
ПОЖАРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Научная статья

УДК 614.849; DOI: 10.61260/1998-8990-2024-1-47-59

О НЕОБХОДИМОСТИ УТОЧНЕНИЯ РАСЧЕТНОЙ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ПРЕДЕЛОВ ОГНЕСТОЙКОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ С УЧЕТОМ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Шахабов Майрбек Мусаевич;

✉ **Сивенков Андрей Борисович.**

Академия ГПС МЧС России, Москва, Россия

✉ sivenkov01@mail.ru

Аннотация. Обсуждается вопрос оценки пределов огнестойкости металлических конструкций с учетом продолжительности их эксплуатации. Представлены результаты исследования влияния продолжительности эксплуатации на механические характеристики стальных конструкций, такие как предел прочности, предел текучести и относительное удлинение. Исследование проводилось в отношении стальной конструкции, имеющей срок эксплуатации более 80 лет. Результаты механических испытаний на статическое растяжение показали, что предел прочности на растяжение для рассматриваемых стальных образцов находится на минимальном уровне (снижение предела прочности на 10–15 % и более). Высказано концептуальное мнение о необходимости учета изменения пределов прочности и текучести при оценке пределов огнестойкости стальных конструкций различного срока эксплуатации.

Ключевые слова: стальные конструкции, предел огнестойкости, срок эксплуатации, старение, нормативное сопротивление, предел прочности, модуль упругости

Для цитирования: Шахабов М.М., Сивенков А.Б. О необходимости уточнения расчетной методики оценки пределов огнестойкости металлических конструкций с учетом продолжительности их эксплуатации // Проблемы управления рисками в техносфере. 2024. № 1 (69). С. 47–59. DOI: 10.61260/1998-8990-2024-1-47-59.

Scientific article

ON THE NEED TO REFINE THE CALCULATION METHODOLOGY FOR ASSESSING THE FIRE RESISTANCE LIMITS OF METAL STRUCTURES, TAKING INTO ACCOUNT THE DURATION OF THEIR OPERATION

Shakhabov Mayrbek M.;

✉ **Sivenkov Andrey B.**

Academy of State fire service of EMERCOM of Russia, Moscow, Russia

✉ sivenkov01@mail.ru

Abstract. The paper discusses the issue of estimating the fire resistance limits of metal structures taking into account the duration of their operation. The results of the study of the influence of the duration of operation on the mechanical characteristics of steel structures, such as the ultimate strength, the yield strength and the relative elongation are presented. The study

© Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2024

was conducted on a steel structure with a service life of more than 80 years. The results of static tensile mechanical tests showed that the ultimate tensile strength for the steel specimens in question is at a minimum level (a decrease in ultimate strength of 10–15 % or more). The conceptual opinion about the necessity of taking into account the change of strength and yield strength when assessing the fire resistance limits of steel structures of different service life has been expressed.

Keywords: steel structures, fire resistance limit, service life, aging, standard resistance, tensile strength, modulus of elasticity

For citation: Shakhabov M.M., Sivenkov A.B. On the need to refine the calculation methodology for assessing the fire resistance limits of metal structures, taking into account the duration of their operation // *Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere*. 2024. № 1 (69). P. 47–59. DOI: 10.61260/1998-8990-2024-1-47-59.

Введение

В последние десятилетия металлические конструкции занимают передовые позиции по применению в строительстве благодаря способности выдерживать значительные нагрузки, высокой механической прочности, надежности и долговечности работы. Несмотря на это, в настоящее время остается актуальным вопрос изучения поведения этих конструкций в условиях воздействия высоких температур (пожара), а также разработки технических решений, направленных на повышение пределов их огнестойкости. В этой связи особое значение приобретают различные методы оценки огнестойкости строительных конструкций, позволяющие достаточно оперативно оценивать их способность сохранять свои эксплуатационные характеристики в условиях пожара.

В области пожарной безопасности в отношении стальных строительных конструкций особое внимание должно уделяться объективности результатов оценки пределов огнестойкости в части установления величин критических температур металла, его механических характеристик, а также различных сопутствующих коэффициентов, связанных с поведением металлов в условиях повышения температуры пожара.

Показателем огнестойкости стальных конструкций является предел огнестойкости, который определяется по времени наступления одного или нескольких предельных состояний по огнестойкости. Значения фактических пределов огнестойкости конструкций могут быть определены экспериментальными и расчетными способами, а также с использованием справочных данных [1–2]. Метод оценки предела огнестойкости по справочным данным исторически сформировался на основе обобщенных результатов огневых испытаний различных видов строительных конструкций [2]. Он является наиболее доступным, простым и востребованным методом оценки огнестойкости строительных конструкций. Применение данного метода имеет важное значение в условиях первичной и оперативной оценки пределов огнестойкости строительных конструкций. В части объективности и надежности отдается предпочтение экспериментальному и расчетному методам оценки пределов огнестойкости.

Экспериментальный метод (метод натуральных огневых испытаний) считается наиболее достоверным и эффективным способом оценки огнестойкости строительных конструкций. Для определения предельного состояния несущих и ограждающих конструкций при пожаре используются основные признаки, такие как потеря несущей способности (R), потеря целостности (E) и потеря теплоизолирующей способности вследствие повышенной температуры на необогреваемой поверхности (I).

Методика натуральных огневых испытаний стальных строительных конструкций на огнестойкость описана в ГОСТ 30247.0–94 «Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость». Для проведения натуральных огневых испытаний несущих строительных конструкций существуют также зарубежные нормативные документы, такие как «Standard Methods of Tests of Fire Resistance of Building Construction and Materials» и «Fire Resistance Tests. Elements of Building Construction».

Основная цель натуральных огневых испытаний несущей конструкции – определение времени, необходимого для достижения предельного состояния конструкции при стандартном температурном режиме пожара согласно ГОСТ 30247.0–94. Утрата огнестойкости металлических конструкций связана со снижением прочностных характеристик металла при нагреве, а также с его пластическими и температурными деформациями. По сравнению с методом натуральных огневых испытаний, использование расчетной методологии позволяет определить пределы огнестойкости строительных конструкций более оперативно и с меньшими материальными затратами, в то время как метод огневых испытаний является весьма дорогостоящим и трудоемким.

При расчете огнестойкости конструкции учитывается несколько параметров, включая тип конструкции, ее размеры, марку стали, схему опирания и рабочую нагрузку. Используют различные подходы к расчетной оценке огнестойкости строительных конструкций. Одним из наиболее широко применяемых является метод [3], который включает двухстадийный расчет фактических пределов огнестойкости. На первом этапе производится статическая часть расчета, который позволяет определить критическую температуру нагрева металлической конструкции. Для этого используются математические зависимости строительной механики, заменяющие коэффициенты условий работы при нормальных температурах на соответствующие коэффициенты при повышенных температурах, а также аналитические зависимости, полученные на основе экспериментальных данных [2–3]. В данном случае чрезвычайно сложным является прогнозирование особенности поведения металлических конструкций в условиях пожара с учетом различных факторов и в особенности продолжительности и условий эксплуатации. Данная проблема обусловлена тем, что в мире существует большое количество зданий различного назначения, включая промышленные, гражданские, жилые и общественные объекты, которые имеют несущие металлические каркасы, такие как балки перекрытий, колонны, фермы и другие конструкции. Они были построены в разное время прошлого века и имеют разные сроки эксплуатации от 20 до 120 лет. Многие из них до сих пор эксплуатируются, но некоторые находятся на завершающих стадиях своего жизненного цикла. Очевидно, что продолжительный период эксплуатации конструкций из металла при постоянной механической нагрузке, а также при воздействии различных факторов окружающей среды и условий эксплуатации может приводить к появлению необратимых деформаций и изменению эксплуатационных свойств стальных конструкций [4–5], которые во многих случаях сопровождаются возникновением коррозионных дефектов и ржавчины. Априори эти явления могут способствовать снижению предела прочности, временного сопротивления и относительного удлинения сталей, что, в свою очередь, может повлечь за собой снижение пределов огнестойкости стальных конструкций.

Учитывая ограниченность работ в области изучения изменения эксплуатационных и огнестойких характеристик металлических конструкций, авторами была поставлена задача уточнить степень возможных физико-химических изменений, оказывающих влияние на огнестойкость стальных конструкций. Кроме того, авторы стремились определить необходимость учета этих изменений в расчетной методике оценки пределов их огнестойкости.

Материалы и методы исследования

Для реализации поставленной задачи был исследован образец стальной конструкции (швеллер с толщиной стенки 6 мм, по геометрическим параметрам швеллер сопоставим со швеллером № 27 по ГОСТ 8240–97 «Швеллеры стальные горячекатаные»), являющийся элементом технологической площадки обслуживания оборудования. Рассматриваемая стальная конструкция имеет подтвержденный срок эксплуатации 86 лет внутри здания текстильного комбината имени III Интернационала по адресу: Владимирская обл., Александровский р-н, г. Карabanово, пл. Ленина, д. 1. По результатам анализа архивных

документов в процессе эксплуатации стальной элемент работал в условиях напряженного состояния – изгиб при действии незначительных кратковременных нагрузок. На внешней стороне поверхности стальной конструкции по всей площади заметны следы коррозионного процесса. Визуально можно определить различную степень коррозионного поражения образца стальной конструкции.

Испытания по определению механических характеристик проводились на статическое растяжение по методу ГОСТ 1497–84 «Металлы. Методы испытаний на растяжение», сущность которого заключается в определении при температуре 20 °С таких характеристик механических свойств, как: предел текучести физического, предел текучести условного, временного сопротивления, относительного равномерного удлинения, относительного удлинения после разрыва, относительного сужения поперечного сечения после разрыва.

При изготовлении образцов принимали меры, исключая возможность изменения свойств металла при нагреве или наклепе, возникающих в результате механической обработки. Глубина резания при последнем проходе не должна превышать 0,3 мм согласно ГОСТ 1497–84. Пределы текучести физический, верхний и нижний определяли по диаграмме растяжения, полученной на испытательной машине, при условии, что масштаб диаграммы по оси усилия в 1 мм соответствует напряжению не более 10 Н/мм.

Сравнение полученных прочностных характеристик стали проводилось с учетом основных Положений СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции», данных прокатного сортамента сталей, а также расчетных подходов к оценке механических показателей и пределов огнестойкости стальных конструкций [6–10].

Результаты и их обсуждение

Обобщение ранее проведенных работ в области эксплуатационных характеристик и огнестойкости металлических конструкций свидетельствует о фактическом отсутствии исследований в отношении стальных строительных конструкций длительного естественного износа, влияния продолжительности и условий эксплуатации на особенности их поведения в условиях пожара.

На протяжении нескольких десятилетий как в России, так и во всем мире проводились работы, направленные на разработку и совершенствование расчетных методик для оценки несущей способности и пределов огнестойкости конструкций [1–3, 11–20]. Создание и развитие научного направления огнестойкости строительных конструкций состоялось благодаря трудам таких отечественных ученых, как: В.И. Мурашев, А.И. Яковлев, А.Ф. Милованов, М.Я. Ройтман и др. Ими заложены основы огнестойкости и огнезащиты строительных конструкций и зданий, а также принципы расчетной методики по оценке фактических пределов огнестойкости. Эти исследования позволяют предсказывать изменения устойчивости зданий в условиях пожара и разрабатывать сценарии опасных пожарных ситуаций, учитывая различные режимы нагрева. Кроме этого, данные исследования позволяют выйти на эффективные технические решения для обеспечения требуемой огнестойкости зданий и сооружений.

Известно, что в результате потери прочности или устойчивости конструкций или их элементов наступает предел огнестойкости металлических конструкций, который связан со временем достижения критической температуры нагрева металла. Данная температура определяется с учетом коэффициента, учитывающего снижение прочности металла при нагреве (γ_{tem}). Для определения фактического предела огнестойкости конструкции решается теплотехническая задача, в ходе которой определяется время нагрева металла от начала пожара до достижения критической температуры в расчетном сечении.

Значение прочности стали (по пределу текучести) при нагреве равно:

$$\sigma_n = \frac{N_n}{A} = \gamma_{tem} R_{yn};$$

$$\gamma_{tem} = \frac{N_n}{A \cdot R_{yn}},$$

где σ_n – напряжение, действующее в сечении сжатого элемента при повышенной температуре, Па; N_n – нормативная нагрузка (осевая сила), Н; A – площадь сечения, м²; γ_{tem} – температурный коэффициент снижения нормативного сопротивления стали; R_{yn} – нормативное сопротивление стали, принимаемое равным пределу текучести σ_m по государственным стандартам и техническим условиям на сталь, Па.

Безусловно, важнейшим показателем устойчивости металлических конструкций в условиях пожара является нормативное сопротивление стали (R_{yn}), играющее ключевую роль в оценке огнестойкости зданий и сооружений. Нормативное сопротивление стали является параметром, определяющим способность стальной конструкции выдерживать нагрузку без потери своей несущей способности и прочности при воздействии температуры (пожара). Данная характеристика заложена в нормативно-технические документы. Так, в СП 16.13330.2017 приведены гарантированные значения предела текучести и временного сопротивления, которые устанавливаются в соответствии с национальными стандартами и техническими условиями (табл. 1).

Таблица 1

Нормативные сопротивления при растяжении, сжатии и изгибе фасонного проката

Сталь	Толщина проката, мм	Нормативное сопротивление проката, Н/мм ²	
		R_{yn}	R_{tm}
C235	От 2,0 до 4,0 включ.	235	360
C245	От 4,0 до 20 включ.	245	370
	20 ... 40 включ.	235	370
C255	От 4,0 до 10 включ.	255	380
	10 ... 20 включ.	245	370
	20 ... 40 включ.	235	370

Представленные в СП 16.13330.2017 показатели нормативного сопротивления справедливы для новых сталей в исходных состояниях, то есть до начала введения их в эксплуатацию. В условиях воздействия повышенных температур (пожара) наступление предела огнестойкости стальных конструкций можно спрогнозировать вследствие значительного снижения величин предела прочности, временного сопротивления и относительного удлинения сталей. Так, например, в работах [18, 19] отмечено, что при температуре 500 °С предел текучести стали Ст3 снижается на 40 %, а при температуре 600 °С – на 60 %, что подтверждается результатами механических испытаний в работе [20]. Авторами исследовалось изменение предела текучести строительных конструкций при повышенных температурах, выполненных из сталей Ст3сп, 09Г2С, 14Г2 (рис. 1).

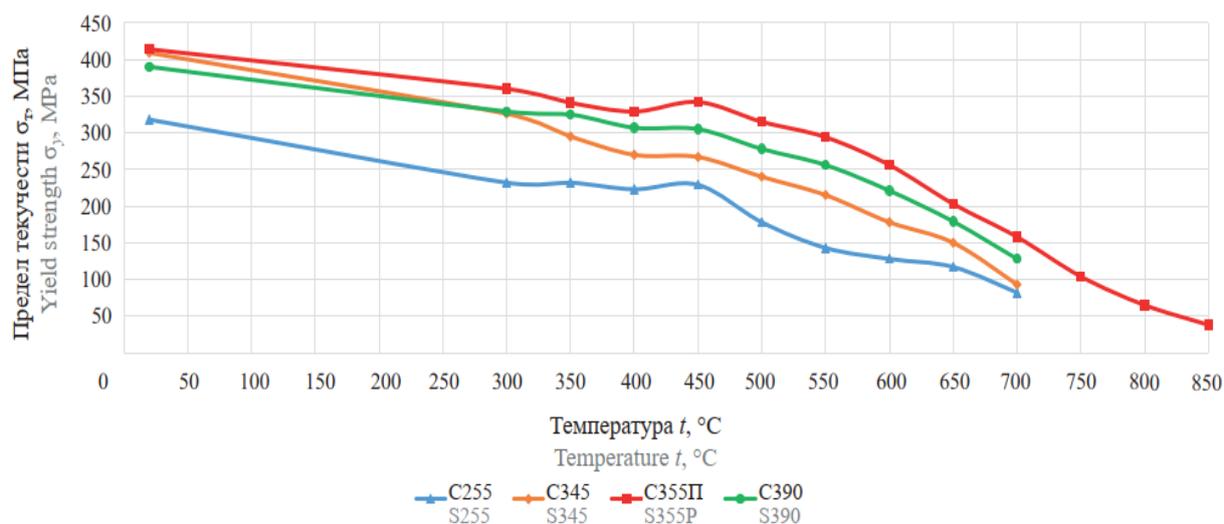


Рис. 1. График зависимости предела текучести от температуры испытания [20]

Из рис. 1 можно сделать вывод, что практически для всех марок сталей механические свойства начинают претерпевать необратимые изменения при температуре свыше 300 °С. Если предел текучести снижается фактически с постоянной скоростью, то временное сопротивление стали достигает максимума при температуре 300 °С, а затем начинает снижаться с ростом температуры.

При рассмотрении вопроса интенсивности потери несущей способности стальных конструкций, упругие деформации являются важным механизмом деформационных процессов. Модуль упругости, известный как модуль Юнга, определяет способность стального материала противостоять воздействию нагрузок. Модуль упругости фактически является откликом на изменение других свойств металла и тесно взаимосвязан с его прочностными характеристиками. Так, в работе [20] представлена зависимость модуля упругости от температуры испытания (рис. 2).

Из представленного графика видно, что при нагреве сталей с низкой прочностью (C255, C345) модуль упругости E значительно снижается по сравнению с его номинальным значением при комнатной температуре. В то же время у сталей с более высокими показателями прочностных свойств сохраняется достаточно высокая упругая составляющая деформации, не приводящая к разрушению.

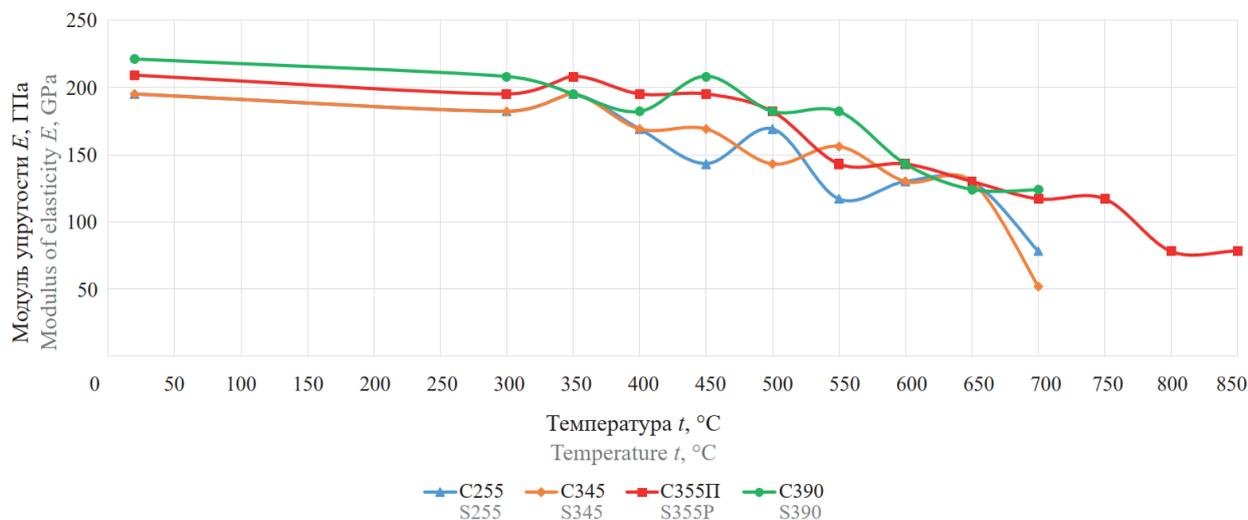


Рис. 2. Зависимость модуля упругости от температуры испытания [20]

Также в работе [21] были проведены исследования механических характеристик стального сплава X17 и алюминиевого сплава Д12, в ходе которых было обнаружено, что при повышении температуры до 300 °С происходит частичная потеря пластичности у образцов. Для оценки пластичности при комнатной температуре был использован период экспозиции на растяжение, который составил приблизительно один час, а при воздействии температур 100 °С и 200 °С – 30–40 мин. Однако при увеличении температуры до значений выше 200 °С наблюдается повышение пластичности. Кроме того, в условиях высокотемпературного нагрева происходит существенное снижение модуля упругости стали, как показано на рис. 3 [21].

Величина модуля упругости, характеризующая свойство пластичности металлов, непосредственно используется в расчетах огнестойкости стальных конструкций. Модуль упругости стали при нагреве определяется как:

$$E_{tem} = E \cdot \beta_{tem},$$

где E – модуль упругости прокатной стали при начальной температуре $t_n = 20$ °С (равен $2,06 \cdot 10^5$ МПа); β_{tem} – коэффициент, учитывающий снижение модуля упругости стали в зависимости от температуры ее нагрева.

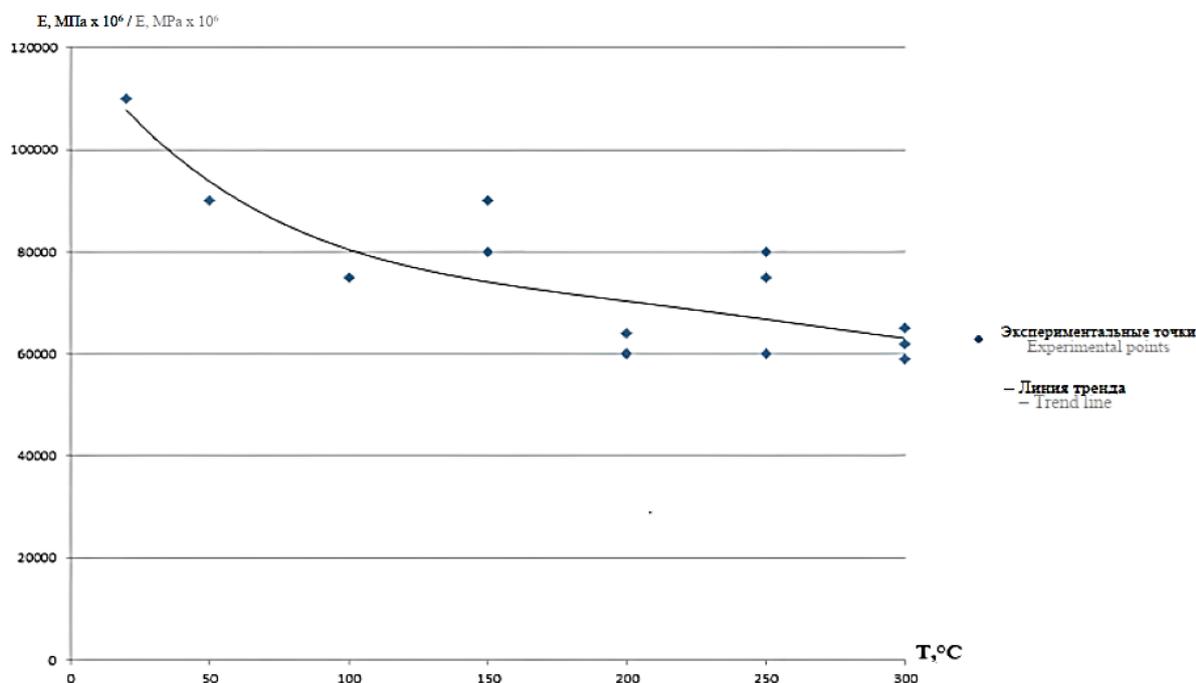


Рис. 3. Изменение модуля упругости стали сплава X17 [21]

В случае потери устойчивости при нагреве, критическое состояние определяется на основе разности между критической деформацией устойчивости и деформацией, вызванной действием нагрузки, до начала пожара:

$$\Delta \varepsilon = \left(\frac{\pi}{\lambda}\right)^2 - \frac{\sigma}{E}, \quad (1)$$

где $\lambda = l_{ef} / i$ – гибкость стержня; $l_{ef} = \mu \cdot l$ – расчетная длина стержня, м; μ – коэффициент расчетной длины; l – конструктивная длина элемента, м; $i = \sqrt{J_{min}/A}$; i – радиус инерции сечения в плоскости изгиба, м; J_{min} – наименьший момент инерции сечения стержня, м⁴; E – начальный модуль упругости стали, Па.

В равенстве (1), помимо модуля упругости, также учитывается напряжение (σ), действующее в сечении элемента. Соотношение этих величин фактически является индикатором изменения свойств металлов с течением времени. В процессе длительной эксплуатации стальных конструкций это соотношение может значительно снижаться, что приведет к увеличению разности краевых деформаций. По сути, это может стать причиной интенсивной утраты несущей способности стальных конструкций с длительным периодом эксплуатации.

Нормативные значения сопротивления и модуля упругости применяются фактически только для сталей на момент введения в эксплуатацию объекта (для прокатной стали и стальных отливок модуль упругости $E=2,06 \cdot 10^5$ Н/мм). Учитывая это, использование характеристик сталей, перечисленных в табл. Б.1, В.4 согласно СП 16.13330.2017, для стальных конструкций длительного срока эксплуатации, подверженных воздействию различных видов нагрузок (статических, динамических) и внешних факторов окружающей среды, требует соответствующей корректировки. Продолжительная эксплуатация стальных конструкций, опираясь на известные представления в части поведения сталей в условиях пожара и ранее проведенные работы, может привести к снижению значения нормативного сопротивления, связывающего между собой коэффициент, учитывающий снижение прочности металла при нагреве (γ_{tem}), величину нагрузки и площадь сечения стального элемента. При этом ожидаемым может являться снижение значения критической температуры металла, а также предела огнестойкости стальной конструкции. Возникающие в процессе эксплуатации дефекты и изменения в структуре сталей могут привести к снижению модуля упругости. Степень этих изменений для стальных конструкций напрямую зависит от продолжительности и условий их эксплуатации.

Для установления возможного влияния длительного естественного износа на ключевые характеристики, участвующие в оценке пределов огнестойкости стальных конструкций, авторами проведены соответствующие исследования. Результаты проведенных механических испытаний в отношении стальной конструкции длительного естественного износа показали, что полученные значения пределов текучести и прочности отличаются от показателей нормативного сопротивления, которые приводятся в СП 16.13330.2017 (табл. 1).

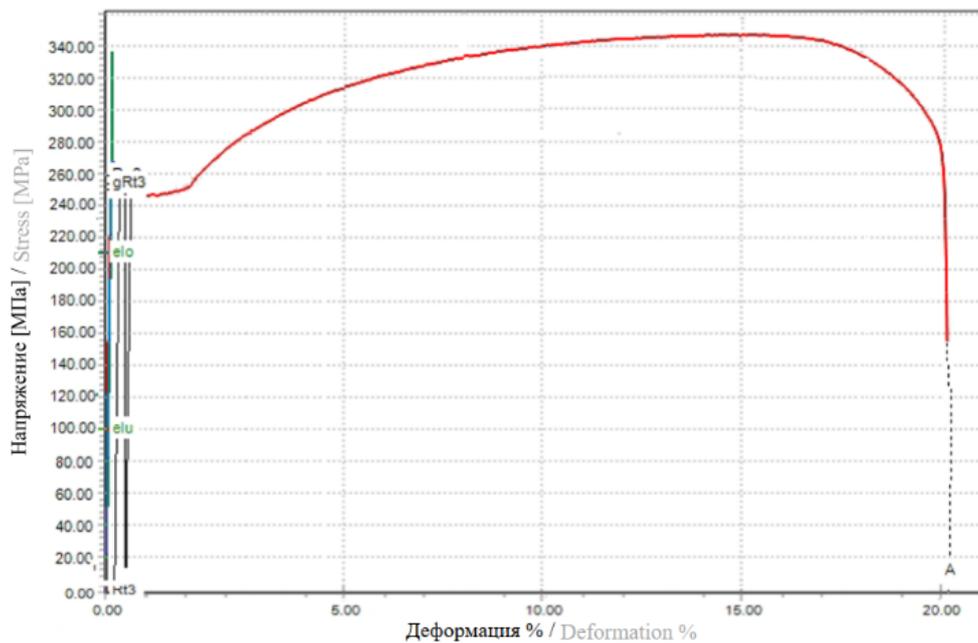
Основные результаты испытаний и нормативные показатели кипящих сталей СтЗкп и СтЗпс приведены в табл. 2 и на рис. 4.

Таблица 2

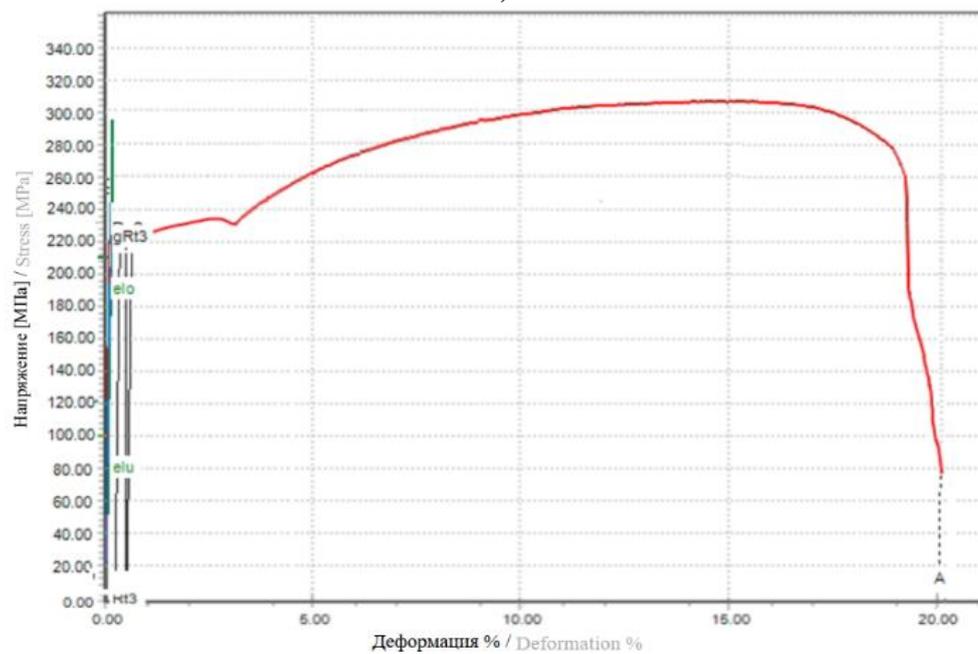
**Основные результаты испытаний на статическое растяжение образцов Ш-1,2
и нормативные показатели по ГОСТ 535–2005**

Марка стали	Временное сопротивление σ_B , Н/мм ² (кгс/мм ²), для проката толщин, мм		Предел текучести σ_m , <Н/мм ² (кгс/мм ²), для проката толщин, мм		Относительное удлинение δ , %, для проката толщин, мм
	до 10 вкл.	св. 10	до 10 вкл.	св. 10 до 20 вкл.	
			не менее		
СтЗкп	360–460 (37–47)		235 (24)	235 (24)	27
СтЗпс	370–480 (38–49)		245 (25)	245 (25)	26
Основные результаты испытаний на статическое растяжение образцов Ш-1,2					

Образец	Размеры, мм	Начальное сечение, S_0 , мм ²	Усл. предел текучести при 0,5 %, МПа	Предел текучести при 0,2 %, МПа	Предел текучести при 0,5 %, МПа	Предел прочности, МПа	Удлинение при разрушении, %
Ш-1	20,02 x 4,97	99,50	242,38	244,69	243,54	345,70	20,08
Ш-2	19,98 x 4,96	99,10	221,60	223,57	222,50	304,52	19,94



а)



б)

Рис. 4. Диаграммы растяжения стальных образцов: а – Ш-1; б – Ш-2

Проведенный сравнительный анализ результатов испытаний на статическое растяжение и нормативных показателей свидетельствует о том, что в процессе длительного естественного износа снижаются механические характеристики конструкций на 15 % и более. Предел прочности образца Ш-2 ниже нормативного временного сопротивления на 15 %, предела текучести на 10 % и относительного удлинения на 12 %.

По результатам исследований прогнозируется фактическое снижение пределов огнестойкости стальных конструкций в результате продолжительного естественного износа. В условиях воздействия продолжительной механической нагрузки и агрессивных условий эксплуатации снижение пределов огнестойкости может быть более значительным. Таким образом, одним из важнейших факторов, оказывающих влияние на пределы огнестойкости металлических конструкций, являются продолжительность и условия их эксплуатации.

Основные выводы

В статье рассмотрена важность учета продолжительности эксплуатации в расчетной методике при оценке пределов огнестойкости. Анализ ранее проведенных исследований по оценке пределов огнестойкости стальных конструкций свидетельствует о том, что ключевыми параметрами при расчете являются нормативное сопротивление и модуль упругости (модуль Юнга). Возможное снижение прочностных характеристик в процессе эксплуатации приведет к интенсивному разрушению металлических конструкций при пожаре.

Проведены исследования по оценке влияния продолжительности эксплуатации стальных конструкций на механические характеристики на примере конструктивного стального элемента (швеллера) (срок эксплуатации с 1936 г.) в здании текстильного комбината имени III Интернационала (г. Карабаново, Владимирская обл.).

Результаты проведенных механических испытаний на статическое растяжение образцов показали о существенном влиянии срока эксплуатации на прочностные характеристики металла. В частности, наблюдается снижение предела прочности образца Ш-2 ниже нормативного временного сопротивления на 15 %, предела текучести на 10 % и относительного удлинения на 12 %. Важность определения изменений пределов прочности и текучести заключается в том, что при повышении температуры прогрева стальных конструкций наблюдается значительное уменьшение их механических свойств. Таким образом, утрата механических характеристик стальных конструкций при эксплуатации может привести к более интенсивному снижению механических характеристик стальных конструкций в условиях пожара, что окажет несомненное влияние на значение предела огнестойкости.

Полученные результаты свидетельствуют о необходимости совершенствования методологии по оценке пределов огнестойкости стальных конструкций с учетом продолжительности их эксплуатации. Решение данной проблемы направлено на объективную оценку достижения предельных состояний стальных конструкций в условиях пожара. Это имеет чрезвычайную важность для обеспечения безопасности людей, находящихся в зданиях и сооружениях в случае возникновения пожара и чрезвычайных ситуаций, а также для эффективной реализации пожарно-спасательных мероприятий.

Список литературы

1. Мосалков И.Л., Плюснина Г.Ф., Фролов А.Ю. Огнестойкость строительных конструкций. М.: ЗАО «СПЕЦТЕХНИКА», 2001. 496 с.
2. Ройтман В.М. Инженерные решения по оценке огнестойкости проектируемых и реконструируемых зданий. М.: Ассоциация «Пожарная безопасность и наука», 2001. 382 с.
3. Яковлев А.И. Расчет огнестойкости строительных конструкций. М.: Стройиздат, 1988. 142 с.

4. Демина Ю.А. Деградация усталостных характеристик стали в результате длительного старения // Физико-химия и технология неорганических материалов: VIII Рос. ежегодн. конф. молодых научных сотрудников и аспирантов: сб. материалов. М., 2013. С. 57–59.
5. Полонский Я.А. Микромеханика разрушения стали X23H18 после длительных сроков эксплуатации // Вестник ТГУ. 2013. Т. 15. Вып. 3. С. 976–977.
6. СП. 16.13330.2017. Стальные конструкции // ЭЛЕКТРОННЫЙ ФОНД правовой и нормативно-технической документации. URL: docs.cntd.ru>document/456069588 (дата обращения: 11.12.2023).
7. ГОСТ 27772–2021. Прокат для строительных стальных конструкций. Общие технические условия // ЭЛЕКТРОННЫЙ ФОНД правовой и нормативно-технической документации. URL: docs.cntd.ru>document/1200182001 (дата обращения: 11.12.2023).
8. ГОСТ 30247.0–94. Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования // ЭЛЕКТРОННЫЙ ФОНД правовой и нормативно-технической документации. URL: docs.cntd.ru>document/9055248 (дата обращения: 11.12.2023).
9. ГОСТ 30247.1–94. Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Несущие и ограждающие конструкции // ЭЛЕКТРОННЫЙ ФОНД правовой и нормативно-технической документации. URL: docs.cntd.ru>document/9055247 (дата обращения: 11.12.2023).
10. Пособие по определению пределов огнестойкости конструкций. М.: Стройиздат, 1985. 56 с.
11. Белов В.В., Семенов К.В., Ренев И.А. Огнестойкость железобетонных конструкций: модели и методы расчета // Инженерно-строительный журнал. 2010. № 6. С. 58–61.
12. Фомін С.Л. Оцінка вогнестійкості багатопверхових каркасних будинків // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: збірник наукових праць. 2008. Випуск 16. Частина 1. Рівне: Видавництво Національного університету водного господарства та природокористування. С. 204–212.
13. Шахабов М.М., Сивенков А.Б., Анохин Е.А. О необходимости учета фактора продолжительности эксплуатации металлических конструкций в расчетной методике оценки их огнестойкости // Применение методов инженерного анализа и компьютерного моделирования при разработке и оценке эффективности противопожарных мероприятий: Всерос. науч.-практ. конф. Екатеринбург, 2021. С. 276–281.
14. Kodur V.K.R., Sultan M.A., Tan K.H. Fire resistance of high strength steel columns: A review // Engineering Structures. 2006. № 28 (5). P. 648–659.
15. Шебеко Ю.Н., Зубань А.В., Шебеко А.Ю. Расчет фактического предела огнестойкости незащищенных стальных конструкций при различных температурных режимах пожара // Пожаровзрывобезопасность. 2019. Вып. 28. № 6. С. 29–34.
16. Ройтман В.М. Физический смысл и оценка коэффициента условий работы и критической температуры прогрева материалов конструкций в условиях пожара // Пожаровзрывобезопасность. 2011. Т. 20. № 5. С. 14–21.
17. Kruppa Joël. Some results on the fire behaviour of external columns // Fire Safety Journal. 1981. J. 4. P. 247–257.
18. Дианов Х.А., Локтев А.А., Нисаев И.П. Прочность стали Ст3 в условиях одностороннего нагрева и динамического нагружения. М.: Нац. исслед. ун-т «Московский институт электронной техники», 2016. С. 121–125.
19. Бартелеми Б., Крюппа Ж. Огнестойкость строительных конструкций: пер. с франц. М.В. Предтеченского; под ред. В.В. Жукова. М.: Стройиздат, 1985. 216 с.
20. Исследование механических свойств современного металлопроката строительного назначения при повышенных температурах / В.И. Голованов [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. 2022. № 31 (2). С. 52–62.
21. Добрышкин А.Ю., Сысоев О.Е., Сысоев Е.О. Экспериментальное исследование влияния воздействия температурного режима на модуль Юнга // Труды МАИ. 2020. Вып. № 115. 27 с.

References

1. Mosalkov I.L., Plyusnina G.F., Frolov A.Yu. Ognestojkost' stroitel'nyh konstrukcij. M.: ZAO «SPECTEKHNIKA», 2001. 496 s.
2. Rojzman V.M. Inzhenernye resheniya po ocenke ognestojkosti proektiruemyh i rekonstruiruemyh zdaniy. M.: Associaciya «Pozharnaya bezopasnost' i nauka», 2001. 382 s.
3. Yakovlev A.I. Raschet ognestojkosti stroitel'nyh konstrukcij. M.: Strojizdat, 1988. 142 s.
4. Demina Yu.A. Degradaciya ustalostnyh karakteristik stali v rezul'tate dlitel'nogo stareniya // Fiziko-himiya i tekhnologiya neorganicheskikh materialov: VIII Ros. ezhegodn. konf. molodyh nauchnyh sotrudnikov i aspirantov: sb. materialov. M., 2013. S. 57–59.
5. Polonskij Ya.A. Mikromekhanika razrusheniya stali H23N18 posle dlitel'nyh srokov ekspluatatsii // Vestnik TGU. 2013. T. 15. Vyp. 3. S. 976–977.
6. SP. 16.13330.2017. Stal'nye konstrukcii // ELEKTRONNYJ FOND pravovoj i normativno-tehnicheskoy dokumentacii. URL: docs.cntd.ru/document/456069588 (data obrashcheniya: 11.12.2023).
7. GOST 27772–2021. Prokat dlya stroitel'nyh stal'nyh konstrukcij. Obshchie tekhnicheskie usloviya // ELEKTRONNYJ FOND pravovoj i normativno-tehnicheskoy dokumentacii. URL: docs.cntd.ru/document/1200182001 (data obrashcheniya: 11.12.2023).
8. GOST 30247.0–94. Konstrukcii stroitel'nye. Metody ispytaniy na ognestojkost'. Obshchie trebovaniya // ELEKTRONNYJ FOND pravovoj i normativno-tehnicheskoy dokumentacii. URL: docs.cntd.ru/document/9055248 (data obrashcheniya: 11.12.2023).
9. GOST 30247.1–94. Konstrukcii stroitel'nye. Metody ispytaniy na ognestojkost'. Nesushchie i ogradhdayushchie konstrukcii // ELEKTRONNYJ FOND pravovoj i normativno-tehnicheskoy dokumentacii. URL: docs.cntd.ru/document/9055247 (data obrashcheniya: 11.12.2023).
10. Posobie po opredeleniyu predelov ognestojkosti konstrukcij. M.: Strojizdat, 1985. 56 s.
11. Belov V.V., Semenov K.V., Renev I.A. Ognestojkost' zhelezobetonyh konstrukcij: modeli i metody rascheta // Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal. 2010. № 6. S. 58–61.
12. Fomin S.L. Ocinka vognestojkosti bagatopoverhovyh karkasnyh budinkiv // Resursoekonomni materiali, konstrukcii, budivli ta sporudi: zbirnik naukovih prac'. 2008. Vipusk 16. Chastina 1. Rivne: Vidavnicтво Nacional'nogo universitetu vodnogo gospodarstva ta prirodozoristuvannya. S. 204–212.
13. Shahabov M.M., Sivenkov A.B., Anohin E.A. O neobhodimosti ucheta faktora prodolzhitel'nosti ekspluatatsii metallicheskih konstrukcij v raschetnoj metodike ocenki ih ognestojkosti // Primenenie metodov inzhenernogo analiza i komp'yuternogo modelirovaniya pri razrabotke i ocenke effektivnosti protivopozharnyh meropriyatij: Vseros. nauch.-prakt. konf. Ekaterinburg, 2021. S. 276–281.
14. Kodur V.K.R., Sultan M.A., Tan K.H. Fire resistance of high strength steel columns: A review // Engineering Structures. 2006. № 28 (5). P. 648–659.
15. Shebeko Yu.N., Zuban' A.V., Shebeko A.Yu. Raschet fakticheskogo predela ognestojkosti nezashchishchennyh stal'nyh konstrukcij pri razlichnyh temperaturnyh rezhimah pozhara // Pozharovzryvbezopasnost'. 2019. Vyp. 28. № 6. S. 29–34.
16. Rojzman V.M. Fizicheskij smysl i ocenka koefficienta uslovij raboty i kriticheskoy temperatury progrevaya materialov konstrukcij v usloviyah pozhara // Pozharovzryvbezopasnost'. 2011. T. 20. № 5. S. 14–21.
17. Kruppa Joël. Some results on the fire behaviour of external columns // Fire Safety Journal. 1981. J. 4. P. 247–257.
18. Dianov H.A., Loktev A.A., Nisaev I.P. Prochnost' stali St3 v usloviyah odностороннего nagreva i dinamicheskogo nagruzheniya. M.: Nacional'nyj issledovatel'skij universitet «Moskovskij institut elektronnoj tekhniki», 2016. S. 121–125.
19. Bartelemi B., Kryuppa Zh. Ognestojkost' stroitel'nyh konstrukcij: per. s franc. M.V. Predtechenskogo; pod red. V.V. Zhukova. M.: Strojizdat, 1985. 216 s.

20. Issledovanie mekhanicheskikh svoystv sovremennogo metalloprokata stroitel'nogo naznacheniya pri povyshennykh temperaturah / V.I. Golovanov [i dr.] // Pozharovzryvobezopasnost'. 2022. 31 (2). S. 52–62.

21. Dobryshkin A.Yu., Sysoev O.E., Sysoev E.O. Eksperimental'noe issledovanie vliyaniya vozdeystviya temperaturnogo rezhima na modul' Yunga // Trudy MAI. 2020. Vyp. № 115. 27 s.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 12.12.2023; одобрена после рецензирования: 18.01.2024; принята к публикации: 24.01.2024

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 12.12.2023; approved after review: 18.01.2024; accepted for publication: 24.01.2024

Информация об авторах:

Шахабов Майрбек Мусаевич, адъюнкт Академии ГПС МЧС России (129366, Москва, ул. Бориса Галушкина, д. 4), e-mail: shahmayrbek95_95@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8299-8780>, SPIN-код: 7271-5784

Сивенков Андрей Борисович, профессор кафедры пожарной безопасности в строительстве в составе учебно-научного комплекса пожарной безопасности объектов защиты Академии ГПС МЧС России (129366, Москва, ул. Бориса Галушкина, д. 4), доктор технических наук, профессор, e-mail: sivenkov01@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3821-8606>, SPIN-код: 1404-6956

Information about the authors:

Shakhabov Mayrbek M., adjunct of Academy of State fire service of EMERCOM of Russia (129366, Moscow, Boris Galushkin str., 4), e-mail: shahmayrbek95_95@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8299-8780>, SPIN: 7271-5784

Sivenkov Andrey B., professor of department of fire safety in construction as part of the educational and scientific complex of fire safety of defense facilities of Academy of State fire service of EMERCOM of Russia (129366, Moscow, Boris Galushkin str., 4), doctor of technical sciences, professor, e-mail: sivenkov01@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3821-8606>, SPIN: 1404-6956