

DOI:

10.32347/2522-4182.12.2023.93-104

УДК 624.014+004.9

## АНАЛІЗ ВУЗЛІВ МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ НА ВОГНЕСТІЙКІСТЬ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ СПЕЦІАЛІЗОВАНИХ ПРОГРАМНИХ КОМПЛЕКСІВ 3D МОДЕЛЮВАННЯ

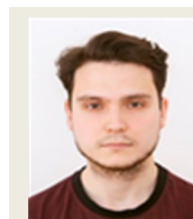
Крістіан ХІЦКОВ<sup>1</sup>, Людмила ЛАВРІНЕНКО<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Київський національний університет будівництва і архітектури  
31, просп. Повітрофлотський, Київ, Україна, 03037

<sup>1</sup> kristianhitskov99@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8787-3282>

<sup>2</sup> ludmila.lavrinenko@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0001-5601-0943>

**Анотація.** В роботі наведено процес проектування, аналіз та практична оцінка вузлових з'єднань балково-стоякового каркасу малоповерхової будівлі в ВІМ-середовищі, проектування на дію активних навантажень та аварійного температурного впливу пожежі. Виконано дослідження застосування засобів та інструментів проектування. Проведення таких досліджень зумовлене необхідністю підвищення надійності роботи каркасу в умовах пожежі та актуалізації вимог нормативних документів Єврокод стосовно вогнестійкості сталевих конструкцій. До уваги береться стандартна пожежа, проведено аналіз параметрів нагріву елементів, що приєднуються у вузлах. Огляд теоретичних основ розрахунку сталевих конструкцій на високотемпературний вплив середовища експлуатації показав доцільність застосування спрощеного методу розрахунку та визначення параметрів нагріву за нормативними даними. Змодельовано стержньову схему каркасу з навантаженнями. Проведено аналіз напружено-деформованого стану (НДС) елементів в аварійній комбінації. Для подальшого розрахунку використане 3D – моделювання вузлів. Концепція ВІМ реалізована шляхом інтеграції ПК Robot Structural Analysis з розрахунковим комплексом Idea-Statica. Встановлено, що зв'язка ПК Robot Structural Analysis з розрахунковим комплексом Idea-Statica є раціональною для конструювання та розрахунків будівель і споруд в 3D просторі та дозволяє використати результати розрахунку на температурний вплив для коригування конструктивного рішення для зменшення його металоміцкості і трудовитрат та раціоналізувати запаси несучої здатності. Представлений процес



**Крістіан Хіцков**

здобувач ступеня вищої освіти  
«магістр» кафедри металевих та  
дерев'яних конструкцій



**Людмила Лавріненко**

доцент кафедри металевих та  
дерев'яних конструкцій,  
к.т.н., доцент

проектування вузлів каркасу узагальнює підходи до розробки ефективних конструктивних форм. Використання інформаційних моделей спростило проектування, оптимізувало робочі процеси, а також дозволило підвищити складність вузлів як на рівні конструктивного рішення, так і на рівні розрахункової моделі з урахуванням нелінійних ефектів температурного впливу.

**Ключові слова.:** 3D-моделювання; металеві конструкції; проектування вузлів; температурний вплив.

### ВСТУП

Відповідно до сучасних принципів проектування, конструктивні рішення сталевих елементів при забезпеченні їх міцності, місцевої стійкості та жорсткості покращуються шляхом вибору більш

© К.ХІЦКОВ, Л.ЛАВРІНЕНКО, 2023

тонкостінних деталей, що призводить до зниження вогнестійких властивостей перерізів.

Розрахунок вузлів завжди був не менш складним процесом, адже реалізація з'єднання таким, що відповідає ідеалізованам параметрам розрахункової схеми – дуже нетривіальна задача, а врахування всіх складових НДС для передачі зусилля без імплементації зайвих запасів міцності, які направлені на компенсацію умовних припущень для спрощення розрахунку, – задача практично нездійсненна в умовах реального проектування. Крім того, ця задача ускладнюється необхідністю врахування роботи в аварійних та нестандартних ситуаціях, в тому числі пов'язаних з пожежами [1-6].

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ ТА АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Розвиток розрахункових методів та проектних інструментів для оцінки вогнестійкості сталевих конструкцій є підґрунтям для прогнозування їх пожежної безпеки, що сприяє більш впевненому їх використанню у сучасному будівництві, зменшуючи його вартість та трудомісткість [7]. Стаття [8] містить декілька окремих міркувань щодо концепції забезпечення пожежної безпеки будівель у майбутньому.

Однією з вимог для сучасного проектування є можливість швидко створювати та редагувати модель споруди. Використання інформаційних моделей дозволяє знизити витрати часу на проектування, оптимізувати робочі процеси, а також суттєво підвищити складність споруди як на рівні структурного аналізу, так і на рівні розрахункової моделі з урахуванням нелінійних ефектів сталевих конструкцій. Як вважають провідні спеціалісти в галузі сталевих будівництва, перспективним кроком в Україні має бути створення інформаційних моделей BIM [9], які містять, в тому числі, опис обов'язкових вимог стосовно забезпечення вогнестійкості.

Фізичні основи вогнестійкості будівель та загальні принципи інженерних оцінок вогнестійкості конструкцій, на підґрунті яких базуються розрахунки вогнестійкості як для випадку стандартної пожежі, так і врахування режимів можливих реальних пожеж,

детально викладені в [10]. В теоретичних роботах вогнестійкість розглядається з двох позицій – термічної та механічної. Для вирішення термічної задачі існує два основних підходи – спрощений і вдосконалений. Спрощений підхід широко застосовується в нормативних джерелах та детально описаний в [11, 12]. При спрощеному підході рекурентні формули використовуються для визначення температури нагріву поперечного перерізу сталевих елементів у кожен момент впливу стандартної температури вогню. Такий підхід був застосовано в роботі [13]. Математична модель для вирішення механічної задачі враховує зміну механічних властивостей сталі при зміні температури. При цьому стан руйнування сталевих елементів прогнозується шляхом порівняння зміни його опору під впливом температури та навантаження. Ця модель застосовується в припущенні рівномірного розподілу температури вздовж поперечного перерізу. У цьому випадку розрахунок елементів на міцність при пожежі виконується за формулами, наведеними в нормах з [3]

Таким чином, при вирішенні механічної задачі розраховується опір при відповідній температурі нагріву при пожежі, що враховується відповідними коефіцієнтами зниження механічних властивостей сталі. Ця процедура використовується на основі рекомендацій стандартів [12]

Для більш складних випадків використовується універсальний теоретичний метод, заснований на використанні диференціального нестационарного рівняння теплопровідності [9], порівняння результатів застосування цих двох методів наводиться, наприклад, в роботі [14]. Розрахунок вогнестійкості за ДБН В.1.1-7:2016 «Пожежна безпека об'єктів будівництва» передбачає при розрахунку конструкцій такі етапи:

- вибір відповідних проектних сценаріїв пожежі;
- визначення відповідних температурних режимів;
- розрахунок підвищення температури в конструкції;
- розрахунок механічної роботи конструктивної системи в умовах пожежі (статичний розрахунок).

Загальні положення і методи розрахунку кодифіковані у відповідних нормах проектування елементів та конструктивних систем.

В практиці проектування застосовуються підходи, що мають посилення на імплементовані в Україні методи розрахунку сталевих конструкцій на вогнестійкість ДСТУ-НБ EN 1993-1-2 «Проектування сталевих конструкцій. Частина 1-2 Розрахунок конструкцій на вогнестійкість» та Єврокод 1 ДСТУ-Н EN 1991-1-2:2010 «Дії на конструкції. Частина 1-2. Дії на конструкції під час пожежі».

Теоретична модель за EN 1993-1-2 розглядає зміни механічних властивостей сталі при зміні температури. Головна мета моделі – передбачити відмову елемента каркасу шляхом порівняння зміни його опору під дією температури та діючого навантаження. Ця модель стосується елемента в умовах рівномірного розподілу температури по перерізу. Основна мета розрахунку полягає в обчисленні опору елементів за температури середовища експлуатації, а потім за допомогою коефіцієнтів редуції за EN 1993-1-2 визначення опору при різних температурах (20°C, 100°C, 200°C ... до 1200°C). Методика та значення коефіцієнтів редуції розроблені для окремих елементів, проілюстровані в [15] і не уточнюються стосовно більш складних конфігурацій. В роботі [21] вказано на необхідність досліджень для точного врахування залежності показників вогнестійкості сталевих елементів від рівня механічного навантаження.

Для виконання оцінки вогнестійкості та проведення обчислювальних експериментів необхідними є такі інструменти та математичні моделі, що реалізують метод скінчених елементів з урахуванням нелінійності поведінки сталі при тепловому впливі вогню [16]. Ситуація покращилась із появою спеціалізованих розрахункових комплексів, які дозволили виконувати 3D-моделювання із застосуванням числових методів обчислень. Це в свою чергу збільшило точність статичного розрахунку, дало змогу раціоналізувати запаси міцності, тобто зменшити вартість виробництва та трудовитрати [17-20].

Однак залишалось відкритим питання розрахунку елементів вузлових з'єднань на температурний вплив. Під час пожежі, зміна механічних характеристик та несучої здатності за умов теплового впливу пожежі.

Ситуація пожежі є аварійним станом для усіх без винятку будівельних конструкцій, проте металеві є найбільш вразливими для вогневого впливу. Що стосується автоматизованого розрахунку конструктивних елементів каркасу за допомогою програмних комплексів, то він був в тій чи іншій мірі успішно реалізований в останні роки, але для ВІМ-середовища доступна та порівняно зручна у використанні можливість перевірити роботу саме з точки зору взаємодії елементів конструкції в зоні вузла на дію несприятливого впливу надмірних температур за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення з'явилась порівняно нещодавно – в кінці 2022 року у вигляді ПК IdeaStatica 22.1.

Оскільки на даний момент у вищезазначеному ПК повною мірою реалізовані перевірки за нормами Єврокод, то проведений аналіз далі наводиться саме відповідно до цих вимог. Завдяки гармонізації національних стандартів ДСТУ та Єврокод, даний розрахунок є актуальним для сучасного проектування та знаходиться в правових межах будівельного законодавства України [12].

У зв'язку з цим сформульована мета дослідження.

**Мета і задачі роботи.** Метою роботи є моделювання та проектування основних вузлів балково-стоякового каркасу на основі встановлення зміни напружено-деформованого стану (НДС) з урахуванням теплового впливу пожежі за допомогою програмного забезпечення, що базується на спрощеному стандартному методі, а також формування вибірки засобів для проектування і проведення аналізу та оцінки глибини інтеграції рішень в ВІМ-технології. Отримані результати дозволять встановити необхідність підсилення чи вогнезахисту вузлових з'єднань каркасу для забезпечення рівноопірності вузлів та елементів стосовно їх несучої спроможності з урахуванням вогнестійкості

**Матеріали та методи дослідження.** Виходячи з умови рівноопірності пожежному впливу основних елементів та вузлів на першому етапі для основних елементів металевого каркасу будівлі в ПК Robot Structural Analysis Professional 2023 було виконано уточнюючий розрахунок на температурний вплив пожежі та проаналізовано результати з метою отримання відповідного НДС, характерного для аварійного стану пожежі. Отримані результати були застосовані для відтворення аварійного НДС в ПК IdeaStatiCa 22.1. Проаналізовані НДС вузлів, виконана перевірка їх роботи в аварійному стані та розглянуті конструктивні рішення про необхідність застосування спеціальних протипожежних засобів для захисту запроектованих конструкцій вузлів або приведення конструктивного рішення до стану достатнього для протидії аварійній ситуації.

**Об'єкт дослідження** – методи і інструменти проектування та коригування вузлів сталевих конструкцій із забезпеченням вогнестійкості відповідно до норм проектування.

## ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ ТА РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Для проведення розрахунку в ПК Robot Structural Analysis була створена спеціальна автоматична комбінація «FIRE», згідно із

нормами Eurocode 0 EN 1990:2002 [6] або ж гармонізованим відповідником - ДСТУ-Н Б EN 1990:2008 Єврокод 0 [5] (рис. 1).

Розглядається сценарій розрахунку за ISO 834, що класифікується як Стандартний температурний режим пожежі, тобто вводиться температурно-часова залежність при якій прийнято, що аварійна ситуація розвивається в протипожежному відсіку без впливу зовнішніх факторів. Сценарій може вважатись таким, що відповідає виникненню пожежі в середині будівлі [12, 22].

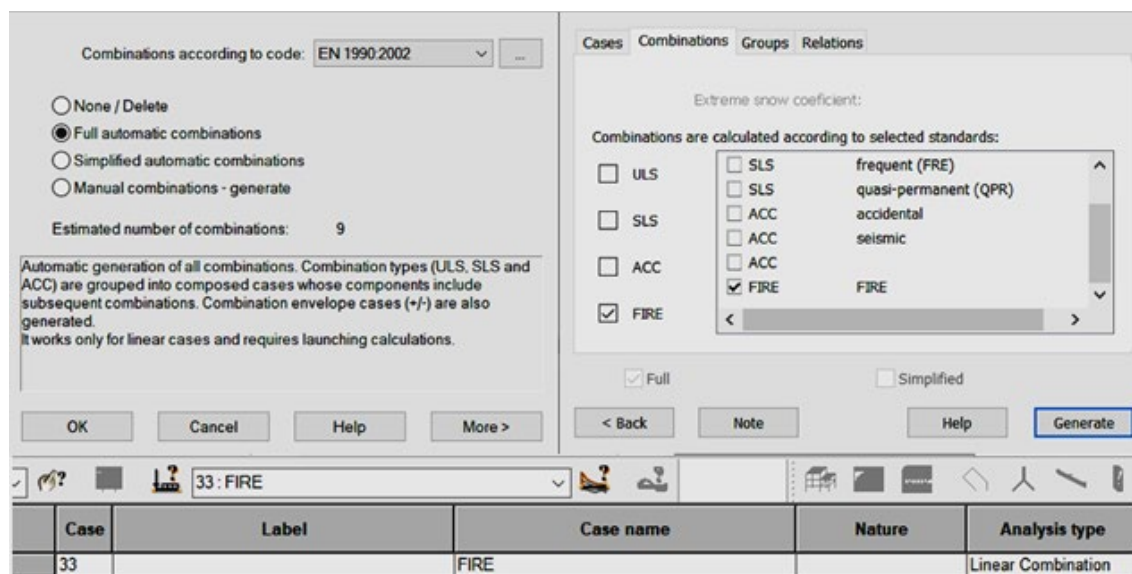
Стандартний температурний режим визначається за формулою (1):

$$\Theta_g = 20 + 345 \lg(8t + 1), \quad (1)$$

де:  $\Theta_g$  – температура газового середовища у протипожежному відсіку ( $^{\circ}\text{C}$ );

$t$  – час розвитку пожежі (хв).

В ПК Robot Structural Analysis Professional 2023 реалізоване числове моделювання температури матеріалу кожного конструктивного елемента в залежності від розвитку температури газового середовища (табл. 1).



**Рис. 1.** Створення спеціальної комбінації завантажень «FIRE» в Robot Structural Analysis  
**Fig. 1.** Generation of special combination «FIRE» in Robot Structural Analysis



**Табл. 1.** Автоматичні розрахункові параметри аналізу режиму пожежі  
**Tabl. 1.** Automatic calculation parameters of fire mode analysis

Analysis type – Temperature/time domain				
treq	30.00	min	Required time of fire resistance	EN112(2.5)
Curve	Standard ISO		Temperature curve	EN112(3.2)
prot	Unprotected		Steel member protection	EN312(4.2.5)
expos	3		Section exposition (e.g. 3 – on three sides)	EN312(4.2.5)
gnr	1.00		Safety factor for radiation	EN112(3.1)
gnc	1.00		Safety factor for convection	EN112(3.1)
k1	1.00		Adaptation factor	EN312(4.2.3.3)
k2	1.00		Adaptation factor	EN312(4.2.3.3)

В результаті розрахунку отримується уточнений НДС елементів, з урахуванням суміщеного впливу спеціальної аварійної комбінації навантажень та перерозподілу напружень від деградації матеріалу. Комбінація навантажень аварійної розрахункової ситуації (2) за [12].

Розрахункове значення домінуючого змінного впливу  $Q_1$  враховується як часте  $\psi_{2,1}Q_1$  або, в якості альтернативи, як майже постійне  $\psi_{1,1}Q_1$ .

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} \oplus P \oplus A_d \oplus (\psi_{1,1} \text{ або } \psi_{2,1}) Q_{k,1} \oplus \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} Q_{k,i}, \quad (2)$$

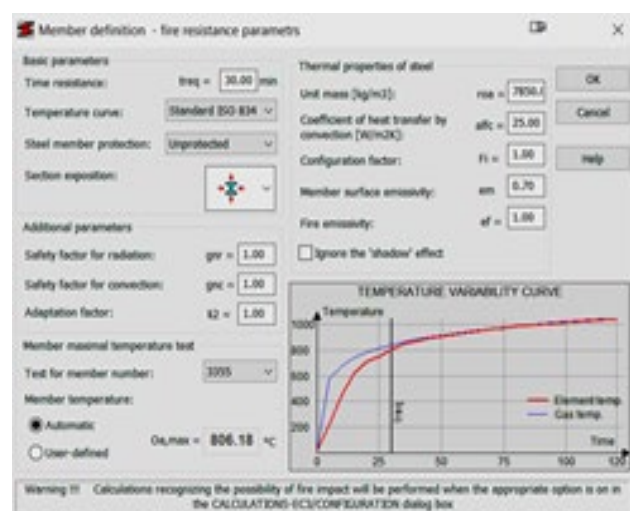
де:  $A_d$  – розрахункове значення надзвичайного впливу;

$\psi_{1,1}$  – коефіцієнт  $\psi_1$  для частого значення змінного навантаження  $Q_{k,i}$  ;

$\psi_{2,i}$  – коефіцієнт  $\psi_2$  для квазіпостійного значення змінного навантаження  $Q_{k,i}$ .



**Рис. 2.** Параметри колони К-1  
**Fig. 2.** Parameters of the K-1 column



**Рис. 3.** Параметри балки Б-1  
**Fig. 3.** Parameters of the B-1 beam

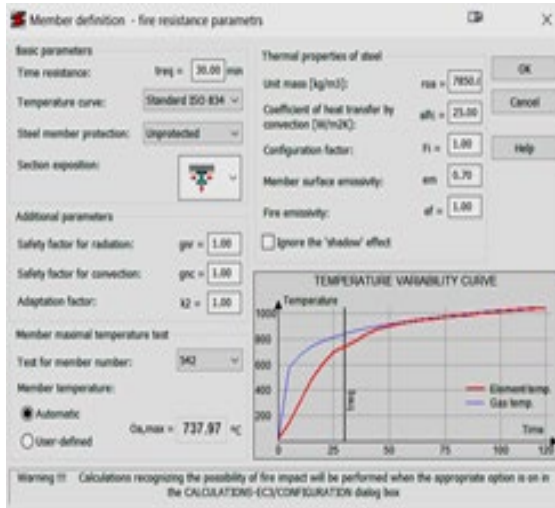


Рис. 4. Параметри вогнестійкості колони К-1  
 Fig. 4. Fire-resistance parameters of the K-1 column



Рис. 5. Параметри вогнестійкості балки Б-1  
 Fig. 5. Fire-resistance parameters of the B-1 beam

На рис. 2 наведені параметри колони, а на рис. 3 – балки, що примикають у вузлі.

Вузли розглядаються як структурна частина рамної системи в стані сприйняття активного навантаження та температурного впливу. Відповідно до цього була розроблена процедура розрахунку, згідно з якою на *першому етапі* розглядається вогнестійкість окремих елементів К-1 та Б-1.

На рис. 4 наведені температурно-часові характеристики колони, а на рис. 5 – балки, **Табл. 2.** Температурно-часові характеристики елементів  
**Tabl. 2.** Temperature-time parameters of the members

що примикають у вузлах. Результати аналізу отриманого аварійного НДС наведені на рис. 6 - 8, а також в табл. 2, де наведені дані про температурно-часові характеристики елементів, в тому числі поправочні коефіцієнти для фізико-механічних характеристик сталі які враховують вплив температури у визначений проміжок часу, що дорівнює 30 хвилин для заданого розвитку аварійного стану пожежі.

Колона К-1 K-1 column	$O_{a,max}$	806.18	C	Max. member surface temperature	EN312(4.2.5.1.(1))
	$k_{y,O}$	0.11		Reduction factor for the steel yield point	EN312(3.2.1.(3))
	$k_{E,O}$	0.09		Reduction factor for the steel modulus of elast.	EN312(3.2.1.(3))
	$O_{a,cr}$	488.92	C	Member critical temperature at required time $t_{req}$	EN312(4.2.4)
	$t_{fi,m,ax}$	11.16	min	Max. Time resistance of a member	EN312(4.2.5.1.(1))
Балка Б-1 B-1 beam	$O_{a,m,ax}$	758.81	C	Max. member surface temperature	EN312(4.2.5.1.(1))
	$k_{y,O}$	0.16		Reduction factor for the steel yield point	EN312(3.2.1.(3))
	$k_{E,O}$	0.11		Reduction factor for the steel modulus of elast.	EN312(3.2.1.(3))
	$O_{a,cr}$	657.29	C	Member critical temperature at required time $t_{req}$	EN312(4.2.4)
	$t_{fi,m,ax}$	20.51	min	Max. Time resistance of a member	EN312(4.2.5.1.(1))

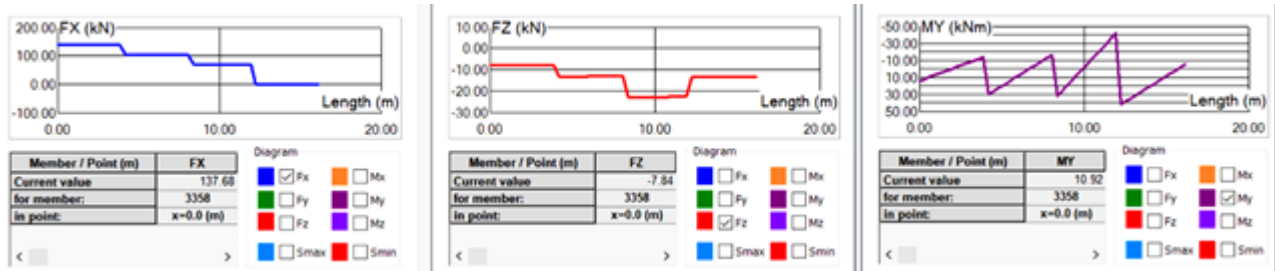


Рис. 6. Аналіз аварійного НДС вузла бази колони

Fig. 6. Analysis of emergency SSB of the column base plate connection

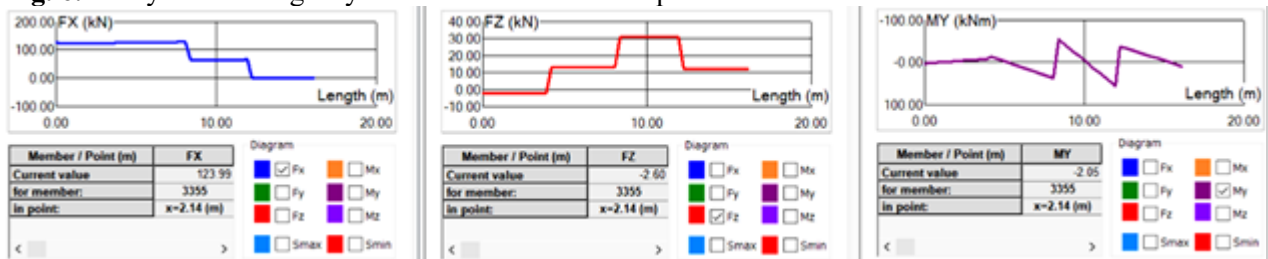


Рис. 7. Аналіз аварійного НДС вузла з'єднання балки та колони

Fig. 7. Analysis of emergency SSB of the beam to column connection

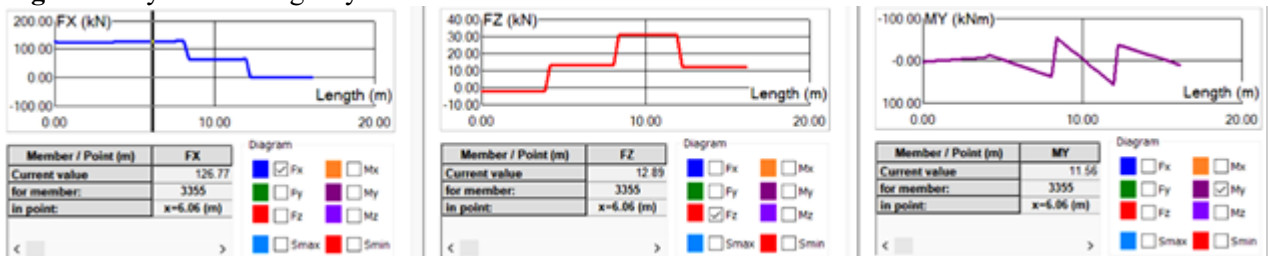


Рис. 8. Аналіз аварійного НДС монтажнього вузла колони

Fig. 8. Analysis of emergency SSB of the assembly connection of the column

За результатами розрахунку можна зробити висновок, що задана конструкція балково-стоякового каркасу не відповідає вимогам вогнестійкості, тому потребує обробки спеціальними протипожежними засобами. В даному дослідженні розглядається вплив температури безпосередньо на складові елементи вузлового з'єднання (ребра жорсткості, фланці, болтові з'єднання, опорні плити і тд.), тому вважається, що балково-стояковий каркас має необхідний захист, аби відповідати вимогам норм і лише у місцях примикання його елементів протипожежний захист відсутній. Таким чином можна перевірити локальний вплив надмірних температур на вузлові з'єднання з урахуванням додаткової маси матеріалу від компонентів вузла, які в свою чергу абсорбують і розподіляють між собою надмірні температури. За таких умов може виникнути явище перерозподілу внутрішніх зусиль,

оскільки зі збільшенням температури матеріалу - зменшуються його фізико-механічні характеристики, як наслідок виникає передчасна відмова елементів вузлового з'єднання та потенційно металевий каркас в цілому.

На другому етапі отримані в результаті попереднього розрахунку на вогнестійкість зусилля в рамних елементах прикладені у вузлах та імплементовані у змодельовані вузли в ПК IdeaStatica. Результати розрахунку показані на рис. 9 – 11. Вони дають можливість зробити висновок, по-перше, про придатність обраного конструктивного рішення до аварійної ситуації вогневого впливу або ж підсилення окремих деталей вузла, а по-друге, про відповідність вимогам норм проектування стосовно вогнестійкості та необхідність (або ж відсутність) додаткового протипожежного захисту в умовах заданої розрахункової ситуації аварійного стану

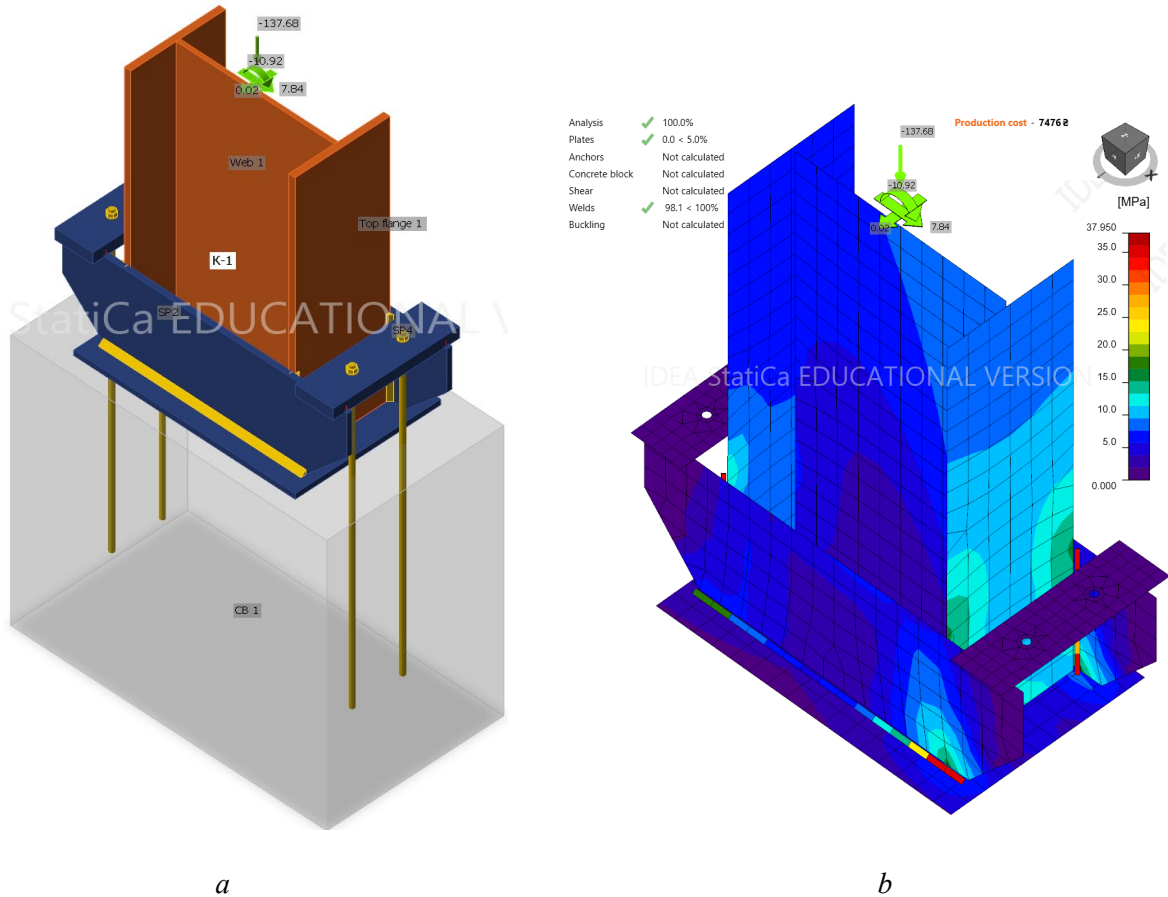


Рис. 9. Вузол бази колони: а – модель; б – НДС вузла  
 Fig. 9. Column base plate connection: a – model; b – SSB of the connection

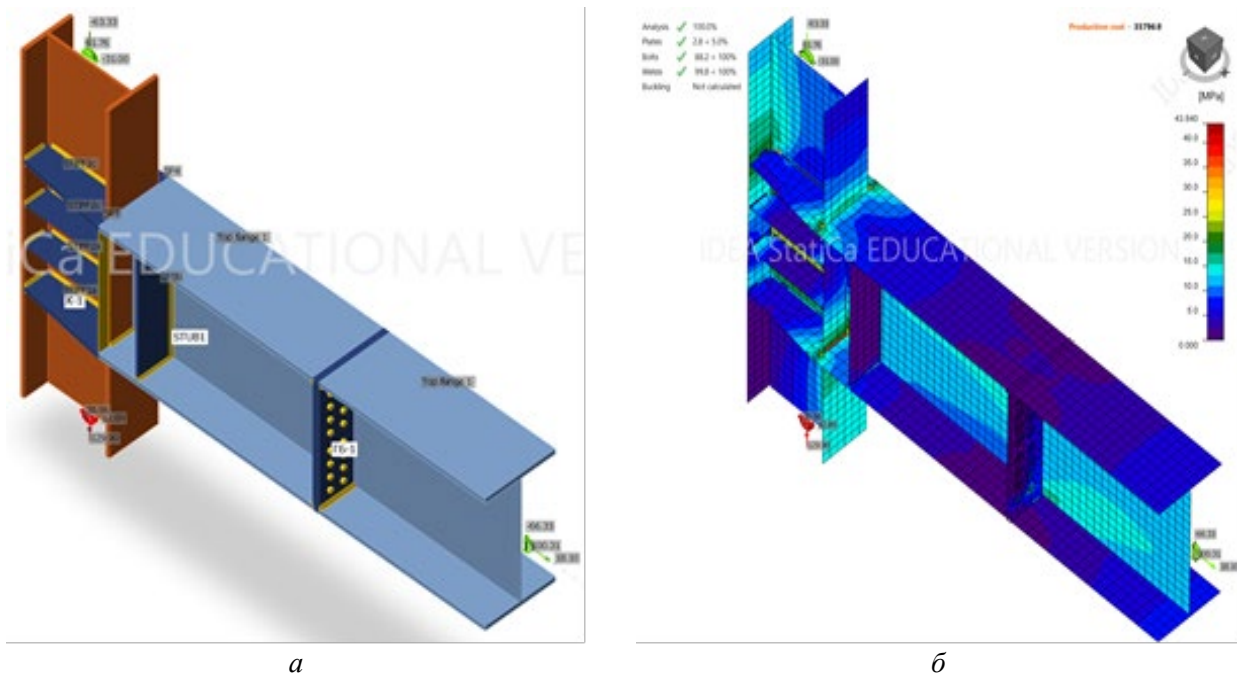
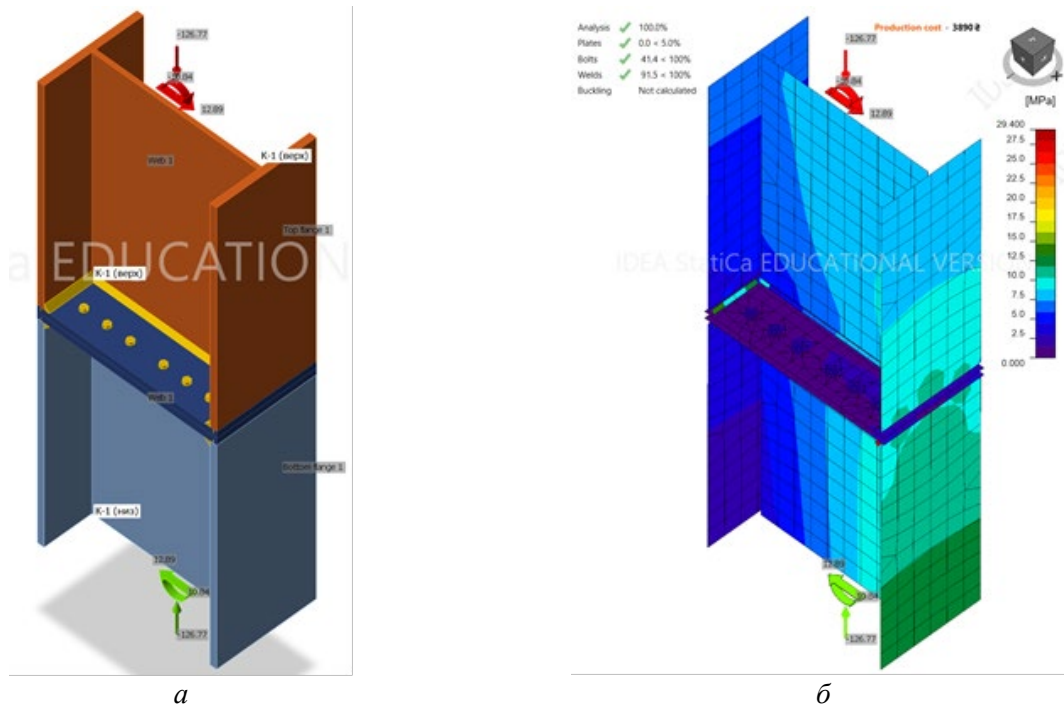


Рис. 10. Вузол з'єднання балки та колони: а – модель; б – НДС вузла  
 Fig. 10. Beam-to-column connection: a – model; b – SSB of the connection





**Рис. 11.** Монтажний вузол колони: а – модель; б – НДС вузла

**Fig. 11.** Assembly connection of the column: a – model; b – SSB of the connection

## ВИСНОВКИ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

1. Проведене експериментальне проектування із застосуванням 3D моделювання, яке підтвердило можливість ефективно створювати та редагувати модель складних вузлів. Використання інформаційних моделей дозволило спростити проектування, оптимізувати робочі процеси, а також суттєво підвищити складність вузлів як на рівні конструктивного рішення, так і на рівні розрахункової моделі з урахуванням нелінійних ефектів високотемпературного впливу пожежі. За результатами проекту можна стверджувати про можливість активної інтеграції інформаційного моделювання вузлів сталевих конструкцій в програмне середовище BIM.

2. Проведений аналіз конструктивного рішення та експериментальне проектування із застосуванням методів і інструментів інформаційних технологій надав можливість кваліфіковано обрати необхідні конструктивні рішення вузлів сталевих конструкцій споруди з урахуванням вимог вогнестійкості відповідно до чинних норм проектування.

Використання програмних інтелектуальних 3D моделей із застосуванням ПК IdeaStatica дозволило вирішити актуальну задачу: редагувати модель вузлів і аналізувати результати стосовно мінімізації запасів при забезпеченні міцності та місцевої стійкості.

3. Встановлено, що застосування ПК Robot Structural Analysis та ПК IdeaStatica – зв'язка програмного та розрахункового комплексів, є раціональною для конструювання та розрахунків вузлів сталевих конструкцій в 3D просторі. Отримані результати можуть ефективно використовуватися для аналізу та коригування вузлів сталевих конструкцій.

## ЛІТЕРАТУРА

1. ДБН В.1.1-7:2016. Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги // *Мінрегіонбуд*, 2017. – 47 с.
2. ДСТУ-Н EN 1991-1-2:2010. Дії на конструкції. Частина 1-2. Дії на конструкції під час пожежі // *Мінрегіонбуд*, 2011. – 81 с.
3. EN 1993-1-2:2005/A1:2014. Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design.

4. ДСТУ-Н Б EN 1993-1-2:2010. Єврокод 3. Проектування сталевих конструкцій. Частина 1-2. Загальні положення. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість (EN 1993-1-2:2005, IDT) // *Мінрегіонбуд*, 2011.- 103 с.
5. ДСТУ-Н Б В.1.2-13:2008. Основи проектування конструкцій (EN 1990:2002, IDT) // *Мінрегіонбуд*. – 267 с.
6. EN 1990:2002+A1:2005. Eurocode 0 - Basis of structural design
7. Шналь Т. М. Вогнестійкість та вогнезахист металевих конструкцій: Навчальний посібник. – Львів: Видавництво Львівської політехніки. 2010. – 176 с.
8. Heinisuo, M., Laasonen, M. Product modeling, part of the fire safety concept in the future for metal structures // *Conference: Advanced Research Workshop on Fire Computer Modeling, October 18-20, 2007*. – 10 p.  
<https://www.researchgate.net/publication/256426230>
9. Білик А.С., Беляєв М.А. BIM-моделювання: огляд можливостей та перспективи в Україні // *Промислове будівництво та інженерні споруди*. 2015. – №2, с. 93–15.
10. Ройтман В.М. Инженерные решения по оценке огнестойкости проектируемых и реконструируемых зданий — М: Ассоциация «Пожарная безопасность и наука». 2001. – 382 с.
11. Vassart, O., Zhao, B., Cajot, L.-G., Robert, F., Meyer, U., Frangi, A. Eurocodes: background & applications. Structural Fire Design: Worked examples – Luxembourg: Publications Office of the European Union, 252.  
<http://doi.org/10.2788/85432>
12. Калафат К.В., Білик А.С., Біляєв М.А., Ковалевська Е.А. Розрахунок сталевих конструкцій на вогнестійкість відповідно до Єврокоду 3: Практичний посібник до ДСТУ-Н EN 1993-1-2:2010. – Київ: Український Центр Сталевого Будівництва. 2016. – 81 с.
13. Лавріненко Л.І., Некора В.С. Дослідження нагрівання сталеві балки з гофрованою стінкою в умовах пожежі // *Будівельні конструкції. Теорія і практика*. 2020 – Вип.6, с. 12 – 21.  
[doi.org/10.32347/2522-4182.6.2020.12-21](https://doi.org/10.32347/2522-4182.6.2020.12-21)
14. V. Nekora, S. Sidnei, T. Shnal, O. Nekora, L. Lavrinenko, S. Pozdieiev. Thermal effect of a fire on a steel beam with corrugated wall with fireproof mineral-wool cladding // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. – №5/1 (113), p. 24-32.  
<http://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.241268>
15. Yin Y.Z., Wang Y.C. A numerical study of large deflection behaviour of restrained steel beams at elevated temperatures. // *Journal of Constructional Steel Research*, 2004. – No. 60, pp. 1029 – 1047.
16. Перельмутер А.В., Сливкер В.И. Расчетные модели конструкций и возможности их анализа. – К.: Вид. «Сталь», 2002. – 600 с.
17. S. Kubba. Building Information Modeling (BIM): Handbook of Building Design and Construction (Second Edition). 2017. – Pp. 227–256.
18. Bilyk S.I., Nilova T.O., Semchuk I.Y., Lavrinenko L.I. Experimental and Theoretical Investigation of Inserted Floors with Decreased Height // *Varilna Tehnika (Slovensko društvo za varilno tehniku)*. 2019-1. –V. 69, pp. 7–15.
19. Адаменко В. М. Досвід впровадження BIM-технологій в навчальний процес на кафедрі металевих і дерев'яних конструкцій КНУБА // *Будівельні конструкції. Теорія і практика*. 2022.– Вип.10, с. 56-68.  
<https://doi.org/10.32347/2522-4182.9.2021.56-68>
20. Бензель О., Лавріненко Л. Інформаційне моделювання сталеві будівлі з підвищеними вимогами жорсткості // *Будівельні конструкції. Теорія і практика*. 2021, – Вип. 9, с. 30-44.  
<https://doi.org/10.32347/2522-4182.9.2021.30-44>
21. Федченко М.С. Некора В.С., Сідней А.С., Поздєєв С.В. Дослідження залежності показників вогнестійкості сталевих елементів від рівня механічного навантаження // *Наука про цивільний захист як шлях становлення молодих вчених. Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції.* – Черкаський інститут пожежної безпеки, 2022. – с. 66–68.
22. Daurov M.K., Bilyk A.S. Investigation of Changes in Steel Frames Stress State in Fire and Influence on Its Vitality // *Strength of Materials and Theory of Structures*. 2022. – № 108, pp. 325 – 336.  
<https://doi.org/10.32347/2410-2547.2022.108.325-336>

## REFERENCES

1. DBN V.1.1-7:2016 Pozhezna bezpeka ob'ektiv budivnytstva. Zahalni vymohy // *Minrehionbud*, 2017. – 47 p.
2. DSTU-N EN 1991-1-2:2010. Dii na konstruktstii . Chastyna 1-2 . Dii na konstruktstii pid chas pozhezhi // *Minrehionbud*, 2011. – 81 p.
3. EN 1993-1-2:2005/A1:2014 Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design.

4. **DSTU-N B EN 1993-1-2:2010**. Yevrokod 3. Proektuvannia stalevykh konstruksii. Chas-tyna 1-2. Zahalni polozhennia. Rozrakhunok konstruksii na vohnestiikist (EN 1993-1-2:2005, IDT) // *Minrehionbud.* - 103 p.
5. **DSTU-N B V.1.2-13:2008**. Osnovy proektuvannia konstruksii (EN 1990:2002, IDT) // *Minrehionbud.* - 267 p.
6. **EN 1990:2002+A1:2005 Eurocode - Basis of structural design**
7. **Shnal T. M.** Vohnestiikist ta vohnezhakhyst metalevykh konstruksii: Navch.posibnyk. - Lviv, Vyd. Lvivska Politehnika. 2010. -p. 176.
8. **Heinisuo, M., Laasonen, M.** Product modeling, part of the fire safety concept in the future for metal structures // *Conference: Advanced Research Workshop on Fire Computer Modeling, October 18-20, 2007.* - 10 p.  
<https://www.researchgate.net/publication/256426230>
9. **Bilyk A.S., Beliaiev M.A.** BIM-modeliuвання:ohliad mozhlyvosti ta perspek-tyvy v Ukraini // *Promyslove budivnytstvo ta inzhenerni sporudy.* 2015.- №2, pp.93–15.
10. **Roitman V.M.** Ynzhenernye resheniya po otsenke ohnestoikosti proektyruemykh y rekonstruyemykh zdaniy — M: Assotsyatsiya «Pozharnaia bezopasnost y nauka». 2001.–382 p.
11. **Vassart, O., Zhao, B., Cajot, L.-G., Robert, F., Meyer, U., Frangi, A.** Eurocodes: background & applications. Structural Fire Design: Worked examples – Luxembourg: Publications Office of the European Union, 252.  
<http://doi.org/10.2788/85432>
12. **Kalafat K.V., Bilyk A.S., Biliaiev M.A., Kovalevska E.A.** Rozrakhunok stalevykh konstruksii na vohnestiikist vidpovidno do Yevrokodu 3: Praktychnyi posibnyk do DSTU-N EN 1993-1-2:2010- Kyiv: *Ukrainskyi Tsentralnyi Stalevoho Budivnytstva.* - 2016, 81 p.
13. **L.I. Lavrinenko, V.S. Nekora,** Doslidzhennia nahrivannia stalevoi balky z hofrovanoiu v umovakh pozhezhi. // *Budivelni konstruksii. Teoriia i praktyka,* 2020. - Vyp. 6, pp. 12 – 21,  
[doi.org/10.32347/2522-4182.6.2020.12-21](https://doi.org/10.32347/2522-4182.6.2020.12-21)
14. **V. Nekora, S. Sidnei, T. Shnal, O. Nekora, L. Lavrinenko, S. Pozdieiev.** Thermal effect of a fire on a steel beam with corrugated wall with fireproof mineral-wool cladding // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* 2021. - №5/1 (113), p. 24-32.  
<https://doi.org/10.15587/1729-061.2021.241268>
15. **Yin Y.Z., Wang Y.C.** A numerical study of large deflection behaviour of restrained steel beams at elevated temperatures. // *Journal of Constructional Steel Research,* 2004. – No. 60, pp. 1029 – 1047.
16. **Perelmuter A.V.** Computational models of structures and the possibility of their analysis / A.V. Perelmuter, V.I. Slivker. - K.: Publishing house "Steel", 2002. – 600 p.
17. **S. Kubba.** Building Information Modeling (BIM): Handbook of Building Design and Construction (Second Edition). 2017. – Pp. 227–256.
18. **Bilyk S.I., Nilova T.O., Semchuk I.Y. Lavrinenko L.I.** Experimental and Theoretical Investigation of Inserted Floors with Decreased Height // *Varilna Tehnika (Slovensko društvo za varilno tehniku).* 2019-1. –V. 69, pp. 7–15.
19. **Adamenko V. M.** Dosvid vprovadzhennia BIM-tekhnologii v navchalnyi protses na kafedri metalevykh i derevianykh konstruksii KNUBA // *Budivelni konstruksii. Teoriia i praktyka .* – 2022. – Vyp. 10. – S. 56-68.  
<https://doi.org/10.32347/2522-4182.9.2021.56-68>
20. **Benzel O.** Informatsiine modeliuвання stalevoi budivli z pidvyshchenymy vymohamy zhorstkosti // *Budivelni konstruksii. Teoriia i praktyka.* 2021. - Vyp. 9, s. 30-44.  
<https://doi.org/10.32347/2522-4182.9.2021.30-44>
21. **Fedchenko M.S., Nekora V.S., Sidnei A.S., Pozdieiev S.V.** Doslidzhennia zalezhnosti pokazny-kiv vohnestiikosti stalevykh elementov vid rivnia mekhanichnoho navantazhennia // *Nauka pro tsyvilnyi zakhyst yak shliakh stanovlennia molodykh vchenykh. Materialy Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi konferentsii.– Cherkaskyi instytut pozheznoi bezpeky,* 2022. – s.66–68.
22. **Daurov M.K., Bilyk A.S.** Investigation of Changes in Steel Frames Stress State in Fire and Influence on Its Vitality // *Strength of Materials and Theory of Structures.* 2022. – № 108, pp. 325 – 336.  
<http://doi.org/10.32347/2410-2547.2022.108.325-336>

**FIRE RESISTANCE DESIGN  
ANALYSIS FOR STEEL  
CONNECTIONS USING SPECIALIZED  
3D MODELING SOFTWARE**

*Kristian HITSKOV,  
Liudmyla LAVRINENKO*

**Summary.** The work presents the design process, analysis and practical evaluation of nodal connections of the beam-column frame of a low-rise building in the BIM design environment for the action of active loads and emergency temperature effects of fire. A study of the use of design tools was conducted. The conduct of such studies is due to the need to increase the reliability of the steel frame in fire conditions and to update the requirements of the normative documents of the Eurocodes regarding the fire resistance of metal structures. The standard fire mode was considered, the heating parameters of elements connected in nodes were analyzed. A review of the theoretical foundations of the calculation of steel structures for the high-temperature effect of the working environment showed the feasibility of applying a simplified method of calculation and determination of heating parameters according to normative data.

Simulated rod diagram of the frame with loads. An analysis of the stress-strain behavior (SSB) of the elements under the action of the emergency combination was carried out. 3D modeling of the node was used for further calculation. The BIM concept is implemented by integrating Robot Structural Analysis PC with the IdeaStatica calculation complex. It has been established that the connection of PC Robot Structural Analysis with the IdeaStatica calculation complex is rational for the design and calculations of buildings and structures in 3D space and allows using the results of the temperature effect calculation to adjust the structural solution in order to reduce its metal consumption, labor costs and rationalize the reserves of bearing capacity.

The presented process of designing frame nodes summarizes approaches to the development of effective structural forms. The use of information models simplified design, optimized work processes, and also made it possible to increase the complexity of nodes both at the level of the design solution and at the level of the calculation model, taking into account the nonlinear effects of temperature influence.

**Keywords.** 3D modeling; metal structures; steel connection design; temperature influence

*Стаття надійшла до редакції 30.03.2023*