1, изготовленными по ГОСТ Р 57837–2017⁴ из сталей классов прочности С255, С390, и сварными двутавровыми балками 180 × 90 × 10 из сталей С355, С390, С355П, С390П длиной 3500 мм. Огневому воздействию снизу с трех сторон подвергались шарнирно опертые балки, нагруженные сосредоточенной нагрузкой в середине пролета расчетной длиной 3200 мм. Верхнюю полку защитили от воздействия огня плитами из минеральной ваты толщиной 300 мм.

Оценка огнестойкости осуществлялась на основе серии экспериментов, проведенных в условиях стандартного температурного режима и при различных значениях нагрузки по ГОСТ 30247.0–94⁵ и ГОСТ 30247.1–94⁶, в которых сформулированы

требования к оборудованию, размещению термопар и регистрации необходимых параметров. Как показали эксперименты, потеря несущей способности балок из исследуемого стального проката при нагреве по режиму стандартного пожара наступала в результате достижения прогиба L/20 в середине пролета [4]. На рис. 5 показана одна из балок после огневых испытаний, которая находилась в верхней части огневой камеры испытательной установки.

Экспериментальные и расчетные значения пределов огнестойкости стальных балок представлены в таблице. Анализ данных показывает, что использование метода расчета предела огнестойкости изгибаемых стальных конструкций, обогреваемых с трех сторон, при учете неравномерного прогрева поперечного сечения дает удовлетворительную схо-



Рис. 5. Балка из стального проката С390П после проведения огневых испытаний

Fig. 5. Beam made of rolled steel C390P after fire testing

димость с экспериментальными данными как для балок из обычного стального проката С255, С355, С390, так и для балок из огнестойкого проката

⁴ ГОСТ Р 57837–2017. Двутавры стальные горячекатаные с параллельными гранями полок.

⁵ ГОСТ 30247.0–94. Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования.

⁶ ГОСТ 30247.1–94. Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Несущие и ограждающие конструкции.

Сравнение теоретических и экспериментальных результатов расчета балок на огнестойкость из обычного и огнестойкого стального проката

Comparison of theoretical and experimental results of calculation of beams for fire resistance made of ordinary and fire-resistant rolled steel products

Номер опытного образца Prototype number	Тип сечения, размеры, мм Section type, dimensions, mm	Класс прочности стального проката Strength class of rolled steel	Предел текучести стали R_{ym} , МПа Yield strength of steel R_{ym} , MPa	Нагрузка, кН Load, kN	Расчетный предел огне- стойкости R , мин Rated fire resistance R , min	Эксперимен- тальный предел огнестойкости R , мин Experimental fire resistance R , min	Сравнение резуль- татов расчета и эксперименталь- ных данных, % Comparison of calculation results and experimental data, %
1	Двутавр № 20Б1 I beam No. 20b1	C255	318	15,25	21,0	15,0	28
2	Двутавр № 20Б1 I beam No. 20B1	C255	318	38,13	14,0	17,0	21
3	Двутавр 180 × 90 I beam 180 × 90	C355	409	23,08	21,5	20,0	7
4	Двутавр 180 × 90 I beam 180 × 90	C355	409	57,72	17,0	17	0
5	Двутавр 180 × 90 I beam 180 × 90	C355П	414	23,80	28,0	34,0	21
6	Двутавр 180 × 90 I beam 180 × 90	C355П	414	59,40	21,0	23,0	9
7	Двутавр № 20Б1 I beam No. 20B1	C390	390	23,80	22,0	23,0	4
8	Двутавр № 20Б1 I beam No. 20B1	C390	390	57,72	19,0	16,0	16
9	Двутавр 80 × 100 I beam 180 × 100	C390П	499	23,80	25,0	32,0	28
10	Двутавр 180 × 90 I beam 180 × 90	C390П	499	59,40	22,5	20,0	11

C355П, C390П, при различных уровнях статической нагрузки. При сравнении экспериментальных данных балок из стального огнестойкого проката C355П, C390П и балок из обычной стали C355, C390 видно, что пределы огнестойкости у первых выше на 20–40 %.

Различия между экспериментальными и расчетными значениями предела огнестойкости можно объяснить отклонениями температур в огневой камере (при испытании по ГОСТ 30247.0–94⁵ допускается отклонение от стандартного температурного режима в первые 10 мин ± 15 %), а также тем, что в поперечном сечении, в середине пролета балки, температура стали при расчете прогрева принимается одинаковой по всей длине конструкции, а в эксперименте в данном сечении происходил отток тепла в стальную опору рычажной системы нагружения.

Выводы

1. Определены усредненные коэффициенты изменения предела текучести для обычных и огнестойких сталей при повышенных температурах в диапазоне от 20 до 700 °C (для огнестойких сталей до 850 °C), необходимые для расчета строительных металлоконструкций на огнестойкость.
2. Получены экспериментальные данные о пределах огнестойкости балок из стального проката классов прочности C255, C355, C390, а также из огнестойкого проката C355П, C390П.
3. Предложен метод вычисления предела огнестойкости, учитывающий неравномерность прогрева сечения балок, который повышает точность расчетов для конструкций как из обычного стального проката, так и огнестойкого, что способствует

увеличению безопасности и устойчивости зданий при пожаре. лит уменьшить применение огнезащитных материа-

4. Использование конструкций из огнестойкого стального проката в практике строительства позво- лов, снизить металлоемкость и себестоимость стро- ительства.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Голованов В.И., Пронин Д.Г. Влияние развития нормативной базы в области огнестойкости на применение стали в строительстве // Промышленное и гражданское строительство. 2021. № 10. С. 14–29. DOI: 10.33622/0869-7019.2021.10.24-29
2. Одесский П.Д., Ведяков И.И. Сталь в строительных металлических конструкциях. М. : Metallurgizdat, 2018. 906 с.
3. Фёдоров В.С., Левитский В.Е., Молчадский И.С., Александров А.В. Огнестойкость и пожарная опасность строительных конструкций. М. : Изд-во АСВ, 2009. 408 с.
4. Голованов В.И., Пехотиков А.В., Крючков Г.И., Новиков Н.С. Огнестойкость стальных балок строительного назначения // Пожарная безопасность. 2022. № 4 (109). С. 19–28. DOI: 10.37657/vniipr.pb.2022.109.4.001
5. Голованов В.И., Пехотиков А.В., Крючков Г.И., Павлов В.В., Новиков Н.С. Особенности расчета предела огнестойкости балок из строительных сталей // Безопасность труда в промышленности. 2023. № 3. С. 7–13. DOI: 10.24000/0409-2961-2023-3-7-13
6. Корольченко Д.А., Еремина Т.Ю., Пузач С.В., Портнов Ф.А. Моделирование номограмм прогрева стальных конструкций с огнезащитными покрытиями различной толщины (на воде) // Пожаровзрывобезопасность/ Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 6. С. 30–46. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.06.30-46
7. 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
8. Одесский П.Д., Кулик Д.В. Стали с высоким сопротивлением экстремальным воздействиям. М. : Интермет инжиниринг, 2008. 239 с.
9. Shi Y., Wang J., Zhou X., Xue X., Li Y. Post-fire mechanical properties of Q960 cold-formed thick-walled ultra-high-strength steel // Fire Technology. 2024. No. 60. Pp. 1917–1953. DOI: 10.1007/s10694-024-01555-3
10. Su A., Wang Ya., Wang Yu., Rasmussen K.J.R., Gardner L. Behaviour and design of S960 ultra-high strength steel non-slender welded I-section beam-columns // Engineering Structures. 2024. Т. 304. С. 117602. DOI: 10.1016/j.engstruct.2024.117602
11. Komissarov A.A., Tikhonov S.M., Ten D.V., Matrosov M.Yu., Glukhov P.A. Comparative fire resistance of modern construction steels // Steel in Translation. 2021. Vol. 51. Issue 11. Pp. 827–833. DOI: 10.3103/S0967091221110073
12. Леннон Т., Мур Д.Б., Ванг Ю.К., Бейли К.Г. Руководство для проектировщиков к EN 1991-1-2, 1992-1-2, 1993-1-2 и 1994-1-2 : справочник по проектированию противопожарной защиты стальных, сталежелезобетонных и бетонных конструкций зданий и сооружений в соответствии с Еврокодами. М. : МГСУ, 2013. 195 с.
13. Ботян С.С., Жамойдик С.М., Олесиук Н.М. Анализ методов оценки огнестойкости стальных строительных конструкций с учетом влияния теплообмена с примыкающими смежными конструкциями // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. 2023. Т. 7. № 2. С. 131–143. DOI: 10.33408/2519-237X.2023.7-2.131
14. Яковлев А.И. Расчет огнестойкости строительных конструкций. М. : Стройиздат, 1988. 144 с.
15. Komissarov A.A., Tikhonov S.M., Ten D.V., Matrosov M.Yu., Shulga E.V. Fire resistance factors of low-alloyed construction longs // Steel in Translation. 2022. Vol. 52. Issue 7. Pp. 701–706. DOI: 10.3103/S0967091222070099
16. Комиссаров А.А., Тихонов С.М., Тен Д.В., Мазова Е.П., Матросов М.Ю., Глухов П.А. и др. Анализ использования огнестойкого проката С390П для изготовления строительных металлоконструкций // Сталь. 2022. № 12. С. 54–58.
17. Wang W.Y., Zhang L., He P. A numerical investigation on restrained high strength Q460 steel beams including creep effect // International Journal of Steel Structures. 2018. Vol. 18. Issue 1. Pp. 1497–1507. DOI: 10.1007/s13296-018-0047-9
18. Dwaikat M.M.S., Kodur V.R. A performance based methodology for fire design of restrained steel beams // Journal of Constructional Steel Research. 2011. Vol. 67. Issue 3. Pp. 510–524. DOI: 10.1016/j.jcsr.2010.09.004
19. Łukowski M., Turkowski P., Roszkowski P., Bartłomiej P. Fire resistance of unprotected steel beams — comparison between fire tests and calculation models // Procedia Engineering. 2017. Vol. 172. Pp. 665–672. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.02.078

20. Ghafouri M., Afkhami S., Pokka A.-P., Javaheri V., Togiani A., Larkiola J. et al. Effect of temperature on the plastic flow and strain hardening of direct-quenched ultra-high strength steel S960MC // *Thin-Walled Structures*. 2024. Vol. 194. P. 111319. DOI: 10.1016/j.tws.2023.111319

REFERENCES

1. Golovanov V.I., Pronin D.G. Influence of the development of the normative base in the field of fire resistance on the use of steel in construction. *Industrial and Civil Engineering*. 2021; 10:14-29. (rus).
2. Odessky P.D., Vedyakov I.I. *Steel in building metal structures*. Moscow, Metallurgizdat Publ., 2018; 906. (rus).
3. 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).
4. Golovanov V.I., Pekhotikov A.V., Kryuchkov G.I., Novikov N.S. Fire resistance of steel building beams. *Fire safety*. 2022; 4(109):19-28. DOI: 10.37657/vniipo.pb.2022.109.4.001 (rus).
5. Golovanov V.I., Pekhotikov A.V., Kryuchkov G.I., Pavlov V.V., Novikov N.S. Features of calculating the fire resistance limit of beams from construction steels. *Occupational Safety in Industry*. 2023; 3:7-13. DOI: 10.24000/0409-2961-2023-3-7-13 (rus).
6. Korolchenko D.A., Eremina T.Yu., Puzach S.V., Portnov F.A. Simulation of nomograms showing the heating of steel structures with flame retardant coatings of different thicknesses (in the water). *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(6):30-46. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.06.30-46 (rus).
7. 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).
8. Odessky P.D., Kulik D.V. *Steels with high resistance to extreme impacts*. Moscow, Intermet Engineering Publ., 2008; 239. (rus).
9. Shi Y., Wang J., Zhou X., Xue X., Li Y. Post-fire mechanical properties of Q960 cold-formed thick-walled ultra-high-strength steel. *Fire Technology*. 2024; 60:1917-1953. DOI: 10.1007/s10694-024-01555-3
10. Su A., Wang Ya., Wang Yu., Rasmussen K.J.R., Gardner L. Behaviour and design of S960 ultra-high strength steel non-slender welded I-section beam-columns. *Engineering Structures*. 2024; 304:117602. DOI: 10.1016/j.engstruct.2024.117602
11. Komissarov A.A., Tikhonov S.M., Ten D.V., Matrosov M.Yu., Glukhov P.A. Comparative fire resistance of modern construction steels. *Steel in Translation*. 2021; 51(11):827-833. DOI: 10.3103/S0967091221110073
12. Lennon T., Mur D.B., Vang Yu.K., Beyli K.G. *Guide for designers to EN 1991-1-2, 1992-1-2, 1993-1-2 and 1994-1-2 : handbook for the design of fire protection of steel, steel-reinforced concrete and concrete structures of buildings and structures in accordance with Eurocodes*. Moscow, MGSU, 2013; 195. (rus).
13. Botyan C.C., Zhamoydik C.M., Olesiyuk H.M. Analysis of evaluation methods of fire resistance of steel building structures, taking into account the effect of heat transfer with adjacent structures. *Journal of Civil Protection*. 2023; 7(2):131-143. DOI: 10.33408/2519-237X.2023.7-2.131 (rus).
14. Yakovlev A.I. *Calculation of fire resistance of building structures*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1988; 143. (rus).
15. Komissarov A.A., Tikhonov S.M., Ten D.V., Matrosov M.Yu., Shulga E.V. Fire resistance factors of low-alloyed construction longs. *Steel in Translation*. 2022; 52(7):701-706. DOI: 10.3103/S0967091222070099
16. Komissarov A.A., Tikhonov S.M., Ten D.V., Mazova E.P., Matrosov M.Yu., Glukhov P.A. et al. Analysis of the use of fire-resistant rolled steel S390P for the manufacture of building steel structures. *Steel*. 2022; 12:54-58. (rus).
17. Wang W.Y., Zhang L., He P. A numerical investigation on restrained high strength Q460 steel beams including creep effect. *International Journal of Steel Structures*. 2018; 18(1):1497-1507. DOI: 10.1007/s13296-018-0047-9
18. Dwaikat M.M.S., Kodur V.R. A performance based methodology for fire design of restrained steel beams. *Journal of Constructional Steel Research*. 2011; 67(3):510-524. DOI: 10.1016/j.jcsr.2010.09.004
19. Łukomski M., Turkowski P., Roszkowski P., Bartłomiej P. Fire resistance of unprotected steel beams — comparison between fire tests and calculation models. *Procedia Engineering*. 2017; 172:665-672. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.02.078
20. Ghafouri M., Afkhami S., Pokka A.-P., Javaheri V., Togiani A., Larkiola J. et al. Effect of temperature on the plastic flow and strain hardening of direct-quenched ultra-high strength steel S960MC. *Thin-Walled Structures*. 2024; 194:111319. DOI: 10.1016/j.tws.2023.111319

Поступила 11.03.2024, после доработки 01.04.2024;

принята к публикации 16.04.2024

Received March 11, 2024; Received in revised form April 1, 2024;

Accepted April 16, 2024

Информация об авторах

ГОЛОВАНОВ Владимир Ильич, д-р техн. наук, главный научный сотрудник, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; SPIN-код: 8291-1408; ORCID: 0000-0001-6043-0537; e-mail: pavelgol1@yandex.ru

ПЕХОТИКОВ Андрей Владимирович, канд. техн. наук, начальник отдела, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; SPIN-код: 1940-5356, ORCID: 0000-0003-2396-3136; e-mail: pekhotikov.a@mail.ru

ПРИСТУПЮК Дмитрий Николаевич, канд. техн. наук, начальник кафедры пожарной безопасности в строительстве, 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; SPIN-код: 3470-3813, ORCID: 0000-0002-3297-5860; e-mail: zis.pbs@yandex.ru

КРЮЧКОВ Геннадий Игоревич, старший инженер-программист Учебно-научного комплекса пожарной безопасности объектов защиты, 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; SPIN-код: 3492-6471; ResearcherID: ACV-2350-2022; ORCID: 0000-0002-6906-1624; e-mail: dmuxa@bk.ru

Вклад авторов:

Голованов В.И. — научное руководство; обоснование концепции исследования; утверждение окончательного варианта статьи.

Пехотиков А.В. — планирование исследований; анализ и обобщение данных литературы; доработка текста; итоговые выводы.

Приступюк Д.Н. — анализ и систематизация экспериментальных данных; развитие методологии; доработка текста.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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 Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; SPIN-code: 8291-1408; ORCID: 0000-0001-6043-0537; e-mail: pavelgol1@yandex.ru

Andrey V. PEKHOTIKOV, Cand. Sci. (Eng.), Head of Department, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; SPIN-code: 1940-5356, ORCID: 0000-0003-2396-3136; e-mail: pekhotikov.a@mail.ru

Dmitriy N. PRISTUPYUK, Cand. Sci. (Eng.), Head of the Fire Safety in Construction Department, 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; SPIN-code: 3470-3813, ORCID: 0000-0002-3297-5860; e-mail: zis.pbs@yandex.ru

Gennadiy I. KRYUCHKOV, Senior Software Engineer of Educational and Scientific Complex of Fire Safety Protection Facilities, 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; SPIN-code: 3492-6471; ResearcherID: ACV-2350-2022; ORCID: 0000-0002-6906-1624; e-mail: dmuxa@bk.ru

Contribution of the authors:

Golovanov V.I. — scientific guidance; justification of the research concept; approval of the final version of the article.

Pekhotikov A.V. — research planning; analysis and generalization of literature data; finalization of the text; final conclusions.

Pristupyuk D.N. — analysis and systematization of experimental data; development of methodology; finalization of the text.

Kryuchkov G.I. — conducting the study; statistical analysis; text preparation and editing.

The authors declare no conflict of interest.