

*І.Г. Маладика, канд. техн. наук, доцент, І.М. Шкарабура
(Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля
Національного університету цивільного захисту України)*

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ БУДІВЕЛЬ ЗІ СТАЛЕВИМ КАРКАСОМ

Досвід експлуатації сталевих конструкцій свідчить про їхній достатній запас несучої здатності за умови відсутності непередбачуваних силових і високотемпературних впливів.

Суттєвими причинами підвищеної небезпеки для конструкцій за таких умов є перерозподіл внутрішніх зусиль в елементах, нерівномірний нагрів і зміна характеристик міцності та деформативності матеріалу конструкцій (сталі) під час і після пожежі за умови руйнування вогнезахисних покриттів. У зв'язку з цим виникає необхідність в проведенні робіт із обстеження, визначення технічного стану та його регулювання для відновлення експлуатаційної придатності конструкцій з урахуванням прогнозу можливої зміни визначальних параметрів технічного стану і можливого руйнування конструкцій після високотемпературних впливів. При цьому необхідно вирішувати питання, які пов'язані із забезпеченням тривалої та надійної експлуатації конструкцій шляхом застосування відповідних матеріалів або захисних заходів, а також визначення напружено-деформованого стану конструкцій при різних впливах, і виконанням відновлювальних робіт.

Метою цієї роботи є розробка заходів щодо забезпечення вогнестійкості сталевих конструкцій будівель та споруд при дії силових і високотемпературних впливів, визначення технічного стану та можливості продовження терміну експлуатації або необхідності регулювання технічного стану шляхом ремонту, підсилення або заміни конструкцій.

Викладено методичні підходи щодо розрахунку сталевих конструкцій на вогнестійкість. Науковою новизною можна вважати наведені пропозиції щодо визначення технічного стану сталевих конструкцій після пожежі та його регулювання для подальшої експлуатації конструкцій будівель та споруд шляхом ремонту, підсилення або заміни (за необхідності).

Ключові слова: сталеві конструкції, силові та температурні впливи, вогнестійкість, технічний стан, експлуатація.

I.H. Maladyka, I.M. Shkarabura

PROVIDING OF FIRE-RESISTANCE OF STEEL-FRAMED BUILDINGS

The experience of steel structures operating indicates that they have sufficient bearing capacity in case of the absence of unpredictable power and high-temperature influences.

The essential causes of increased danger for structures under such conditions are the redistribution of internal forces in the elements, uneven heating and changes in the strength and deformability characteristics of the structures material (steel) during and after the fire in case when the fireproof coatings are destroyed. In this regard, there is a need of the building structures inspection, the technical condition determination and its regulation to resume the operational fitness of structures, taking into account the forecast of a possible change in the determining parameters of the technical state and possible destruction of structures after the high-temperature impacts. At the same time, it is necessary to resolve issues related with ensuring of the long-term and reliable operation of the structures by using appropriate materials or protective measures, as well as determining the stress-strain state of the structures under different influences and performing of the restoration work.

The purpose of this work is to develop measures to ensure the fire resistance of the steel structures of buildings and structures under the influence of power and high temperature factors, as well as determining the technical condition and the possibility of the service life prolongation or the need to regulate the technical condition by repairing, reinforcing or structures replacing.

The methodical approaches for the calculation of the steel structures fire resistance are described. The scientific novelty includes the above proposals for determining the technical condition of the steel structures after a fire and its regulation for the further operation of buildings structures by repair, reinforcement or replacement (if necessary).

Key words: steel structures, power and temperature impacts, fire resistance, technical condition, operation.

Постановка проблеми. Широкого застосування сталеві конструкції набули у будівництві одноповерхових виробничих будівель, несучих каркасів висотних будівель, будівель громадського призначення з великими прольотами, будівель спеціального призначення тощо. Це пояснюється тією обставиною, що сталь має високу міцність, надійно працює при різних видах наванта-

ження, відповідає вимогам довговічності (за умов використання надійних засобів захисту). Сталеві конструкції індустріальні, тобто виготовляються на спеціалізованих заводах. Окремі елементи, конструкції (відправні марки) транспортуються до місця будівництва, монтуються та встановлюються у проектне положення з використанням підйомно-транспортних засобів [1].

Хоча сталеві конструкції виконані з матеріалу, що не згорає, фактична межа їхньої вогнестійкості в середньому становить 15 хв. Це пояснюється досить швидким зниженням характеристик міцності та деформативності металу при підвищених температурах під час пожежі. При обрушенні або значних прогинах сталеві конструкції вибувають з експлуатації, псується устаткування, сировина, готова продукція, а також ускладнюється вирішення питань евакуації людей, організації гасіння пожежі.

Інтенсивність нагрівання металоконструкцій залежить від ряду чинників, до яких відносяться характер нагріву конструкцій і способи їх захисту. У разі короточасної дії температури при реальній пожежі, після займання горючих матеріалів метал піддається нагріву повільніше і менш інтенсивно, ніж нагрівається доквілля. При дії «стандартного» режиму пожежі температура доквілля не перестає підвищуватися і теплова інерція металу, що обумовлює деяку затримку нагрівання, спостерігається лише протягом перших хвилин пожежі. Потім температура металу наближається до температури середовища, що нагрівається. Захист сталевих елементів й ефективність цього захисту також впливають на нагрів металу.

Висока міцність, надійність, індустріальність виготовлення з урахуванням принципів уніфікації, стандартизація їхніх елементів, можливість транспортування на великі відстані, малі строки монтажу, відносна легкість, порівняно із залізобетонними конструкціями, складають економічність використання сталевих конструкцій у будівництві.

Крім того, сталеві конструкції зручні в експлуатації, оскільки легко ремонтуються та можуть бути підсилені під час проведення робіт з реконструкції при збільшенні навантажень. Але сталеві конструкції мають і недоліки: схильність до корозії, що потребує спеціальних заходів щодо захисту; мала вогнестійкість при температурах, які перевищують 400°C , що також потребує проведення відповідних заходів для їх захисту від впливу високих температур.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Фактична межа вогнестійкості сталевих конструкцій при «стандартному» режимі пожежі, залежно від площі перерізу елементів та величини діючого напруження становить від 6 до 24 хв. Виняток становлять сталеві оболонки, мембранні покриття, у яких межа вогнестійкості без вогнезахисту може сягати 45-60 хв. При проектуванні будівель та споруд межу вогнестійкості незахищених сталевих конструкцій з приведеною товщиною металу в 10 мм допускається приймати такою, що дорівнює 15 хв. Значення ж необхідних меж вогнестійкості основних будівельних конструкцій, у тому числі сталевих, дорівнюють від 15 до 150 хв залежно від ступеня вогнестійкості будівлі та типу конструкцій. Таким чином, більшість незахищених сталевих конструкцій задовольняють лише вимогам щодо меж вогнестійкості – 15 хв. Це наводить на висновок, що сфера застосування сталевих конструкцій обмежена за вогнестійкістю, оскільки не виконується умова безпеки – $R_f \geq R_u$ [2, 3], де R_f, R_u – відповідно фактичний і нормований для відповідної конструкції клас вогнестійкості за ознакою втрати несучої здатності.

Ця умова безпеки є основним критерієм обґрунтування необхідності вогнезахисту сталевих конструкцій, тобто якщо $R_f \geq R_u$ – то вогнезахист не потрібний, а при $R_f < R_u$ – потрібний.

Невирішена раніше частина загальної проблеми. У ДСТУ-Н Б В.2.6-211:2016 [4] наведено настанови щодо розрахунку та прийняття заходів для забезпечення вогнестійкості проєктованих конструкцій, але не наведено вимог щодо визначення технічного стану експлуатованих сталевих конструкцій будівель та споруд і необхідності його регулювання після впливу високих температур пожежі.

Постановка завдання. Метою цієї роботи є розробка заходів щодо забезпечення вогнестійкості сталевих конструкцій будівель та споруд при дії силових і високотемпературних впливів, визначення технічного стану та можливості продовження терміну експлуатації або необхідності регулювання технічного стану шляхом ремонту, підсилення або заміни конструкцій.

Виклад основного матеріалу. Згідно з ДСТУ-Н Б В.2.6-211:2016 [4], розрахунок будівельних конструкцій на вогнестійкість (окремої конструкції, частини конструктивної системи або конструктивної системи в цілому) враховує такі етапи:

- вибір проектних сценаріїв пожежі;
- визначення відповідних температурних режимів пожежі;
- розрахунок підвищення температури в будівельних конструкціях;
- розрахунок механічної роботи будівельних конструкцій в умовах пожежі.

Розрахунок будівельних конструкцій на вогнестійкість включає прикладання впливів для теплового аналізу та впливів для механічного аналізу.

Навантаження і впливи на будівлі та споруди внаслідок пожежі класифікують як випадкові (аварійні).

Для визначення аварійної проектної ситуації на основі оцінки пожежного ризику визначені відповідні проектні сценарії пожежі та температурні режими, що пов'язані з ними.

Для конструкцій з особливим ризиком виникнення пожежі внаслідок інших аварійних впливів, цей ризик розглядають при визначенні загальної концепції безпеки.

Перевірку вогнестійкості виконують в інтервалі часу, згідно з вимогами п. 5.5.2 ДСТУ-Н Б В.2.6-211:2016 [4]:

$$t_{fi,d} \geq t_{fi,requ}, \quad (1)$$

або в інтервалі міцності:

$$R_{fi,d,t} \geq E_{fi,d,t}, \quad (2)$$

або в інтервалі температури:

$$\Theta_d \geq \Theta_{cr,d}, \quad (3)$$

де $t_{fi,d}$ – розрахункове значення межі вогнестійкості, хв; $t_{fi,requ}$ – нормована межа вогнестійкості, хв; $R_{fi,d,t}$ – розрахункове значення несучої здатності окремої конструкції під час пожежі в момент часу t , кН; $E_{fi,d,t}$ – розрахункове значення навантажувального ефекту під час пожежі в момент часу t , кН; Θ_d – розрахункове значення температури матеріалу, °С; $\Theta_{cr,d}$ – розрахункове значення критичної температури матеріалу, °С.

Теплові впливи для теплотехнічного розрахунку визначаються у відповідності з вимогами підрозділу 5.6 ДСТУ-Н Б В.2.6-211:2016 [4].

Для кожного проектного сценарію пожежі температурний режим пожежі у протипожежному відсіку оцінюють таким чином. На обігріваних поверхнях цей тепловий потік \dot{h}_{net} визначений, враховуючи конвективну $\dot{h}_{net,c}$ (Вт/м²) та радіаційну $h_{net,r}$ (Вт/м²) його складові, згідно з п. 5.6.1.2 ДСТУ-Н Б В.2.6-211:2016 [4]:

$$\dot{h}_{net} = \dot{h}_{net,c} + h_{net,r}. \quad (4)$$

Конвективну складову теплового потоку визначають за формулою:

$$\dot{h}_{net,c} = \alpha_c \cdot (\Theta_g - \Theta_m), \quad (5)$$

де: α_c – коефіцієнт тепловіддачі конвекцією, Вт/(м² К); Θ_g – температура газового середовища біля конструкції, що зазнає вогневого впливу, °С; Θ_m – температура поверхні конструкції, °С.

Коефіцієнти, які входять до формул (1), (2), (3), (4), (5) визначаються за методикою і формулами, які наведено в підрозділі 5.6 ДСТУ-Н Б В.2.6-211:2016 [4].

Температурний режим пожежі стосується тільки одного протипожежного відсіку будинку, якщо інше не вказано у проектному сценарії пожежі.

Конструкції, для яких встановлені вимоги щодо їх нормативної вогнестійкості, можна розглядати за стандартним температурним режимом, якщо в нормативних документах не вказано інше [3, 4, 5, 6].

Для теплотехнічного розрахунку окремої конструкції враховують розташування проектної пожежі відносно цієї конструкції.

Для зовнішніх конструкцій враховують вогневий вплив крізь прорізи у фасаді та даху.

Для зовнішніх огорожувальних стін враховують вогневий вплив зсередини (з відповідного протипожежного відсіку) і, як альтернативу, ззовні (з іншого протипожежного відсіку), якщо це необхідно.

Залежно від вибору температурного режиму використовують такі підходи [1, 2]:

– для номінального температурного режиму теплотехнічний розрахунок конструкцій виконують для визначеного проміжку часу, не враховуючи фазу затухання. Цей проміжок часу або відповідає нормованій межі вогнестійкості конструкції, наведеній в нормативних документах, або може бути розраховано за додатком Е;

– для моделі реальної пожежі теплотехнічний розрахунок конструкцій виконується для повної тривалості пожежі, враховуючи фазу затухання.

Граничним станом за ознакою втрати несучої здатності для сталевих конструкцій, які випробовуються під навантаженням, є обвалення зразка або виникнення граничних значень температур для арматури і сталі сталевих колон із вогнезахисним облицюванням. При цьому, за температуру, при якій арматура (сталь конструкцій) не може виконувати свої функції, приймають температуру 500 °С [1, 2].

Для колон, які випробовуються без навантаження, час досягнення граничного стану за ознакою втрати несучої здатності визначають за даними вимірювань температури по товщині зразка розрахунковим методом, який має відповідати вимогам ДБН В.1.1-7-2016 [6].

Розрахунок будівельних конструкцій на вогнестійкість включає прикладання впливів для теплового аналізу та впливів для механічного аналізу.

Все, що було наведено вище, стосувалось проектування нових конструкцій. Для конструкцій, які зазнали пошкоджень внаслідок пожежі, необхідно провести обстеження з метою визначення технічного стану та обґрунтувати можливість подальшої експлуатації за умови їх ремонту, підсилення або заміни.

Для проведення обстеження конструкцій, які були пошкоджені внаслідок пожежі, необхідно встановити наступні відомості про пожежу [1, 2]:

- час виявлення пожежі, початку інтенсивного горіння;
- тривалість інтенсивного горіння під час пожежі;
- засоби гасіння пожежі;
- місце знаходження осередку займання;
- максимальну температуру середовища під час пожежі.

Детальне обстеження сталевих конструкцій необхідно провести в такій послідовності:

- вивчити наявну документацію про конструкції і будівлю в цілому;
- ознайомитись з пошкодженням пожежею об'єктом;
- розробити методику проведення обстежень;
- обмежити доступ сторонніх осіб у зону про ведення робіт;
- конструкції, які перебувають в аварійному стані (можуть бути обвалені під час проведення робіт з обстеження), необхідно тимчасово розкріпити або підсилити;
- виконати візуальне та інструментальне обстеження конструкцій, які залишились в проектному положенні, з метою з'ясування їхнього технічного стану після пожежі;
- виконати візуальне обстеження конструкцій, які найбільш постраждали від високо-температурного впливу під час пожежі;
- виконати необхідні розрахунки, підготувати висновок про технічний стан сталевих конструкцій і можливість подальшої експлуатації будівлі;
- розробити проект підсилення конструкцій.

Оскільки розвиток пожежі призводить до нерівномірного нагрівання та руйнування конструкцій, стінового огороження, складованих матеріалів, обладнання, необхідно визначити характеристики матеріалів конструкцій шляхом лабораторних випробувань зразків, які вилучено з елементів (які піддано впливу високих температур), а також їхній деформований стан шляхом проведення обмірювальних робіт із залученням сучасних приладів та обладнання.

Розрахунки конструкцій необхідно проводити з урахуванням встановленого (за результатами обстеження) деформованого стану та фізико-механічних характеристик матеріалів елементів конструкцій.

Відповідно до вимог чинних нормативних документів [3, 4, 5, 6, 7] елемент (конструкція) вважається працездатним, а їх технічний стан нормальним або задовільним, якщо не виконуються [1]:

- умова відмови конструкцій (досягнення граничних станів першої групи)
$$F \geq F_u, \quad (1)$$

- умова досягнення конструкцією граничних станів другої групи
$$f \geq f_u, \quad (2)$$

З огляду на те, що в усіх конструкціях відбуваються зміни в часі, деякі (чи усі) компоненти нерівностей, приведені вище, є функціями часу. Кожну з нерівностей (1), (2) можна перетворити до виду [1]:

$$\Phi_u[x_1(t), x_2(t), \dots, x_m(t), y_1, y_2, \dots, y_n] < \Phi(t), \quad (3)$$

де $\Phi_u[x_1(t), x_2(t), \dots, x_m(t), y_1, y_2, \dots, y_n]$ – функція несучої здатності (деформативності) елементів (конструкцій), яка встановлюється згідно з рекомендаціями нормативних документів з урахуванням зміни параметрів в часі; $\Phi(t)$ – чинне максимальне зусилля (деформація) в елементі (конструкції).

Вид функціональної залежності можна визначити після алгебраїчних перетворень алгебри нерівностей виду (3) з включенням до складу аргументів усіх величин, залежних від часу, якщо це представляється можливим.

Сучасний розвиток технологій відновлення дає змогу виконувати роботи з підсилення будівельних конструкцій із різним ступенем пошкодження.

Розробка математичного апарату з визначення залишкової несучої здатності будівельних конструкцій, що зазнали протягом певного часу дії силових або інших чинників впливу високого рівня, потребує використання такої моделі деформування матеріалів (бетону і сталі), яка б включала всі етапи його роботи від початку навантаження до повного руйнування.

Таким чином, для розроблення методики визначення технічного стану конструкцій будівель після силових і високотемпературних впливів з метою доповнення положень чинних нормативних документів необхідно вирішити такі задачі [1, 3, 4, 5, 6, 7]:

- узагальнити результати досліджень в області визначення напружено-деформованого стану сталевих конструкцій будівель та споруд після силових і температурних впливів;
- розробити комплекс взаємозв'язаних заходів щодо визначення параметрів напружено-деформованого та технічного стану;
- встановити величини параметрів та критерії технічного стану, які були б придатні для розрахунків напружено-деформованого стану сталевих конструкцій, будинків та споруд в цілому;
- розробити розрахункові моделі та методи розрахунку напружено-деформованого стану, який виникає після пожежі;
- розробити методи оцінки технічного стану та можливості його регулювання для подальшої експлуатації конструкцій будівель та споруд шляхом ремонту, підсилення або заміни.

Висновки. За результатами проведених досліджень зроблено такі висновки.

1. У ДСТУ-Н Б В.2.6-211:2016 [4] наведено настанови щодо розрахунку та прийняття заходів для забезпечення вогнестійкості конструкцій, але не наведено вимог щодо визначення технічного стану сталевих конструкцій будівель та споруд і необхідності його регулювання після впливу високих температур при пожежі.

2. Для сталевих конструкцій розробити методи визначення параметрів вогнезахисних заходів для забезпечення тривалої та надійної експлуатації, а також комплекс взаємозв'язаних заходів щодо визначення параметрів напружено-деформованого технічного стану після силових і температурних впливів.

3. У зв'язку з вищевикладеним необхідно розробити методи оцінки технічного стану та можливості його регулювання для подальшої експлуатації конструкцій будівель та споруд після силових і високотемпературних впливів шляхом ремонту, підсилення або заміни.

Список літератури:

1. Маладика І. Г. Визначення технічного стану будівель зі сталевим каркасом після силових та високотемпературних впливів / І. Г. Маладика, І. М. Шкарабура // Збірник наукових праць Українського інституту сталевих конструкцій імені В.М. Шимановського. – К.: Видавництво «Сталь», 2016. – №17. – С. 15–26.

2. Мосалков І. Л. Огнестойкость строительных конструкций / І. Л. Мосалков, Г. Ф. Плюснина, А. Ю. Фролов. – М.: Спецтехника, 2001. – 484 с.

3. ДСТУ Б В.1.1-4-98*. Будівельні конструкції. Методи випробувань на вогнестійкість. Загальні вимоги. – Уведено вперше. – К.: Держбуд України, 2005. – 19 с.

4. ДСТУ-Н Б В.2.6-211:2016. Пректування сталевих конструкцій. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість. – Прийнято та надано чинності: наказ Мінрегіону України від 14.06.2016 року № 155. Набрання чинності з 01.04.2017 р. – К.: Мінрегіон України, 2016. – 147 с.

5. ДБН В.1.2-2:2006. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування / Мінбуд України. – К.: Мінбуд України, 2006. – 60 с.

6. ДБН В.1.1-7-2016. Захист від пожежі. Пожежна безпека об'єктів будівництва / Держбуд України. – К.: Держбуд України, 2017. – 35 с.

7. ДБН В.2.6-198:2014. Державні будівельні норми України. Сталеві конструкції. Норми проектування / Мінрегіон України. – К.: Мінрегіон України, 2014. – 199 с.

References:

1. Maladyka I. H. Vyznachennya tekhnichnoho stanu budivel' zi stalevym karkasom pislya sylovykh ta vysokotemperaturnykh vplyviv / I. H. Maladyka, I. M. Shkarabura // Zbirnyk naukovykh prats' Ukrayins'koho instytutu stalevykh konstruktsiy imeni V.M. Shymanovs'koho. – K.: Vydavnytstvo «Stal'», 2016. – №17. – S. 15–26.

2. Mosalkov Y. L. Ohnestoykost' stroytel'nykh konstruktsiy / Y.L. Mosalkov, H.F.Plyusnyina, A.Yu.Frolov. – M.: Spetstekhnyka, 2001. – 484 s.

3. DSTU B V.1.1-4-98*. Budiveln'i konstruktsiyi. Metody vyprobuvan' na vohnestiykist'. Zahal'ni vymohy. – Uvedeno vpershe. – K.: Derzhbud Ukrayiny, 2005. – 19 s.

4. DSTU-N B V.2.6-211:2016. Prektuvannya stalevykh konstruktsiy. Rozrakhunok konstruktsiy na vohnestiykist'. – Prynyato ta nadano chynnosti: nakaz Minrehionu Ukrayiny vid 14.06.2016 roku № 155. Nabrannya chynnosti z 01.04.2017 r. – K.: Minrehion Ukrayiny, 2016. – 147 s.

5. DBN V.1.2-2:2006. Systema zabezpechennya nadiynosti ta bezpeky budivel'nykh ob'yektiv. Navantazhennya i vplyvy. Normy proektuvannya / Minbud Ukrayiny. – K.: Minbud Ukrayiny, 2006. – 60 s.

6. DBN V.1.1-7-2016. Zakhyst vid pozhezhi. Pozhezha bezpeka ob'yektiv budivnytstva / Derzhbud Ukrayiny. – K.: Derzhbud Ukrayiny, 2017. – 35 s.

7. DBN V.2.6-198:2014. Derzhavni budiveln'i normy Ukrayiny. Stalevi konstruktsiyi. Normy proektuvannya / Minrehion Ukrayiny. – K.: Minrehion Ukrayiny, 2014. – 199 s.

