

УДК 614.841.34

## ПОВЕДЕНИЕ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ДЛИТЕЛЬНОГО СРОКА ЭКСПЛУАТАЦИИ В УСЛОВИЯХ ПОЖАРА

Шахабов Майрбек Мусаевич<sup>1</sup>, Сивенков Андрей Борисович<sup>1</sup>, Корольченко Дмитрий Александрович<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, г. Москва, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия

### АННОТАЦИЯ

В данной статье рассматривается проблема огнестойкости металлических строительных конструкций длительного срока эксплуатации. Представлены результаты исследования влияния длительного срока эксплуатации стальных конструкций на физико-химические и механические характеристики (предел прочности, предел текучести, относительное удлинение) в отношении образца стальной конструкции со сроком эксплуатации 86 лет. В структуре стали обнаружено наличие неметаллических включений (точечные оксиды и сульфиды марганца), оказывающих также негативное влияние на механические характеристики сталей. Результаты проведенных механических испытаний на статическое растяжение образца показали, что значения предела прочности на растяжение для рассматриваемых стальных образцов находятся на пределе минимальных значений. Установлена тенденция к возможному снижению механических свойств стали в условиях продолжительной эксплуатации. Значительное ухудшение технического состояния стальных конструкций в период их эксплуатации может происходить в результате воздействия коррозионных процессов (снижение предела прочности на 10–15 % и более). В результате исследований было установлено, что повреждения, вызванные язвенным коррозионным процессом, со временем переходят в коррозионное растрескивание и затрагивают глубинные слои металла. Прогрессирующее разрушение поверхностной структуры и развитие деструктивного процесса внутри конструкций в сочетании с длительно действующей механической нагрузкой приводят к значительному снижению прочностных характеристик и, как следствие, пределов огнестойкости.

**Ключевые слова:** пожар, огнестойкость, сталь, стальные конструкции, срок эксплуатации, коррозия, прочность, механические характеристики

### BEHAVIOR OF LONG-LIFE STEEL STRUCTURES IN FIRE CONDITIONS

Mayrbek M. Shakhobov<sup>1</sup>, Andrey B. Sivenkov<sup>1</sup>, Dmitriy A. Korolchenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia; Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup>National Research Moscow State University of Civil Engineering; Moscow, Russian Federation

**ABSTRACT**

This article deals with the problem of fire resistance of metal building structures of a long service life. The paper presents the results of a study of the effect of a long service life of steel structures on the physico-chemical and mechanical characteristics (ultimate strength, yield strength, relative elongation), with respect to a sample of steel structure with a service life of 86 years. The presence of non-metallic inclusions (point oxides and manganese sulfides) was found in the steel structure, which also have a negative effect on the mechanical characteristics of the steels. The results of the conducted static tensile mechanical tests showed that the tensile strength values for the steel samples under consideration are at the limit of minimum values. The tendency to possible reduction of mechanical properties of steel in conditions of prolonged operation has been established. Significant deterioration of technical condition of steel structures during their operation can occur as a result of the impact of corrosive processes (reduction of the ultimate strength by 10–15 % and more). As a result of researches, it has been established that the damage caused by ulcer corrosion process with time passes into corrosion cracking and affects deep layers of metal. The progressive destruction of the surface structure and the development of the destructive process inside the structures in combination with the long-term acting mechanical load lead to a significant decrease in the strength characteristics and, consequently, in the fire resistance limits.

**Keywords:** fire, fire resistance, steel, steel structures, service life, corrosion, strength, mechanical characteristics

**Введение**

Пожары в зданиях различного функционального назначения нередко приводят к гибели людей и наносят невосполнимый материальный ущерб. Согласно статистике Департамента надзорной деятельности и профилактической работы по обстановке с пожарами и их последствиями на территории Российской Федерации за 12 месяцев 2022 г., в зданиях и сооружениях на территории России произошло более 350 тысяч пожаров, на которых погибло свыше 7500 человек. Многие из них – здания гражданского (жилые, общественные), производственного (промышленные, складские) назначения, в том числе с применением металлических конструкций со сроками эксплуатации несколько десятков лет [1].

Эффективность технологий применения стальных конструкций была подтвер-

ждена временем с учетом их долговечности для зданий и сооружений различного функционального назначения [2]. Лидирующие позиции стальных конструкций по их применению в строительной отрасли для зданий и сооружений объяснимы тем, что они обладают высокой прочностью и долговечностью, определяющей надежность работы конструкций и способность в различной степени выдерживать значительные механические нагрузки. Важным преимуществом этих конструкций также является их срок службы, который может достигать нескольких десятков лет. В этом плане важными являются периодические обследования стальных конструкций по установлению степени их износа и технического состояния. Поддержание стальных конструкций в работоспособном состоянии является залогом их надежной работы в различных условиях эксплуата-

ции. Несмотря на это, необходимо свидетельствовать о том, что технические решения по повышению работоспособности стальных конструкций во многом связаны с устранением внешних дефектов поверхности стальных конструкций, в том числе последствий воздействия коррозионных процессов [3]. Внутренние дефекты и повреждения при длительном износе стальных конструкций фактически имеют

суммарное накапливающее действие на изменение эксплуатационных характеристик.

Нормативные сроки службы зданий и сооружений в соответствии с ГОСТ 27751-2014 «Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения» представлены в табл. 1.

**Таблица 1**

Нормативные сроки службы зданий и сооружений ГОСТ 27751-2014

**Table 1**

Standard service life of buildings and structures GOST 27751-2014

Объект Object	Срок эксплуатации, лет Service life, years
Здания для использования в короткий период времени (строительная бытовка, летний павильон и т. д.). Buildings for short-term use (construction shed, summer pavilion, etc.).	10
Здания, применяемые в сильноагрессивной среде (трубопровод, газовая и химическая промышленность и т. д.). Buildings used in highly aggressive environments (pipeline, gas and chemical industry, etc.).	До 25 Up to 25
Здания при обычных условиях использования (жилые и производственные здания). Buildings under normal conditions of use (residential and industrial buildings).	До 50 Up to 50
Здания со специальным назначением (спортивные, культурные сооружения и т. д.). Buildings with a special purpose (sports, cultural facilities, etc.).	Более 100 Over 100

В мировой практике строительства в настоящее время эксплуатируется значительное количество зданий промышленного и гражданского назначения, включая цеха, мастерские, котельные, а также жилые и общественные объекты с несущими каркасами из металлических конструкций, включающие балки перекрытий, колонны, фермы и другие виды конструкций. Эти здания были построены в разные годы прошлого столетия со сроками эксплуатации от 20 до 120 лет. Многие из этих зданий все еще эксплуатируются, в то время

как другие находятся на завершающем этапе своего жизненного цикла.

Несомненно, продолжительность эксплуатации под действием постоянной механической нагрузки и воздействием факторов окружающей среды, а также различных условий эксплуатации приводит к появлению необратимых деформаций и изменению эксплуатационных характеристик конструкций, в том числе возникновению коррозионных дефектов и ржавчины, которые способствуют снижению

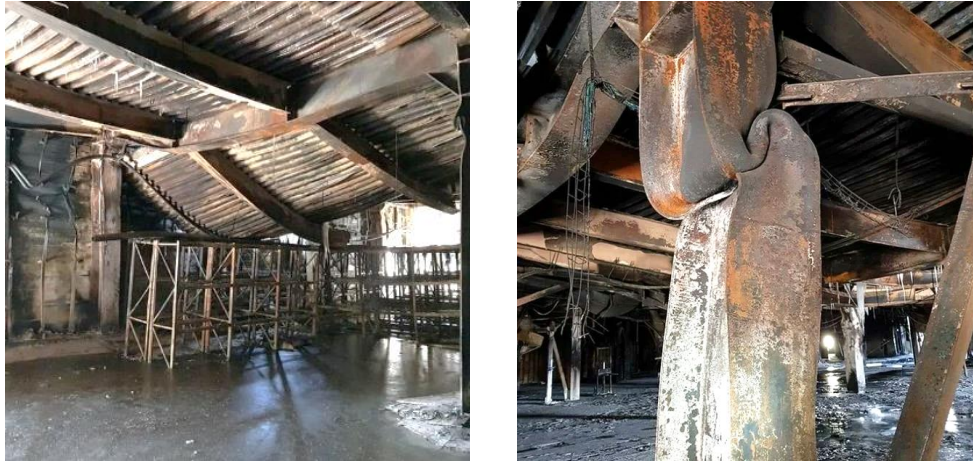
предела прочности, временного сопротивления и относительного удлинения [4–5].

Интенсивная потеря механических характеристик стальных конструкций в условиях пожара особенно характерна для конструкций, имеющих естественный усталостный износ с возможными деформационными и коррозионными повреждениями. Механические свойства стальных конструкций обеспечивают сопротивление разрушению стали в условиях воздействия высоких температур (пожара). Динамичное повышение температуры в очаге пожара является причиной разрушения стальных конструкций. Решающее значение в снижении механических свойств стали оказывают дефекты, количество которых стремительно повышается с увеличением температуры пожара. При достижении температуры плавления степень дефектности возрастает с повышением межатомных расстояний. В данном случае ослабление связей приводит к модификационным преобразованиям кристаллической решетки.

Повышение температуры приводит к уменьшению прочности, упругости и увеличению пластичности материалов. При высоких температурах также происходит увеличение деформаций ползучести, которые являются следствием увеличения пластичности металлов. Основными факторами, которые изменяются во времени, являются: прочность, удлинение и ползучесть стали при повышенных температурах. Известно [6], что незащищенные

стальные конструкции с учетом воздействия различных факторов (механическая нагрузка, схема нагружения, вид конструкции, ее геометрические параметры и т. д.) обладают сравнительно невысокой огнестойкостью в пределах от 8 до 25 минут. Значительные качественные изменения в составе и структуре стальных конструкций происходят при температурах нагрева до 700 °С. При этом степень деформационных превращений в стальных конструкциях зависит от особенностей деформации температурного расширения, изменения модуля упругости, а также деформации ползучести. Интенсивная утрата прочностных характеристик стальных конструкций и, соответственно, пределов огнестойкости наблюдается в условиях действия факторов окружающей среды (различные температурно-влажностные условия), длительно действующей механической нагрузки, повышения температуры и продолжительности ее воздействия.

О необходимости изучения поведения конструкций, имеющих длительные сроки эксплуатации, в условиях высоких температур говорят и реальные пожары, при которых стальные конструкции теряют свои несущие способности, что приводит к обрушению зданий. Например, одним из таких пожаров был пожар в ТЦ «Перекресток» в Кемерово в марте 2018 года, при котором погибли 60 человек. На этом пожаре стальные конструкции здания не выдержали высокой температуры и подверглись значительным температурным деформациям (рис. 1).



**Рис. 1.** Деформация стальных конструкций при пожаре в ТЦ «Перекресток» в Кемерово  
**Fig. 1.** Deformation of steel structures in the fire in the shopping center "Perekriostok" in Kemerovo

Другим характерным примером является пожар в доме дореволюционной постройки на улице Никитской в центре Москвы, который унес жизни семи человек, в том числе одного ребенка. Одной из причин является снижение несущей способности строительных конструкций, вызванное их естественным износом за время эксплуатации (рис. 2). Профессор Ройтман В. М. еще в то время отмечал, что

здание было построено в начале прошлого века и за это время накопился естественный износ несущих конструкций и коммуникаций, что повлияло на возникновение значительных температурных деформаций в условиях пожара. Тем не менее, вопрос влияния условий и продолжительности эксплуатации на огнестойкость стальных конструкции является фактически неизученным.



**Рис. 2.** Потеря несущей способности стальных конструкций при пожаре на улице Никитской в Москве

**Fig. 2.** Loss of bearing capacity of steel structures in the fire on Nikitskaya Street in Moscow

Известными являются случаи пожаров на объектах, в которых стальные конструкции эксплуатировались несколько десятилетий и в условиях пожара доста-

точно быстро потеряли свою несущую способность до момента эвакуации многих людей из зданий. Так, в 2009 году произошел пожар в 29-этажном жилом здании постройки 1987 года в городе Шанхай, при

котором несколько этажей обрушились из-за повреждения стальных конструкций (срок эксплуатации конструкций на момент пожара составил 22 года). Погибли 58 человек, более 70 человек получили ранения.

Уже более современный пожар в 2017 году произошел в многоэтажном жилом здании в Лондоне, построенном в 1974 году, известном как «Гренфеллтауэр». Конструкции здания (срок эксплуатации конструкций на момент пожара составил 43 года) не выдержали высоких температур и обрушились, погибли 72 человека.

Несомненно, все представленные примеры свидетельствуют о важности учета фактора технического износа и состояния стальных конструкций при оценке особенностей их поведения в условиях пожара и пределов огнестойкости. В связи с этим в последнее десятилетие было сформировано научное направление изучения поведения различных материалов и конструкций в условиях пожара с учетом длительного естественного износа после продолжительного воздействия факторов окружающей среды и механической нагрузки. В рамках данного направления занимают особое место исследования снижения эксплуатационных характеристик стальных конструкций при наступлении их критических состояний в условиях пожара. Обнаруживается необходимость изучения изменения величин пределов огнестойкости стальных конструкций в ходе их длительной эксплуатации по сравнению с исходными и/или нормативными показателями огнестойкости. С научной точки зрения эти вопросы имеют значительную актуальность в плане безопасного проектирования и применения металлических конструкций в строительстве, расчетной оценки пределов огнестойкости и выбора параметров применяемой огнезащиты.

### Результаты и их обсуждение

Известно, что достаточно большое количество работ [7–13] посвящено изучению поведения металлических конструкций в условиях пожара. Создание и развитие научного направления огнестойкости строительных конструкций состоялось благодаря таким отечественным и зарубежным ученым как В. И. Мурашев, А. И. Яковлев, А. Ф. Милованов, М. Я. Ройтман, К. Kordina, Т. Harmathy и др. Ими заложены основы огнестойкости и огнезащиты строительных конструкций и зданий, а также принципы расчетной методики по оценке фактических пределов огнестойкости. В области огнестойкости строительных конструкций, зданий и сооружений созданы отечественные научные школы. Проводимые исследования являются продолжением в рамках научной школы профессора Ройтмана В. М.

Расчетная оценка огнестойкости проводится с учетом ряда параметров, таких как вида конструкции, ее размеров, марки стали, схемы опирания и рабочей нагрузки. Существует несколько методов расчета огнестойкости, одним из наиболее распространенных является метод [7], основанный на принципе двухстадийного расчета фактических пределов огнестойкости конструкций. На первом этапе производится расчет статической части, позволяющей определить критическую температуру нагрева конструкции – температуру, при которой наступает потеря несущей способности конструкции. Для этого используются математические зависимости строительной механики с заменой коэффициентов условий работы при нормальных температурах на соответствующие коэффициенты при повышенных температурах, а также аналитические зависимости, полученные на основе экспериментальных данных [7–8].

На втором этапе производится расчет теплотехнической части, который сводится

к определению времени нагрева конструкций до заданной критической температуры при стандартном температурном режиме. Это время принимается за фактический предел огнестойкости [7–8].

Важными параметрами при расчетной методике по оценке огнестойкости являются модуль упругости и нормативное сопротивление стали [9]. Модуль упругости отражает способность материала сопротивляться деформации при нагрузке и является показателем его жесткости. При пожаре температура повышается, что ведет к изменению свойств материала, в том числе и модуля упругости [6–8]. Поэтому при расчете огнестойкости необходимо учитывать зависимость модуля упругости от температуры. Нормативное сопротивление стали отражает способность материала сопротивляться разрушению при нагрузке и является показателем его прочности. В условиях пожара температура также повышается, что ведет к снижению нормативного сопротивления стали. Поэтому при расчете огнестойкости необходимо учитывать изменение температурного коэффициента снижения нормативного сопротивления стали.

В существующей расчетной методике по оценке фактических пределов огнестойкости фактор влияния продолжительности эксплуатации металлических конструкций не учитывается. В случае снижения нормативного сопротивления стали из-за естественного старения коэффициент, учитывающий снижение прочности металла при нагреве, будет увеличиваться, что может привести к снижению критической температуры металла. Значения нормативного сопротивления и модуля упругости применимы только для сталей на момент ввода объекта в эксплуатацию. Однако при длительной эксплуатации стальных конструкций эти параметры могут значительно уменьшаться (см. табл. 3, рис. 11),

что приведет к увеличению разности крайних деформаций и, в конечном счете, к снижению несущей способности стальной конструкции.

В рамках развития научного направления огнестойкости строительных конструкций существуют работы, в которых имеются данные по огнестойкости стальных конструкций [10–13] таких ученых, как В. И. Голованов, А. В. Пехотиков, А. В. Зубань и других, в том числе и зарубежных авторов [6, 14–15], таких как: Bartheymy V., Krupar J., Kodur V.K.R.

Известно, что предел огнестойкости металлических конструкций наступает в результате потери прочности или за счет потери устойчивости самих конструкций или их элементов. Данным случаям соответствует критическая температура нагрева металла. С помощью решения теплотехнической задачи определяется время нагрева металла от начала действия температуры (пожара) до достижения в расчетном сечении критической температуры, т. е. решение этой задачи позволяет определить фактический предел огнестойкости конструкции. Значение прочности стали (по пределу текучести) при нагреве равно:

$$R_{tem} = R_{yn}\gamma_{tem},$$

где  $R_{yn}$  – нормативное сопротивление конструкционных прокатных сталей по пределу текучести при начальной температуре  $t_n = 20$  °С;

$\gamma_{tem}$  – коэффициент, учитывающий изменение прочности стали при нагреве.

Предельное состояние (из условия прочности) металлических конструкций и их элементов, находящихся в условиях пожара, наступает в результате снижения прочности стали  $R_{tem}$  до величины рабочих напряжений  $\sigma_n$  под действием нормативных нагрузок.

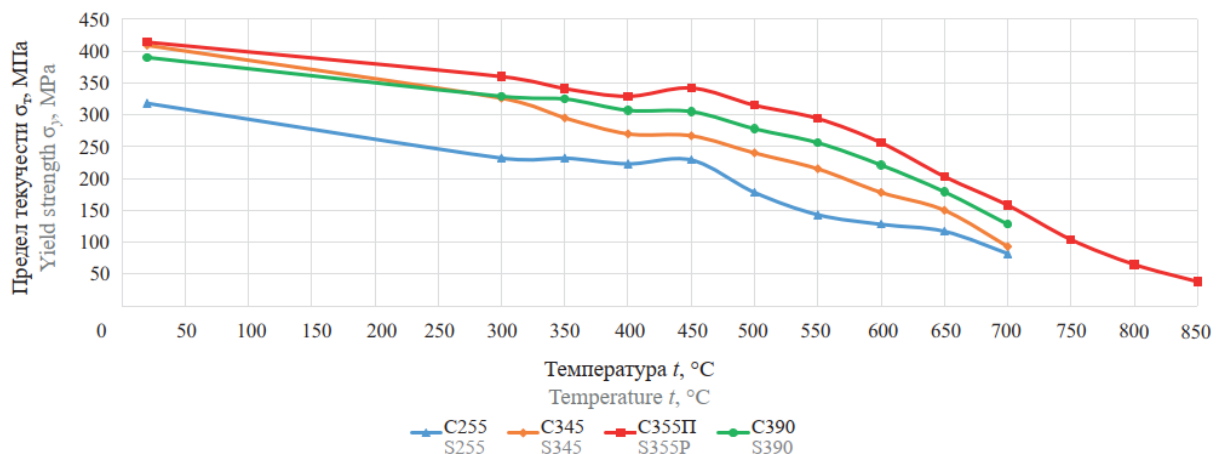
Авторами в работе [12] исследовалось изменение механических характеристик (предел текучести, предел прочности)

строительных конструкций при повышенных температурах (рис. 3, 4). В рамках экспериментальных исследований авторами были изготовлены образцы из стали следующих классов прочности: СтЗсп, 09Г2С, 14Г2.

Из рис. 3, 4 видно, что практически для всех марок сталей механические свойства начинают претерпевать необратимые изменения при температуре свыше 300 °С. Если предел текучести снижается достаточно равномерно, то временное сопротивление стали достигает максимума при температуре 300 °С, а затем начинает снижаться с ростом температуры [6]. В работах

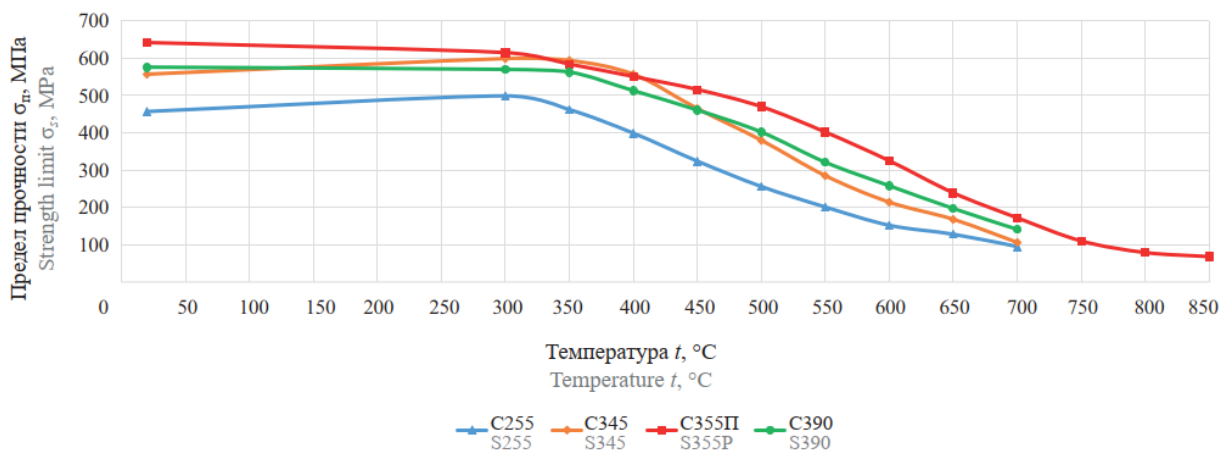
[6, 10] отмечено, что при температуре 500 °С предел текучести стали СтЗ снижается на 40 %, а при температуре 600 °С – на 60 %. Согласно [13], чем выше температура при прогреве, тем более значительнее происходит снижение механических характеристик стальных конструкций (рис. 5).

Важнейшим видом деформационных процессов при рассмотрении вопроса интенсивности потери несущей способности стальной конструкции являются упругие деформации.



**Рис. 3.** График зависимости предела текучести от температуры испытания [12]

**Fig. 3.** The graph of the yield strength dependence on the test temperature [12]



**Рис. 4.** График зависимости предела прочности от температуры испытания [12]

**Fig. 4.** The graph of the dependence of the ultimate strength on the test temperature [12]



Способность стального материала сопротивляться действующим нагрузкам характеризуется модулем упругости (модуль Юнга), который в условиях длительного износа конструкции с учетом возникновения возможных дефектов и изменений в структуре материала может снижаться. Особенно важно, насколько существенными могут быть эти изменения для стальных конструкций в зависимости от временного периода их эксплуатации.

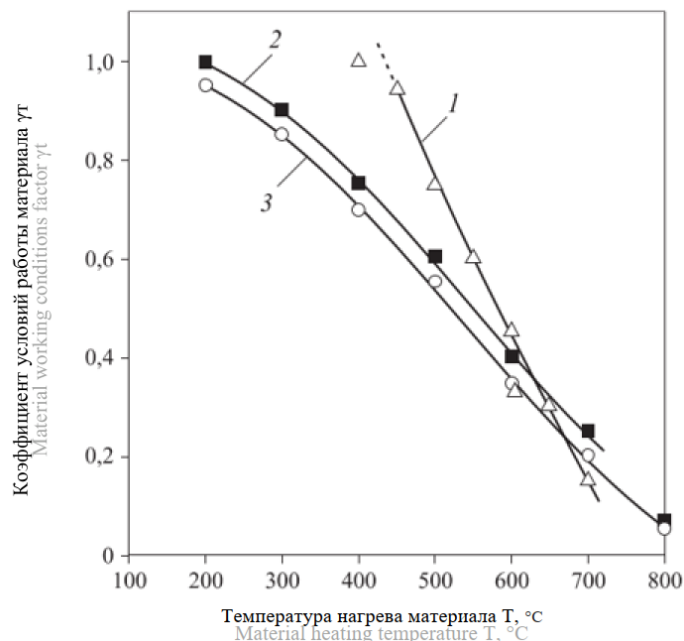
Модуль упругости стали при нагреве определяется как:

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

где  $E$  – модуль упругости прокатной стали при начальной температуре  $t_n = 20^\circ\text{C}$  (равен  $2,06 \cdot 10^5$  МПа);

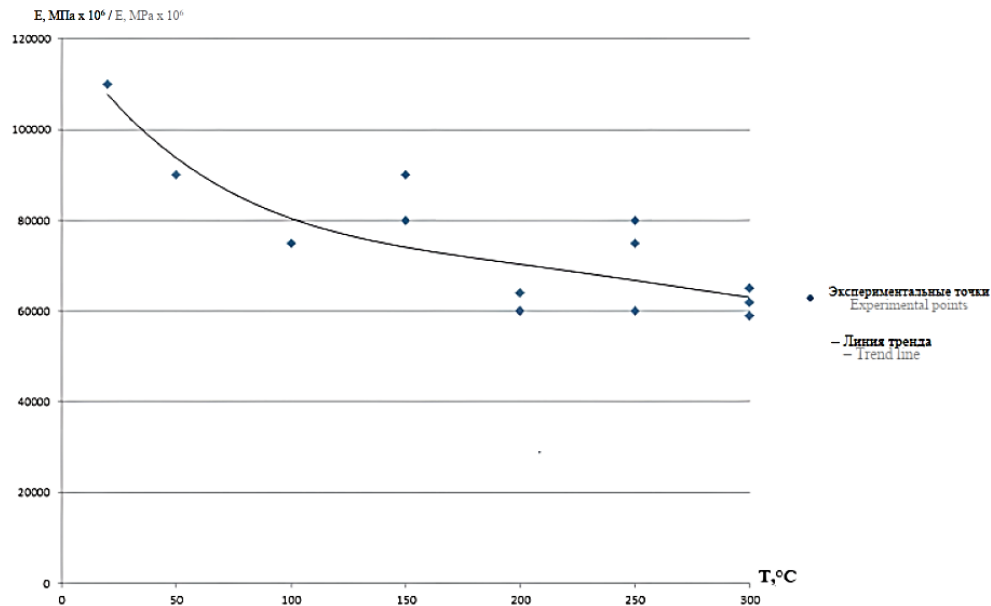
$\beta_{tem}$  – коэффициент, учитывающий снижение модуля упругости стали в зависимости от температуры ее нагрева.

В работе [16] были исследованы механические характеристики стального сплава X17 и алюминиевого сплава Д12. Во время экспериментальных испытаний было установлено, что для исследуемых образцов происходит частичная потеря пластичности при повышении температуры до  $300^\circ\text{C}$ . Период экспозиции образцов на растяжение при комнатной температуре составил ориентировочно один час, а в случаях воздействия температур  $100$  и  $200^\circ\text{C}$  время испытаний уменьшалось приблизительно до 30–40 минут. С возрастанием температуры до значений выше  $200^\circ\text{C}$  установлено повышение пластичности. В условиях высокотемпературного нагрева происходит заметное снижение модуля упругости стали [16], рис. 6.



**Рис. 5.** Изменение значений коэффициента условий работы при пожаре строительных конструкций в зависимости от температуры нагрева [13]: 1 – стержневая арматура А-III; 2 – тяжелый бетон с крупным заполнителем из карбонатных пород; 3 – тяжелый бетон с крупным заполнителем из силикатных пород

**Fig. 5.** Change in the values of the coefficient of working conditions in the fire of building structures depending on the temperature of heating [13]: 1 - rod reinforcement A-III; 2 - heavy concrete with a coarse aggregate of carbonate rocks; 3 - heavy concrete with a coarse aggregate of silicate rocks

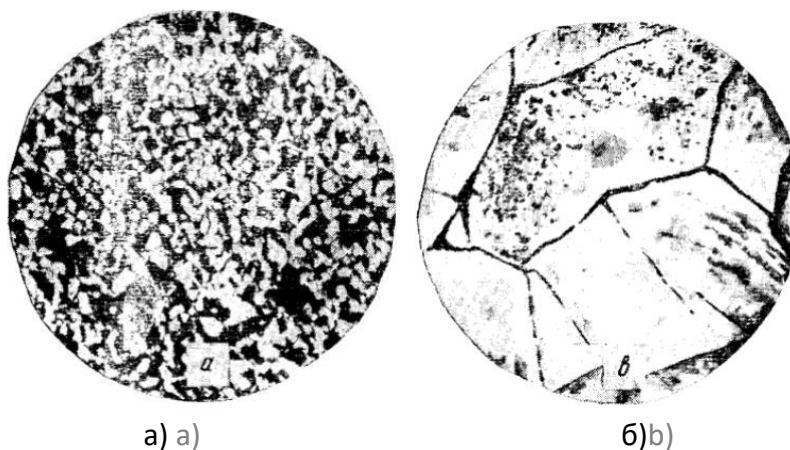


**Рис. 6.** Изменение модуля упругости стали сплава X17 [16]

**Fig. 6.** Changes in the elastic modulus of steel of alloy X17 [16]

Полученные изменения в ходе ранее проведенных исследований объясняются тем, что механические свойства стали во многом зависят от силы сцепления зерен друг с другом. При высоких температурах происходит частичное оплавление границ зерен, что приводит к резкому

снижению прочностных свойств материала [17]. Образовавшиеся окисленные зерна стали обладают малым взаимным сцеплением из-за наличия на их границах пленки окислов [17]. На рис. 7 представлена микроструктура углеродистой стали 35 до и после воздействия высоких температур.

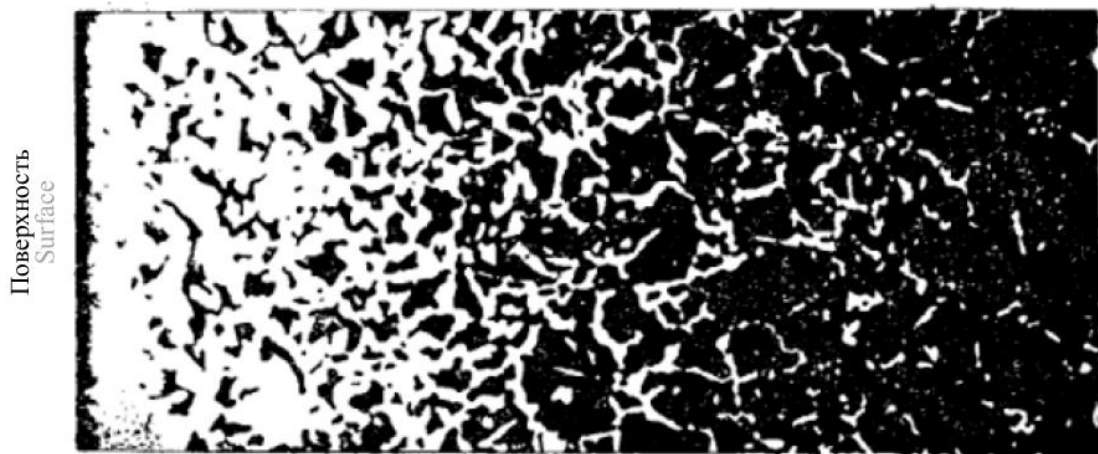


**Рис. 7.** Микроструктура стали 35 (x 100) [17]: а – микроструктура стали в исходном состоянии; б – микроструктура стали после воздействия высоких температур

**Fig. 7.** Microstructure of steel 35 (x 100) [17]: a - microstructure of steel in the initial state; b - microstructure of steel after exposure to high temperatures

После нагрева микроструктура стали меняется, зерна значительно увеличиваются в размерах (рис. 7б), что приводит к интенсивному хрупкому разрушению и резкому снижению механических характеристик стали, вследствие чего в условиях пожара и при постоянной механической нагрузке конструкция теряет свою несущую способность [18]. При температуре свыше 750 °С происходит выгорание углерода (обезуглероживание) в поверхностном слое металла, способствующего возникновению растягивающих напряжений в поверхностном слое, снижающих уста-

лостную прочность стали и рост зерна микроструктуры. Чем выше величина зерна, тем ниже механические свойства стали [17]. Процесс поверхностного обезуглероживания возникает из-за того, что кислород воздуха, окружающего нагретую стальную конструкцию, соединяется с углеродом поверхностного слоя стали [19]. Это приводит к уменьшению содержания углерода в поверхностном слое стали, иногда это может привести к полному выгоранию углерода, что поверхностный слой оказывается состоящим из чистого железа (рис. 8).



**Рис. 8.** Обезуглероженный слой на поверхности стали – x100 [16]

**Fig. 8.** The decarburized layer on the steel surface - x100 [16]

Проведенный анализ в области огнестойкости стальных строительных конструкций показал [6–8, 10, 12–13] зависимость времени наступлений предельных состояний от показателей механических свойств конструкций.

Механические свойства стали играют важную роль в сопротивлении разрушению при пожаре. Однако разрушение стальных конструкций происходит при резком повышении температуры в очаге пожара. Следовательно, учет потерь пределов прочности и текучести является важным фактором при оценке огнестойкости стальных конструкций.

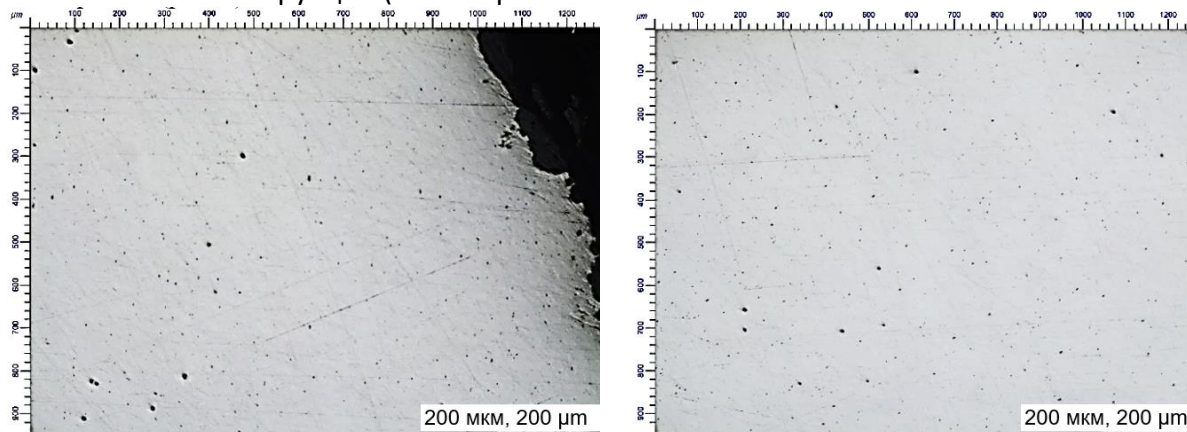
Основным фактором снижения качественных и эксплуатационных характеристик металлов является процесс естественного старения. Согласно [20], при длительной эксплуатации металлических конструкций под воздействием факторов окружающей среды, различных механических нагрузок происходят необратимые изменения физико-химических характеристик металлических конструкций, которые в дальнейшем могут привести к разрушению конструкций, данный процесс называется процессом естественного старения. Проблема естественного старения стальных строительных конструкций (балки, стойки, колонны, фермы и т. д.) с установ-

лением изменения качественных характеристик во времени эксплуатации является малоизученной. Большинство научных трудов по изучению различных свойств сталей выполнены в области машиностроения, износоустойчивости трубопроводов, деталей машин и т. д. Результаты подобных исследований представлены в трудах таких ученых, как Демина Ю. А., Молочная Т. В., Панин С. В., Полонский Я. А. и др. [4–5].

В настоящей работе основной задачей было выяснение возможных изменений в составе и структуре стали конструкций продолжительной эксплуатации и спрогнозировать их возможное влияние на огнестойкость стальных конструкций, поскольку такие изменения, как было уже сказано выше, в практике научных исследований были установлены в большей степени для других отраслей промышленности (машиностроение, трубная промышленность и т. д.), но не в отношении конструктивной стали. В рамках решения поставленной задачи были проведены исследования механических характеристик стальной конструкции (швеллер с тол-

щиной стенки 6 мм, по геометрическим параметрам швеллер сопоставим со швеллером № 27 по ГОСТ 8240) площадки обслуживания оборудования, имеющей подтвержденный срок эксплуатации 86 лет внутри здания текстильного комбината имени III Интернационала по адресу: Владимирская область, Александровский район, г. Карабаново, пл. Ленина, д. 1.

Особенностью стальных конструкций в объектах, построенных в прошлом столетии, является их метод получения по способу Сименс – Мартена и бессемерованием. В довоенные и послевоенные годы в строительстве преимущественно использовались кипящие стали, при их получении химический состав не регламентировался, что привело к появлению в их составах различных вредных примесей, которые негативно влияют на эксплуатационные характеристики стали и такие стали являются более загрязненными с наличием неметаллических включений в виде точечных оксидов и сульфидов марганца (рис. 9).



**Рис. 9.** Изображения наиболее загрязненных зон неметаллическими включениями для образца стали длительного срока эксплуатации

**Fig. 9.** Images of the most contaminated areas with non-metallic inclusions for a sample of steel of a long line of operation

**Табл. 2**  
Химический состав образца  
**Table 2**  
Sample chemical composition

Содержание элементов в основном металле, % Element content in the base metal, %								
Наименование элементов Name of elements	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
Результаты количественного анализа. Results of quantitative analysis	0,146	0,050	0,450	0,010	0,012	0,023	0,081	0,046
Наименование элементов. Name of elements	Cu	Al	B	Nb	Ti	V	W	Fe
Результаты количественного анализа. Results of quantitative analysis	0,094	0,0052	<0,00010	0,014	<0,0050	<0,0050	<0,010	99,04

По содержанию в малом количестве кремния 0,05 % и алюминия 0,0052 % можно установить, что сталь является не полностью раскисленной и содержит в себе кислород. Такая сталь более хрупкая, плохо сваривается и быстрее подвергается процессу коррозии [21]. Также присутствие кислорода в стали негативно скажется при пожаре, так как окислы кислорода чаще всего являются непрочными и выступают концентраторами напряжений. Их наличие в структуре сплава заметно уменьшает его выносливость. Кислород также уменьшает сопротивляемость стали хрупкому разрушению.

Неметаллические включения, по сути, действуя в роли концентраторов напряжения, могут способствовать снижению механических, технологических и экс-

плуатационных свойств [22], а также повышению охрупчивания сталей, что напрямую влияет на прочность, пластичность и характер разрушения материала при пожаре.

Как отмечалось ранее, длительная эксплуатация конструкций под воздействием факторов окружающей среды, различных механических нагрузок приводит к коррозионному повреждению, в следствии чего конструкция теряет качественные и эксплуатационные характеристики. В связи с этим для определения механических свойств исследуемой конструкции, введенной в эксплуатацию в 1936 году, были вырезаны два образца из участков с признаками коррозии, распространяющейся вглубь по толщине образца (рис. 10).



**Рис. 10.** Характерный участок со следами значительной коррозии стального образца (срок эксплуатации с 1936 года)

**Fig. 10.** Characteristic area with traces of significant corrosion of the steel sample (in service since 1936)

Испытания проводились на универсальной испытательной машине LFM-250kN по ГОСТ 1497-84 со скоростью нагружения 8 мм/мин. Основные результаты испытаний и нормативные показатели кипящих сталей СтЗкп и СтЗпс приведены в табл. 3 и на рис. 11.

Проведенный сравнительный анализ результатов испытаний на статическое рас-

тяжение и нормативных показателей свидетельствует о том, что коррозионные поражения значительно снижают 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 %.

**Табл. 3**

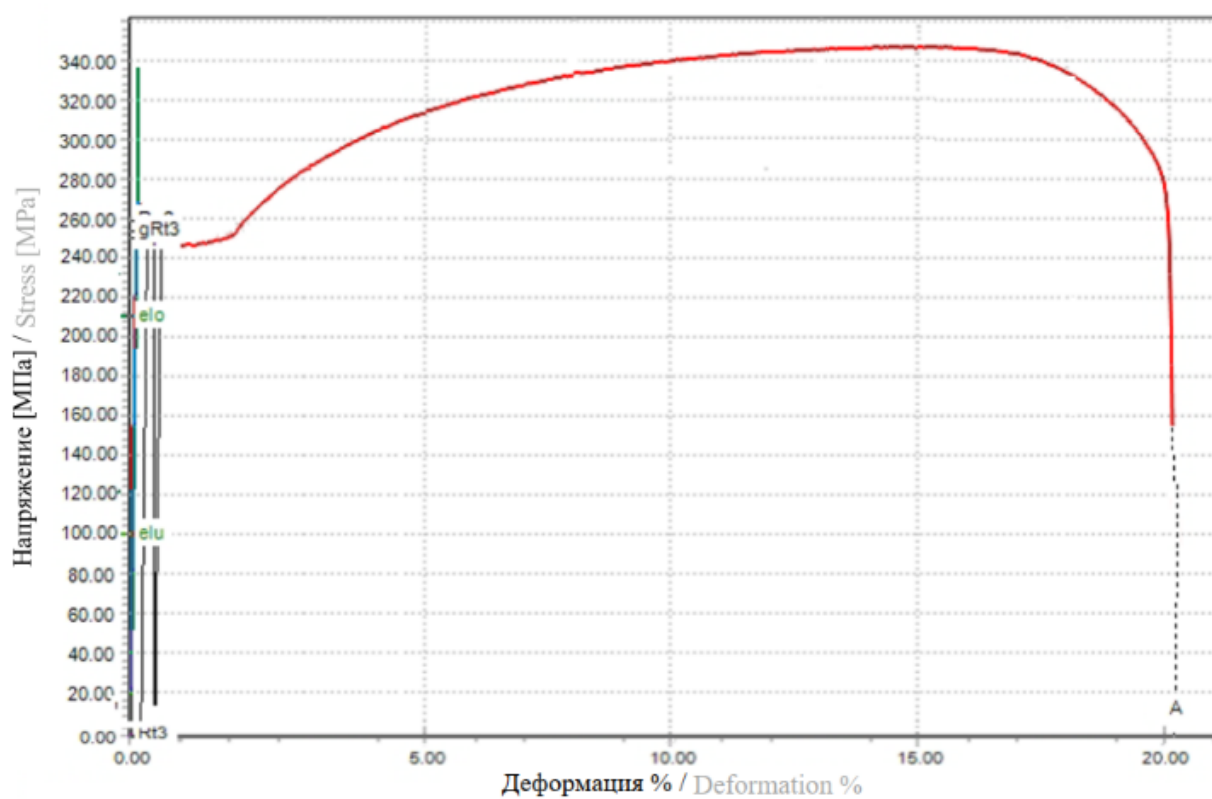
Основные результаты испытаний на статическое растяжение образцов Ш-1,2 и нормативные показатели по ГОСТ 535-2005

**Table 3**

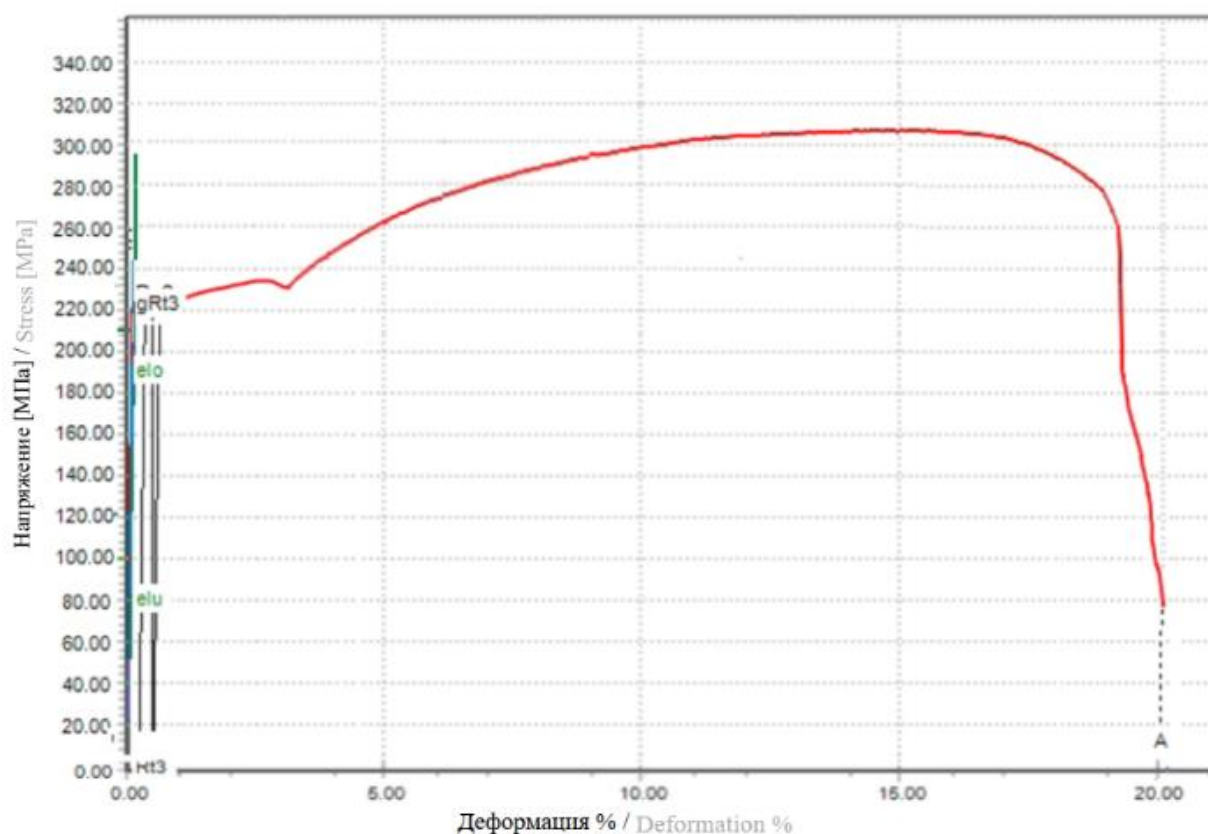
The main results of static tensile tests of specimens Sh-1,2 and normative indicators according to GOST 535-2005

Марка стали. Steel grade.	Временное сопротивление $\sigma_B$ , Н/мм <sup>2</sup> (кгс/мм <sup>2</sup> ), для проката толщин, мм. Tensile strength $\sigma_B$ , N/mm <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> ), for rolled thicknesses, mm.		Предел текучести $\sigma_T$ , <N/мм <sup>2</sup> (кгс/мм <sup>2</sup> ), для проката толщин, мм. Yield strength $\sigma_T$ , <N/mm <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> ), for rolled thicknesses, mm.		Относительное удлинение $\delta$ , %, для проката толщин, мм. Relative elongation $\delta$ , %, for rolled thicknesses, mm.
	до 10 вкл. up to 10 incl.	св.10 over 10	до 10 вкл. up to 10 inclusive	св.10 до 20 вкл. more than 10 to 20 incl.	до 20 включ. up to 20 inclusive.
СтЗкп St3 boiling st	360-460 (37-47)		235 (24)	235 (24)	27

СтЗп St 3 semi-soft st	370-480 (38-49)	245 (25)	245 (25)	26			
Основные результаты испытаний на статическое растяжение образцов Ш-1,2 Results of static tensile tests of specimens Sh-1,2							
Образец Sample	Размеры, мм Dimensions, mm	Начальное сечение, $S_0$ , мм <sup>2</sup> Initial section, $S_0$ , mm <sup>2</sup>	Усл. предел текучести при 0,5%, МПа. Yield strength at 0.5%, МПа	Предел текучести при 0,2%, МПа Yield strength at 0.2%, МПа	Предел текучести при 0,5%, МПа. Yield strength at 0.5%, МПа	Предел прочности, МПа. Tensile strength, МПа	Удлинение при разрушении, %. Elongation at break, %
Ш-1 Sh-1	20.02 x 4.97	99.50	242.38	244.69	243.54	345.70	20.08
Ш-2 Sh-2	19.98 x 4.96	99.10	221.60	223.57	222.50	304.52	19.94



а) а)



б) б)

**Рис. 11.** Диаграммы растяжения стальных образцов: а – Ш-1, б – Ш-2

**Fig. 11.** Tensile diagrams of steel specimens: a - Sh-1, b - Sh-2

Таким образом, предел текучести определяет начало и интенсивность пластической деформации стальных конструкций с последующим разрушением в условиях пожара. Утрата механических характеристик стальных конструкций в условиях нагрева (пожара) происходит более интенсивно по причине длительного воздействия механических нагрузок и факторов окружающей среды. В условиях пожара скорость нарастания необратимых деформаций и соответствующие изменения в структуре металла могут привести к снижению восприимчивости стальных конструкций к воздействию пожара и снижению значений пределов их огнестойкости.

### Выводы

В настоящей работе установлены возможные изменения в составе и структуре стали конструкций длительного срока

эксплуатации на примере стальной конструкции (швеллер с толщиной стенки 6 мм, по геометрическим параметрам швеллер сопоставим со швеллером № 27 по ГОСТ 8240) площадки обслуживания оборудования, имеющей подтвержденный срок эксплуатации 86 лет внутри здания текстильного комбината имени III Интернационала по адресу: Владимирская область, Александровский район, г. Карбаново, пл. Ленина, д. 1. Спрогнозировано возможное влияние изменений физико-химических и механических характеристик стальной конструкции в период длительного естественного износа на пределы их огнестойкости.

Ранее полученные результаты исследований по оценке огнестойкости стальных конструкций свидетельствуют о том, что при увеличении температуры прогрева



стальных конструкций происходит существенное снижение их механических характеристик, и повышенная температура в очаге пожара становится причиной разрушения стальных конструкций. При этом особенно важным при оценке огнестойкости стальных конструкций является установление изменений пределов прочности и текучести сталей.

По результатам настоящего исследования было установлено, что эксплуатация конструкций в условиях постоянной механической нагрузки и воздействия факторов окружающей среды, а также различных условий эксплуатации приводит к возникновению необратимых деформаций и изменению эксплуатационных характеристик. Эти изменения могут вызвать снижение прочности, временного сопротивления и относительного удлинения стальных конструкций.

Результаты влияния длительного срока эксплуатации стальных конструкций на физико-химические и механические характеристики на примере конструктивного стального элемента (швеллера) (срок эксплуатации с 1936 года) в здании текстильного комбината имени III Интернационала (Карабаново, Владимирская

область) показывают, что рассматриваемые образцы изготовлены из кипящей стали и являются загрязненными с наличием неметаллических включений, а именно в структуре стали присутствуют точечные оксиды и сульфиды марганца, которые могут стать причиной снижения механических характеристик стальных конструкций, что повлияет на характер разрушения конструкции при пожаре.

Проведенные механические испытания на статическое растяжение образцов из остро пораженных коррозией участков показали снижение предела прочности образца Ш-2 ниже нормативного временного сопротивления на 15 %, предела текучести на 10 % и относительного удлинения на 12 %.

На основании полученных результатов предполагается, что снижение механических характеристик при продолжительной эксплуатации стальных конструкций под воздействием факторов окружающей среды и длительных механических нагрузок неизбежно приведет к снижению их способности противостоять воздействию повышенных температур (пожара), выраженной в снижении пределов огнестойкости этих конструкций.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Анализ обстановки с пожарами и их последствиями на территории РФ за 2022 г. / Департамент надзорной деятельности и профилактической работы // Fireman.club: сетевое издание. URL: <https://fireman.club/literature/analiz-obstanovki-s-pozharami-i-ih-posledstviyami-na-territorii-rossijskoj-federaczii-za-2022-god/> (дата обращения: 14.04.2023).
2. Даулетбаев Р. Б., Вовк Б. В. Надежность строительных конструкций зданий и сооружений в процессе их эксплуатации // Инновации и инвестиции. 2019. № 5. С. 173–177.
3. Гридин А. Д. Особенности коррозионного растрескивания металла под напряжением и его последствия // Экспериментальная наука: механизмы, трансформации, регулирование, Уфа, 18 апреля 2020 г. – Стерлитамак, 2020. – С. 71–76.
4. Демина Ю. А. Дegradaция усталостных характеристик стали в результате длительного старения // Физико-химия и технология неорганических материалов: сб. мат. VIII Российской ежегодной конференции молодых научных сотрудников и аспирантов, 15-18 ноября 2013 г., Москва. – 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. Бартелими Б., Крюппа Ж. Огнестойкость строительных конструкций / пер. с франц. М. В. Предтеченского; под ред. В. В. Жукова. М., 1985. 216 с.
7. Яковлев А. И. Расчет огнестойкости строительных конструкций. М., 1988. 142 с.

8. Ройтман В. М. Инженерные решения по оценке огнестойкости проектируемых и реконструируемых зданий. М., 2001. 382 с.
9. Шахатов М. М., Сивенков А. Б., Анохин Е. А. О необходимости учета фактора продолжительности эксплуатации металлических конструкций в расчетной методике оценки их огнестойкости // Всероссийская научно-практическая конференция «Применение методов инженерного анализа и компьютерного моделирования при разработке и оценке эффективности противопожарных мероприятий», Екатеринбург, 7 декабря 2021 г. – Екатеринбург, 2021. – С. 276–281.
10. Дианов Х. А., Локтев А. А., Нисаев И. П. Прочность стали Ст3 в условиях одностороннего нагрева и динамического нагружения // Инновационные подходы к решению технико-экономических проблем, Москва, 25 мая 2016 г. – М., 2016. – С. 121–125.
11. 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.
12. Исследование механических свойств современного металлопроката строительного назначения при повышенных температурах / В. И. Голованов и др. // Пожаровзрывобезопасность. 2022. № 31 (2). С. 52–62.
13. 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.
14. Kruppa Joël. (1981). Some results on the fire behaviour of external columns. Fire Safety Journal - FIRE SAFETY J. 4. pp. 247-257.
15. Kodur V. K. R., Sultan M. A., Tan K. H. (2006). Fire resistance of high strength steel columns: A review. Engineering Structures, 28(5), pp. 648-659.
16. Добрышкин А. Ю., Сысоев О. Е., Сысоев Е. О. Экспериментальное исследование влияния воздействия температурного режима на модуль Юнга // Труды МАИ. 2020. № 115.
17. Солнцев Ю. П., Веселов В. А., Демянцева В. П. Металловедение и технология. М., 1988. 512 с.
18. Огнестойкость зданий / В. П. Бушев В. П. и др. М., 1970. 264 с.
19. Захаров Б. П. Термист // Министерство труд, резервов СССР. Свердловск; Москва, 1946. 192 с.
20. Калинин В. М., Сокова С. Д. Оценка технического состояния зданий. М., 2005. 267 с.
21. Комаров О. Н., Жилин С. Г., Предеин В. В. Технология получения заготовок из кипящей стали для прокатного производства // Будущее машиностроения России. 2016. С. 189–191.
22. Влияние неметаллических включений на механические свойства сталей / А. В. Нархов и др. // ЦНИИ информации и технико-экономических исследований черной металлургии. М., 1922. Вып. 1. 9 с.

#### REFERENCES

1. Department of Supervision and Preventive Work / Analysis of the situation with fires and their consequences in the Russian Federation for 2022 // Official website. URL: <https://fireman.club/literature/analiz-obstanovki-s-pozharami-i-ih-posledstviyami-na-territorii-rossijskoj-federacii-za-2022-god/> (accessed 14.04.2023). (rus).
2. Dauletbaev R.B., Vovk B.V. Reliability of building structures of buildings and structures during their operation. Innovacii i investicii / *Innovations and Investments*, 2019; 5: 173–177 (rus).
3. Gridin A. D. Features of stress corrosion cracking of metal and its consequences / *Experimental'naya nauka: mexanizmy, transformacii, regulirovanie / Experimental Science: mechanisms, transformations, regulation*, 2020; 71–76. (rus).
4. Demina U. A. Degradation of fatigue characteristics of steel as a result of long-term aging. Proceedings of the VIIIth Russian Annual Conference of Young Scientists and Graduate Students "Physical Chemistry and Technology of Inorganic Materials", November 15-18, 2013, Moscow, 57–59. (rus).
5. Polonsky Y.A. Micromechanics of destruction of steel X23N18 after long service life. Vestnik TGU, 2013; 15 (3): 976–977. (rus).
6. Barthelemy B., Kruppa J. Fire resistance of building structures. Translated from French M.V. Predtechensky; ed. V. Zhukov. Moscow, Stroyizdat, 1985; 216.
7. Yakovlev A. I. Calculation of fire resistance of building structures. Moscow: Stroyizdat, 1988; 142. (rus).
8. Roitman V. M. Engineering solutions for assessing the fire resistance of designed and reconstructed buildings. Association "Fire Safety and Science", 2001; 382. (rus).
9. Shakhmatov M. M., Sivenkov A. B., Anokhin E. A. On the need to take into account the factor of the duration of operation of metal structures in the calculation method of assessing their fire resistance. All-Russian

Scientific and Practical Conference "The Application of Methods of Engineering Analysis and Computer Modeling in Developing and Assessing the Efficiency of Fire Safety Measures". Yekaterinburg, December 7, 2021; 276–281. (rus).

10. Dianov Kh. A., Loktev A. A., Nisaev I. P. Strength of St3 steel under conditions of single-sided heating and dynamic loading. Innovative approaches to solving technical and economic problems, Moscow, May 25, 2016. Moscow, National Research University "Moscow Institute of Electronic Technology", 2016; 121–125. (rus).

11. Shebeko Y. N., Zuban A. V., Shebeko A. Y. Calculation of the actual fire resistance limit of unprotected steel structures at different fire temperatures. *Pozharovzry`vobezopasnost` / Fire and explosion safety*. 2019; 28 (6): 29–34. (rus).

12. Golovanov V. I., Kryuchkov G. I., Strekalev A. N., Komissarov A.A., Tikhonov S.M. The study of mechanical properties of modern metal rolling for construction purposes at elevated temperatures / *Pozharovzry`vobezopasnost` / Fire and Explosion Safety*, 2022; 31 (2): 52–62. (rus).

13. Roitman V. M. Physical meaning and evaluation of the coefficient of working conditions and the critical temperature of heating of structural materials in fire conditions. *Pozharovzry`vobezopasnost` / Fire and Explosion Safety*. 2011; 20 (5): 14–21. (rus).

14. Kruppa Joël. Some results on the fire behavior of external columns. *Fire Safety Journal*. 1981; 4: 247–257.

15. Kodur V. K. R., Sultan M. A., Tan K. H. Fire resistance of high strength steel columns: A review. *Engineering Structures*, 2006; 28(5): 648–659.

16. Dobryshkin A. U., Sysoev O. E., Sysoev E. O. Experimental study of the effect of temperature conditions on the Young's modulus. *Proceedings of MAU*, 2020; 115: 27. (rus).

17. Solntsev Yu. P., Veselov V. A., Demyantsevich V. P. *Metal Science and Technology*. Moscow, Metallurgy, 1988; 512. (rus).

18. Bushev V. P., Pchelintsev V. A., Fedorenko B. S., Yakovlev A. I. Fire resistance of buildings. Moscow, Stroyizdat, 1970; 264. (rus).

19. Zakharov B. P. *Termist*. Sverdlovsk, Moscow: Mashgiz, 1946; 192. (rus).

20. Kalinin V. M., Sokova S. D. Estimation of the Technical State of Buildings. Moscow, INFRA-M, 2005; 267. (rus).

21. Komarov O. N., Zhili S. G., Predein V. V. Technology of obtaining billets from boiling steel for rolling production. *Future of Russian Machine-Building*, 2016; 189–191. (rus).

22. Narkhov A. V., Klypin B. A., Ray A., Pal S.K., Chistyakov N. S., Yunakov I. V. Effect of non-metallic inclusions on the mechanical properties of steels. Central Research Institute for Information and Technical and Economic Research of Ferrous Metallurgy. Issue 1, Moscow, 1992; 9. (rus).

### Информация об авторах

**Шахабов Майрбек Мусаевич**, адъюнкт; Академия ГПС МЧС России, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; [shahmayrbek95\\_95@mail.ru](mailto:shahmayrbek95_95@mail.ru), +7 (928) 563-32-81; ORCID ID: 0000-0001-8299-8780; SPIN-код: 7271-5784, РИНЦ AuthorID: 1121498. e-mail: [shahmayrbek95\\_95@mail.ru](mailto:shahmayrbek95_95@mail.ru)

**Сивенков Андрей Борисович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры пожарной безопасности в строительстве в составе учебно-научного комплекса пожарной безопасности объектов защиты; Академия ГПС МЧС России, Рос-

### Information about the authors

**Mayrbek M. Shakhobov**, adjunct, Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia; Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation, ID RISC: 1121498, ORCID ID: 0000-0001-8299-8780, SPIN-код: 7271-5784, e-mail: [shahmayrbek95\\_95@mail.ru](mailto:shahmayrbek95_95@mail.ru)

**Andrey B. Sivenkov**, Doctor of Technical Sciences, professor, Professor in the Department of Fire Safety in Construction as part of the Training and Research Complex for Fire Safety of Protection Facilities, Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia;

сия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4, ResearcherID: R-5518-2017, ORCID: 0000-0003-3821-8606, ПИНЦ Author ID: 434522,  
e-mail: [sivenkov01@mail.ru](mailto:sivenkov01@mail.ru)

**Корольченко Дмитрий Александрович**, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой комплексной безопасности в строительстве; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, ПИНЦ ID: 352067, Scopus Author ID: 55946060600, ResearcherID: E-1862-2017, ORCID: 0000-0002-2361-6428,  
e-mail: [da-vip@mail.ru](mailto:da-vip@mail.ru).

Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation, ResearcherID: R-5518-2017, ORCID: 0000-0003-3821-8606, ID RISC: 434522,  
e-mail: [sivenkov01@mail.ru](mailto:sivenkov01@mail.ru)

**Dmitriy A. Korolchenko**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Integrated Building and Construction Safety, National Research Moscow State University of Civil Engineering; Yaroslavskaya St., 26, Moscow, ID RISC: 352067, Scopus Author ID: 55946060600, ResearcherID: E-1862-2017, ORCID: 0000-0002-2361-6428,  
e-mail: [da-vip@mail.ru](mailto:da-vip@mail.ru)