

С.О. Вамболь, д.т.н., професор, зав. каф., НУЦЗУ,
В.Ю. Колосков, к.т.н., доцент, НУЦЗУ

МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ПЛАСТИЧНИХ ДЕФОРМАЦІЙ У НЕСУЧИХ КОНСТРУКЦІЯХ БУДІВЕЛЬ НА ЇХ ВОГНЕСТІЙКІСТЬ ПІД ЧАС ПОЖЕЖІ

(представлено д.т.н. Поздєєвим С.В.)

Досліджено вплив наявності пластичних деформацій у перенавантаженому елементі несучої конструкції будівлі на його вогнестійкість. Побудовано вдосконалену математичну модель міцності елемента несучої конструкції з урахуванням наявності пружнопластичного деформування при комплексному термічно-силовому навантаженні, що змінюється в часі. Розроблено новий критерій оцінювання рівня безпеки при імітаційному моделюванні системи забезпечення безпеки під час пожежі за умови пластичних деформацій елементів несучих конструкцій.

Ключові слова: міцність, термічно-силове навантаження, імітаційна модель, критерій оцінювання, пружнопластичне деформування.

Постановка проблеми. Одним з граничних станів, що використовуються при визначенні меж вогнестійкості, є втрата конструкцією будівлі несучої здатності. Згідно з ДБН В.1.1-7-2002 [1] експериментальним шляхом показники вогнестійкості визначаються за стандартного температурного режиму. У динаміці розвитку пожежі із застосуванням засобів пожежогасіння аналітичні залежності від часу значення температури елементів конструкції, а також силових впливів на них є складними для визначення, а результат їх дії залежить від умов прогріву та змінюється у часі в залежності від багатьох факторів. У зв'язку з вищезазначеним постає проблема прогнозування умов руйнування елементів конструкції під дією факторів пожежі. Для подолання труднощів при визначенні умов руйнування, а також розробці засобів збереження несучої здатності конструкції будівель та споруд під час пожежі протягом тривалого часу актуальним є використання методів імітаційного моделювання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В державних стандартах України, впроваджених згідно з ДБН А.1.1-94:2010 [2] за програмою імплементації системи стандартів Єврокод та присвячених, зокрема, питанням розрахунків конструкцій на вогнестійкість, представлені математичні моделі залежності від температури властивостей будівельних матеріалів, що мають використовуватися при проектуванні будівель та споруд. Точність наведених моделей є цілком достатньою, однак вони визначені для температурних режимів, аналогічних стандартному, а отже не можуть бути застосовані при більш складних залежностях температури від часу без суттєвого уточнення.

У роботах багатьох авторів [3-9] представлені різні підходи до створення уточнених методів визначення вогнестійкості матеріалів несучої

чих конструкцій, однак питанням аналізу міцності у динаміці сприйняття зовнішнього термічно-силового впливу приділяється недостатньо уваги. Зокрема, у [5] представлений експериментально-розрахунковий метод, який є уточненим відносно методу, представленого у стандартах Єврокод, але він також не бере до уваги зміни навантаження на елемент конструкції під час самої пожежі.

Загальний підхід до створення моделей, що використовувалися у дослідженнях, викладено у роботі [10]. Що стосується застосування даного підходу для окремих випадків у вирішенні проблем забезпечення безпеки як загального плану, так і конкретних задач, ці результати викладено у роботах автора [11-15], зокрема у роботах [14, 15] сформовано імітаційну модель системи управління безпекою під час пожежі та запропоновано критерії оцінювання рівня безпеки за міцністю несучої конструкції за умови відповідно рівномірного та нерівномірного нагрівання її елементів за довжиною та збереження пружного характеру деформацій в них.

Згідно ДСТУ Б В.1.1-4-98 [16] навантаження при випробуванні зразків на вогнестійкість встановлюються з урахуванням лише сталих та тимчасових тривалих напружень. Відомі та широкоживані методи розрахунку критичних температур та меж вогнестійкості елементів конструкцій, що використовують такий підхід [7, 9]. Натомість у [15] було показано, що тимчасові навантаження внаслідок температурних деформацій елементів конструкцій, а також ваги вогнегасильної суміші можуть за деяких умов суттєво їх перевищувати, а отже визначені за пропонованими методиками критичні температури нагрівання виявляються завищеними, та такими, що мають бути скореговані з урахуванням всіх умов перебігу пожежі та використовуваних засобів пожежогасіння.

За результатами моделювання міцності балки перекриття у роботі [15] за умови забезпечення збереження пружного характеру деформації критичні температури для різних марок сталей знаходилися у діапазоні значень 80...90°C. У роботах деяких авторів, присвячених дослідженню проблеми вогнестійкості будівельних конструкцій є посилання на набагато більші значення критичної температури, отримані в експериментах за нормативного експлуатаційного навантаження, наприклад для сталей різних марок у [9] наведені значення у діапазоні 470...550°C. Однією з причин значної відмінності у отриманих даних може бути недостатня увага до резерву міцності, який заключений у можливості непружного деформування елементів несучої конструкції.

Постановка завдання та його вирішення. Метою представленої роботи є дослідження впливу наявності пластичних деформацій у перенавантаженому елементі на збільшення межі його вогнестійкості. Для досягнення поставленої мети поставлені та вирішені наступні задачі:

– побудувати математичну модель міцності елементу несучої конструкції з урахуванням наявності пружнопластичного деформування при комплексному термічно-силовому навантаженні, що змінюється в часі;

– розробити критерій оцінювання рівня безпеки при імітаційному моделюванні системи забезпечення безпеки під час пожежі за умови пла-

стичних деформацій елементів конструкції.

Під час пожежі за умови застосування засобів пожежогасіння у елементах несучої конструкції виникає складний напружено-деформований стан, який визначається комбінацією стискання у продольному напрямку внаслідок температурних деформацій та згинання у поперечному напрямку внаслідок навантаження від розташованих у приміщеннях об'єктів та залишків поданої до зони горіння вогнегасільної суміші. З використанням принципу суперпозиції діючих сил можна визначити залежності для значень внутрішніх силових факторів у деякий момент часу t :

– продольне зусилля стискання N_z

$$N_z(t) = \sigma_T(t) \cdot A = \varepsilon_K(t) \cdot E(T_K(t)) \cdot A, \quad (1)$$

де σ_T – значення нормального напруження продольного стискання внаслідок нагрівання елемента; A – площа поперечного перерізу; $T_K(t)$ – значення температури елемента у досліджуваному перерізі у момент часу t від початку пожежі; E – модуль пружності матеріалу; ε_K – відносна лінійна деформація елемента конструкції, яка у загальному випадку може бути представлена деякою функцією від значення відносно лінійної деформації розширення матеріалу ε_T

$$\varepsilon_K(t) = \Psi(\varepsilon_T(T_K(t))), \quad (2)$$

вигляд якої визначається розрахунковою схемою несучої конструкції в цілому та схемою закріплення елемента зокрема, наприклад, у випадку балки, жорстко защевленої з обох кінців отримуємо

$$\varepsilon_K(t) = \varepsilon_T(T_K(t)); \quad (3)$$

– згинальний момент M_x

$$M_x(t) = (\sigma_0(t) + \sigma_M(t)) \cdot W_x, \quad (4)$$

де σ_0 – значення нормальних напружень за рахунок навантаження від розташованих у приміщенні об'єктів та самого перекриття; σ_M – значення нормальних напружень за рахунок навантаження залишками вогнегасільної суміші; W_x – осьовий момент опору перерізу;

– поперечна сила Q_y

$$Q_y(t) = (\tau_0(t) + \tau_M(t)) \cdot A, \quad (5)$$

де τ_0 – значення дотичних напружень за рахунок навантаження від розташованих у приміщенні об'єктів та самого перекриття; τ_M – значення дотичних напружень за рахунок навантаження залишками вогнегасільної суміші.

У випадку пружного вигину за небезпечний приймається такий стан, коли нормальні напруження у крайніх точках перерізу балки досягають межі пропорційності, чим вичерпується можливість пружного деформування. Однак, при цьому миттєве руйнування елементу не відбувається. Натомість у відповідному перерізі з'являється зона пластичної деформації, що буде розповсюджуватися за подальшого зростання навантаження. Прийmemo, що виконується гіпотеза про незмінність контуру поперечного перерізу елементу, він навантажений за нейтральною віссю, а розміри зони пластичного деформування малі. Тоді у поперечному перерізі мають і надалі виконуватися умови рівноваги

$$\begin{cases} N_z = \int_A \sigma \cdot dA; \\ M_x = \int_A \sigma \cdot y \cdot dA; \\ Q_y = \int_A \tau \cdot dA, \end{cases} \quad (6)$$

де σ – значення нормального напруження на відповідному малому елементі dA перерізу; N_z , M_x та Q_y – значення внутрішніх силових факторів, розраховані за залежностями теорії опору матеріалів.

За подальшого зростання температури зусилля продольного стискання продовжить збільшуватися. Водночас у навантаженому перерізі будуть зменшуватися значення межі пропорційності $\sigma_{\text{пц}}$ та текучості $\sigma_{\text{тек}}$ (рис. 1), що призведе до прискорення перерозподілу напружень за перерізом.

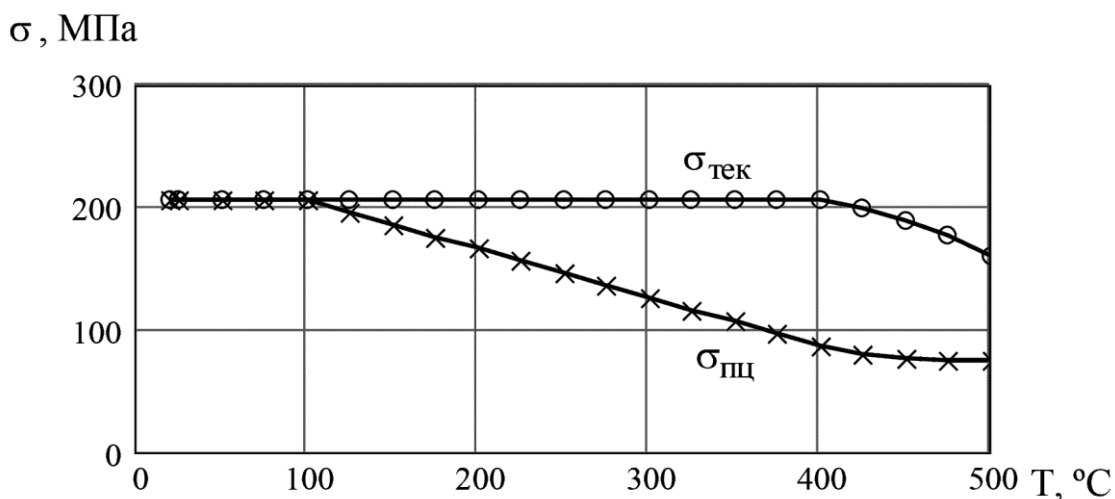


Рис. 1. Залежності межі пропорційності $\sigma_{\text{пц}}$ та текучості $\sigma_{\text{тек}}$ від температури для вуглецевої сталі згідно [18]

Це призведе до появи зони пластичних деформацій у стиснутих волокнах перерізу, а потім відповідної зони у розтягнутих волокнах, які мають зустрітися на деякій межі, утворюючи пластичний шарнір [17]. У

момент утворення у перенавантаженому перерізі пластичного шарніру значення напружень у всьому перерізі досягнуть межі текучості. Приклад вигляду епюр нормальних напружень для симетричного монометалевого двотаврового перерізу, отримуваний при цьому, показано на рис. 2.

З урахуванням усього вищезгаданого вирішення задачі визначення часу $t_{руйн}$ руйнування елемента конструкції можна отримати у вигляді системи рівнянь

$$\begin{cases} N_z(t_{руйн}) = \sigma_{тек} (T_k(t_{руйн})) \cdot (A_{ст} - A_p); \\ M_x(t_{руйн}) = \sigma_{тек} (T_k(t_{руйн})) (S_{ст} + S_p), \end{cases} \quad (7)$$

де $A_{ст}$ та A_p – площі стиснутої та розтягнутої зон пластичної деформації; $S_{ст}$ та S_p – статичні моменти опору відповідних зон відносно нейтральної осі перерізу.

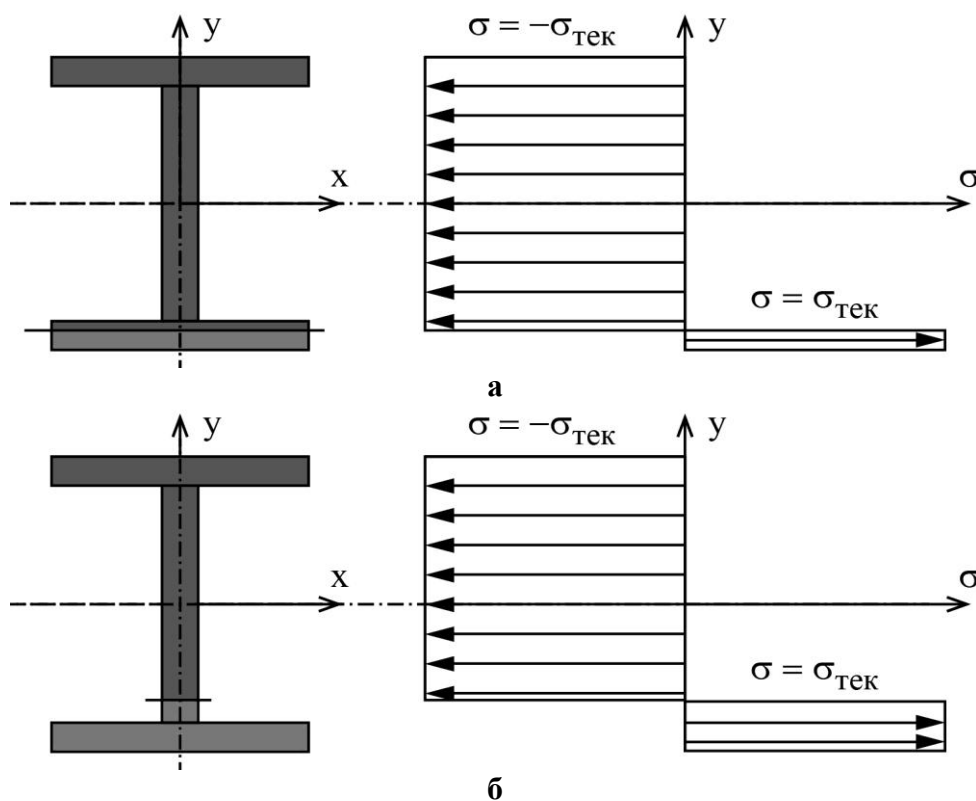


Рис. 2. Епюри нормальних напружень у симетричному монометалевому двотавровому перерізі при утворенні пластичного шарніру: а – межа зон пластичних деформацій у полці перерізу; б – межа зон пластичних деформацій у стіні перерізу

За умови симетричності перерізу

$$A_{ст} = A - A_p; \quad (8)$$

$$S_{ст} = S_p, \quad (9)$$

звідки отримуємо умови збереження несучої здатності у вигляді:

$$\begin{cases} N_z(t_{\text{пруйн}}) \leq \sigma_{\text{тек}}(T_k(t_{\text{пруйн}})) \cdot (A - 2 \cdot A_p); \\ M_x(t_{\text{пруйн}}) \leq \sigma_{\text{тек}}(T_k(t_{\text{пруйн}})) \cdot 2 \cdot S_p; \\ Q_y(t_{\text{пруйн}}) \leq \tau_B(T_k(t_{\text{пруйн}})) \cdot A. \end{cases} \quad (10)$$

Перша з отриманих умов дає змогу визначити розмір зони пластичного розтягнення, якого необхідно досягти для утворення пластичного шарніру. З урахуванням (1) маємо

$$\varepsilon_k(T_k(t_{\text{пруйн}})) \cdot E(T_k(t_{\text{пруйн}})) \cdot A = \sigma_{\text{тек}}(T_k(t_{\text{пруйн}})) \cdot (A - 2 \cdot A_p), \quad (11)$$

звідки площа зони пластичного розтягування дорівнюватиме

$$A_p = \frac{\sigma_{\text{тек}}(T_k(t_{\text{пруйн}})) - \varepsilon_k(T_k(t_{\text{пруйн}})) \cdot E(T_k(t_{\text{пруйн}}))}{2 \cdot \sigma_{\text{тек}}(T_k(t_{\text{пруйн}}))} \cdot A. \quad (12)$$

Визначивши з геометричних міркувань за розрахованого значення A_p величину відстані h_s від нейтральної осі перерізу до межі зон пластичних деформацій, з урахуванням (4) отримуємо можливість обрахувати значення S_p та перевірити виконання умов

$$(\sigma_0(t_{\text{пруйн}}) + \sigma_M(t_{\text{пруйн}})) \cdot W_x \leq \sigma_{\text{тек}}(T_k(t_{\text{пруйн}})) \cdot 2 \cdot S_p; \quad (13)$$

$$(\tau_0(t_{\text{пруйн}}) + \tau_M(t_{\text{пруйн}})) \cdot A \leq \tau_B(T_k(t_{\text{пруйн}})) \cdot A. \quad (14)$$

Аналіз отриманих результатів дозволив створити критерій оцінювання рівня безпеки за вимогою збереження несучої здатності елемента конструкції з урахуванням наявності пружнопластичного деформування під дією факторів пожежі, який можна представити у наступному формалізованому вигляді

$$\begin{cases} \frac{\varepsilon_k(T_k(t)) \cdot E(T_k(t))}{\sigma_{\text{тек}}(T_k(t))} \leq 1; \\ \frac{(\sigma_0(t) + \sigma_M(t)) \cdot \frac{W_x}{2 \cdot S_p(A_p)}}{\sigma_{\text{тек}}(T_k(t))} \leq 1; \\ \frac{(\tau_0(t) + \tau_M(t))}{\tau_B(T_k(t))} \leq 1, \end{cases} \quad (15)$$

де $S_p(A_p)$ – залежність між значенням статичного моменту зони пластичного розтягування відносно нейтральної осі перерізу та площиною відповідної зони, яку встановлюють з геометричних міркувань. Наприклад, для симетричного двотаврового перерізу, позначивши геометричні параметри наступним чином: h – висота профілю; b – ширина полки; d – товщина полки; d_w – товщина стінки; h_s – відстань від нейтральної осі перерізу до межі зон пластичних деформацій, з геометричних міркувань можна вирахувати значення h_s та S_p за такими формулами:

– при $A_p < b \cdot d$ (межа знаходиться у полці перерізу, рис. 2, а)

$$h_s = \frac{h}{2} - \frac{A_p}{b}; \quad (16)$$

$$S_p = \int_{h_s}^{h/2} y \cdot b \cdot dy = \frac{b \cdot (h^2 - 4 \cdot h_s^2)}{8}; \quad (17)$$

– при $A_p \geq b \cdot d$ (межа знаходиться у стінці перерізу, рис. 2, б)

$$h_s = \frac{h}{2} - d - \frac{(A_p - b \cdot d)}{d_w}; \quad (18)$$

$$S_p = \int_{h_s}^{\frac{h}{2}-d} y \cdot d_w \cdot dy + \int_{\frac{h}{2}-d}^{\frac{h}{2}} y \cdot b \cdot dy = \frac{d \cdot b \cdot (h - d)}{2} + \frac{d_w (h - 2d)^2}{32} - \frac{d_w h_s^2}{2}. \quad (19)$$

Висновки. Запропонований критерій визначення рівня безпеки може бути використаний для визначення меж вогнестійкості несучих конструкцій будівель та споруд під час пожеж, що виникають в них, а також при визначення параметрів режимів функціонування систем та засобів, що використовуватимуться для їх ліквідації. Моделюючи залежності, визначені для міцності елемента несучої конструкції, відповідають вимогам, що висуваються до математичних моделей вогнестійкості конструкцій за ДБН В.1.1.7-2002 [1]. Для підвищення точності оцінювання результатів моделювання необхідно створити моделюючі залежності теплообміну у динаміці перебігу пожежі, який відбувається між навколишнім середовищем та елементами конструкції.

ЛІТЕРАТУРА

1. ДБН В.1.1.7–2002. Пожежна безпека об'єктів будівництва. – К.: Держбуд України, 2003. – 33 с.

2. ДБН А.1.1-94:2010. Проектування будівельних конструкцій за Єврокодами. Основні положення. – К.: Мінрегіонбуд України, 2012. – 22 с.

3. Васильченко А.В. Оценка предела огнестойкости изгибаемых железобетонных элементов, усиленных фиброматериалами / А.В. Васильченко, Н.Б. Золочевский, И.М. Хмыров // Проблемы пожарной безопасности: Сб. науч. тр. – Вып. 33. – Х.: НУГЗУ, 2013. – С. 27-32. – Режим доступа до журн.: <http://nuczu.edu.ua/sciencearchive/ProblemsOfFireSafety/vol33/vasilchenko.pdf>.

4. Гуліда Е.М. Вогнестійкість залізобетонних плит перекриття житлових та адміністративних будівель / Е.М. Гуліда, А.А. Ренкас // Проблемы пожарной безопасности: Сб. науч. тр. – Вып. 32. – Х.: НУГЗУ, 2012. – С. 62-73. – Режим доступа до журн.: <http://nuczu.edu.ua/sciencearchive/ProblemsOfFireSafety/vol32/gulida.pdf>.

5. Поздеев С.В. Верификация результатов уточненного расчетного метода определения пределов огнестойкости железобетонных конструкций / С.В. Поздеев // Проблемы пожарной безопасности: Сб. науч. тр. – Вып. 29. – Х.: НУГЗУ, 2011. – С. 141-148. – Режим доступа до журн.: <http://nuczu.edu.ua/sciencearchive/ProblemsOfFireSafety/vol29>.

6. Белов В.В. Огнестойкость железобетонных конструкций: модели и методы расчета / В.В. Белов, К.В. Семенов, И.А. Ренев // Инженерно-строительный журнал. – 2010. – № 6. – С. 58-61.

7. Мосалков И.Л. Огнестойкость строительных конструкций / И.Л. Мосалков, Г.Ф. Плюснина, А.Ю. Фролов. – М.: ЗАО «СПЕЦТЕХНИКА», 2001. – 496 с.

8. Яковлев А.И. Расчет огнестойкости строительных конструкций / А.И. Яковлев. – М.: Стройиздат, 1988. – 143 с.

9. Ройтман В.М. Инженерные решения по оценке огнестойкости / В.М. Ройтман. – М.: Ассоциация «Пожарная безопасность и наука», 2001. – 382 с.

10. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем – искусство и наука / Р. Шеннон. – М.: Мир, 1978. – 418 с.

11. Колосков В.Ю. Метод прогнозування адаптації оператора до дії шкідливих факторів машинобудівного виробництва: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.01 / В.Ю. Колосков. – Х., 2007. – 178 с.

12. Колосков В.Ю. Имитационная модель системы жизнеобеспечения аэрокосмического производства / В.Ю. Колосков // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: Сб. науч. тр. – Вып. 18. – Х.: Нац. аэрокосмич. ун-т, 2003. – С. 87-93.

13. Колосков В.Ю. Критерий оценки безопасности влияния производственных факторов на человека / В.Ю. Колосков // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 46(3). – Х.: Нац. аэрокосмич. ун-т, 2006. – С. 71-77.

14. Колосков В.Ю. Моделювання міцності несучих конструкцій

будівель під час пожежі / В.Ю. Колосков // Проблемы пожарной безопасности: Сб. науч. тр. – Вып. 38. – Х.: НУЦЗУ, 2015. – С. 83-90. – Режим доступа до журн.: <http://nuczu.edu.ua/sciencearchive/ProblemsOfFireSafety/vol38/Koloskov.pdf>.

15. Колосков В.Ю. Моделирование прочности несущих конструкций зданий за условий локализованной пожежі / В.Ю. Колосков // Проблемы пожарной безопасности: Сб. науч. тр. – Вып. 39. – Х.: НУЦЗУ, 2016. – С. 142-151. – Режим доступа до журн.: <http://nuczu.edu.ua/sciencearchive/ProblemsOfFireSafety/vol39/Koloskov.pdf>.

16. ДСТУ Б В.1.1-4-98. Будівельні конструкції. Методи випробування на вогнестійкість. – К.: Держбуд України, 1999. – 19 с.

17. Иванов П.С. Упругопластический расчет и оптимизация моно-стальных и бистальных балок: монография / П.С. Иванов. – Томск : Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2013. – 220 с. – Режим доступа: http://portal.tsuab.ru/Nauch_2013-1/003.pdf.

18. ДСТУ-Н Б EN 1993-1-2:2010. Єврокод 3. Проектування сталевих конструкцій. Частина 1-2. Загальні положення. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість. – К.: Мінрегіонбуд України, 2012. – 98 с.

Отримано редколегією 13.10.2016

С.А. Вамболь, В.Ю. Колосков

Моделирование влияния пластических деформаций в несущих конструкциях зданий на их огнестойкость во время пожара

Исследовано влияние наличия пластических деформаций в перегруженном элементе несущей конструкции здания на его огнестойкость. Построена усовершенствованная математическая модель прочности элемента несущей конструкции с учетом наличия упругопластического деформирования при комплексном термо-силовом нагружении, переменном во времени. Разработан новый критерий оценивания уровня безопасности при имитационном моделировании системы обеспечения безопасности во время пожара при условии пластических деформаций элементов несущих конструкций.

Ключевые слова: прочность, термо-силовое нагружение, имитационная модель, критерий безопасности, упругопластическое деформирование.

S.O. Vambol, V.Yu. Koloskov

Modeling of influence of plastic deformations of carrying constructions of buildings on their fire resistance during the fire

The influence of plastic deformations presence in overloaded element of the building carrying construction on its fire resistance is investigated. The improved mathematical model of strength of carrying construction element taking into account the presence of elastic and plastic deforming under complex time-varying thermal and force loading is built. New criterion of safety level estimation at simulation modeling of safety provision system during the fire on condition of plastic deformations of carrying structures' elements is developed.

Keywords: strength, thermal and force loading, simulation model, safety criterion, elastic and plastic deforming.