

## АНАЛІЗ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ВОГНЕЗАХИЩЕНОЇ СТАЛЕВОЇ БАЛКИ ПЕРЕКРИТТЯ

Олексій БАШИНСЬКИЙ<sup>1, 2</sup>, Ольга БАШИНСЬКА<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Київський національний університет будівництва та архітектури  
31, просп. Повітрофлотський, Київ, Україна, 03037  
<sup>2</sup>Товариство з обмеженою відповідальністю «Ліра САПР»  
7а, провулок Киянівський, Київ, Україна, 04053  
<sup>1</sup>alex.bashinsky97@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2466-4306>  
<sup>2</sup>olchik01@ukr.net, <http://orcid.org/0000-0002-4161-782X>

**Анотація.** Стаття представляє удосконалену методику чисельного моделювання роботи сталевих елементів конструкцій на прикладі балки перекриття, з урахуванням впливу вогнезахисного матеріалу. В статті описана покрокова методика розрахунку на вогнестійкість в ПК ЛІРА-САПР, в якій детально показано принципи розрахунку на вогнестійкість.

В цій методиці враховується нелінійна залежність зміни основних тепло-технічних характеристик матеріалів, таких як коефіцієнт теплопровідності, коефіцієнт теплоємності та конвективний теплообмін, від температури. Було проведено аналіз впливу роботи вогнезахисних матеріалів при високих температурах на міцнісні та деформаційні характеристики елементів конструкцій.

Стаття також описує розподілення температурних полів по елементах дослідного перерізу та досліджує зміну температури та міцнісних характеристик сталевого двотавру перекриття в залежності від часу. Зпропоновано кілька варіантів вогнезахисту за допомогою матеріалів від українського виробника. Чисельно перевірена ефективність вище зазначених матеріалів.

Результати розрахунків різних варіантів вогнезахисту порівнюються, що дозволяє вибрати найоптимальніший варіант. Також порівнюються та описуються результати розрахунків з урахуванням та без урахування нелінійності матеріалів. Крім того, в статті



**Олексій БАШИНСЬКИЙ**

здобувач вищої освіти рівня PhD кафедри металевих та дерев'яних конструкцій. Інженер технічного супроводу.



**Ольга БАШИНСЬКА**

Інженер-програміст, к.т.н.

досліджується роль плити перекриття як вогнезахисного матеріалу. Це дозволяє визначити вплив плити перекриття на вогнестійкість конструкції та забезпечити додатковий рівень безпеки.

Стаття буде корисною для інженерів-проектувальників, які працюють зі сталевими конструкціями, а також для дослідників, які цікавляться впливом вогнезахисних матеріалів на вогнестійкість. Вона надає цінні наукові і практичні відомості, які можуть бути використані для підвищення безпеки та надійності сталевих конструкцій у вогнестійких умовах.

**Ключові слова.** Напружено-деформований стан; метод скінченних елементів; нелінійна теплопровідність; вогнестійкість; ПК ЛІРА-САПР.

## АКТУАЛЬНІСТЬ ТЕМИ

В 2022 році українські інженери та науковці зустрілися з новою проблемою: захистом цивільних будівель від ураження ракет, снарядів, бомб, тощо. Захиститися від даних типів ураження досить складно, а захиститися від прямого ураження – практично неможливо. Але досить часто конструкції витримують падіння ракети, бомби, тощо, але не витримують наслідків – а саме пожежу. При розвитку пожежі у будівлях та спорудах різного призначення та будь-якого ступеню вогнестійкості основні несучі конструкції починають активно деформуватися та втрачати свою несучу здатність вже через 15 хвилин після виникнення пожежі. Цей факт достовірно відображено у державних будівельних нормах проектування, та чисельно перевірено у раніше написаній статті [1]. Будівельні конструкції з несучими елементами із незахищеного металу руйнуються в рази швидше, завдаючи величезної матеріальної шкоди та підвищуючи ризик людей, які знаходяться усередині будівель. Задля застереження подібних ситуацій надзвичайно важливе значення має розвиток методик математичного моделювання роботи конструкцій під дією високих температур із врахуванням роботи вогнезахисних матеріалів. Одна з методик описана в статті Круковського П.Г., Ковалева А.І., Черненко К.О., Метель М.О. та Абрамова О.О.[2], але по-перше, запропонована методика стосується залізобетонних пустотних плит і по-друге – розрахунок виконувався в достатньо дорогому ПК ANSYS. В роботах [3] Барабаш М.С., Ромашкіної М.А. та Башинської О.Ю.; Колякової В.М. та Божинського М.О. [4, 5] також описана зміна термонапруженого стану залізобетонних конструкцій, а в роботі Даурова М. та Білика А.С. [6, 7] досить чітко описаний вплив пожежі на стійкість всього каркасу. Також варто відмітити статтю Фесенко О.А. та Колякової В.М. [8], в якій визначається вплив пожежі на дерев'яні конструкції з огляду втрати несучої здатності та теплоізоляційних характеристик.

Варто зазначити, що запроектована будівельна конструкція, окрім надійності, безпеки та економічної доречності має забезпечити функціональну придатність.

Визначення функціональної придатності будівельних конструкцій при розрахунку на вогнестійкість неможливо без правильного прогнозування перерозподілу температур між захисним шаром та самою конструкцією, що відбувається внаслідок нелінійної зміни коефіцієнту теплопровідності, коефіцієнту теплоємності та конвективного теплообміну при зміні температури.

Вибір правильної методики створення математичної моделі при розрахунку будівель та споруд на вогнестійкість є одним із основних етапів проектування, необхідним для гарантування надійності та безпеки при експлуатації конструкції. Не викликає сумніву той факт, що нелінійні математичні закони теплопровідності допомагають більш точно та достовірно описати роботу бетону та сталі під дією температурного впливу.

Саме тому, дана стаття присвячена розробці методики чисельного моделювання вогнезахисту сталевих конструкцій із врахуванням нелінійної теплопровідності матеріалів.

## НЕВИРІШЕНА ЧАСТИНА ПРОБЛЕМИ

У нормах проектування детально описані лише спрощені методи розрахунку сталевих конструкцій на вогнестійкість. Короткий огляд використання уточнених методів розрахунку міститься у публікації Британського інституту інженерів-будівельників та в посібнику УЦСБ [9, 10].

Відсутні рекомендації та методики, що допомагають правильно моделювати роботу вогнезахисних матеріалів та достовірно проаналізувати їх вплив на роботу конструкції та зміну напружено-деформованого стану під час пожежі.

Тому існує необхідність створення якісної методики для математичного моделювання впливу елементів вогнезахисту на ос-

новні несучі елементи кон-струкцій, що допоможуть максимально точно відображати зміну теплопровідних, міцнісних та деформаційних характеристик матеріалів при збільшенні температури, що безумовно впливають на напружено-деформований стан будівельних споруд.

## ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ

Метою даної статті є розробка методики чисельного моделювання вогнезахисту сталевих конструкцій із врахуванням нелінійної теплопровідності матеріалів.

Для досягнення поставленої мети було вирішено наступні задачі:

- створено скінченно-елементні моделі [11, 12, 13] сталеві балки перекриття із врахуванням моделювання різних варіантів вогнезахисту, а також врахуванням нелінійної теплопровідності матеріалів;

- визначено зміну міцнісних та деформаційних характеристик матеріалів при підвищенні температури та проведено аналіз впливу вибраних методик моделювання на якість проектування конструкцій;

- порівняно результати розрахунку з врахуванням та без врахування нелінійних властивостей матеріалів.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ

Будь-яку термодинамічну систему можна розглядати як процес обміну енергіями двох сил – зовнішньої та внутрішньої. Повна потенційна енергія такої системи може бути представлена у вигляді:

$$I(u) = P(u) + W(u), \quad (1)$$

де  $P(u)$  – це потенційна енергія розподілу температури;

$W(u)$  – робота зовнішнього навантаження, що визначається у вигляді:

$$W(u) = \int_{\Omega} f u d\Omega \quad (2)$$

де  $f$  – вектор зовнішніх впливів;

$u$  – вектор розподілу температури.

Областю розгляду функціоналу  $W(u)$  є безліч безперервних функцій  $u$ , що визначені в області  $\Omega$   $n$ -мірного евклідового простору.

Необхідною умовою рівноваги будь-якої термодинамічної системи є наявність екстремуму функціоналу повної потенційної енергії  $I(u)$ , тому основним завданням класичного варіаційного числення є знаходження екстремальних значень функціоналів.

Задля вирішення подібної задачі у контексті термодинамічної системи, звернемося до використання розглянутих варіаційних принципів у методах механіки. Відповідно до принципу Лагранжа, умовою мінімуму функціоналу є принцип можливих переміщень. Згідно з цим принципом, в будь-якій системі, яка знаходиться в рівновазі, сума робіт зовнішніх сил і відповідних внутрішніх сил на будь-яких можливих варіаціях переміщень дорівнює нулю:

$$a(u, v) + l(v) = 0, \quad (3)$$

де  $l(v)$  – можлива робота зовнішніх сил;  
 $a(u, v)$  – можлива робота внутрішніх сил;  $v$  – вектор можливих переміщень.

При вирішенні задачі теплопровідності, аналогом вектору можливих переміщень  $v$  виступають значення температур у вузлах дискретної моделі.

Відповідно до ідеї методу скінченних елементів, для опису розподілу температури у системі, що розглядається – її дискретизують. Це дозволяє представити можливі роботи зовнішніх і внутрішніх сил у вигляді сум за окремими компонентами (скінченними елементами). Тоді вектор невідомих температур  $u$  апроксимують вектором вузлових невідомих  $t$ . Вузлові невідомі  $t$  являються шуканим значенням температур у вузлах скінченних елементів. На отриманій дискретній моделі вводиться також система безперервних функцій  $\phi(x)$ . Тоді вектор невідомих температур можна записати у вигляді:

$$u = t \cdot \phi(x) \quad (4)$$

Якщо ввести позначення:

$$k_{i,j} = \int_{\Omega} (B\phi)^T DB\phi d\Omega \quad (5)$$

$$P_i = - \int_{\Omega} \phi^T f d\Omega \quad (6)$$

де  $k_{i,j}$  – елементи матриці теплопровідності системи  $[K]$ ,  
 $p_i$  – елементи вектора зовнішніх впливів  $\{P\}$ .

Тоді рівняння рівноваги для задач лінійної теплопровідності можна записати в матричному вигляді:

$$[K]\{t\} - \{P\} = 0 \quad (7)$$

У реальному житті усі матеріали мають нелінійну залежність коефіцієнту тепло-

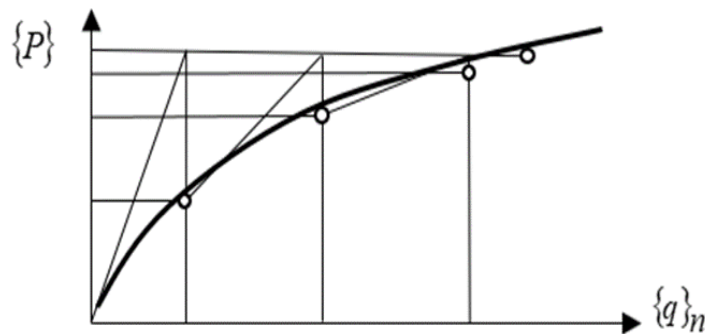
провідності, коефіцієнту теплоємності та конвекційного теплообміну від температури. Тому у нелінійних задачах характеристики матеріалів, що визначаються матрицею  $[D]$  (аналог матриці пружності у задачах механіки) являються функціями компонентів вузлових температур:

$$[D] = [D(\{t\})] \quad (8)$$

В такому випадку, рівняння рівноваги набирає вигляду:

$$[K(\{T\})] \cdot \{t\} - \{P\} = 0 \quad (9)$$

Для вирішення подібних нелінійних рівнянь у програмному комплексі ЛІРА-САПР використовують метод Ньютона-Рафсона (рис. 1).



**Рис.1.** Метод Ньютона-Рафсона для вирішення нелінійних задач.

**Fig.1.** Newton-Raphson method for solving nonlinear problems

Використовуючи наведені методики та математичні прийоми вирішення задач нелінійної теплопровідності методом скінчених елементів, у ПК ЛІРА-САПР було виконано розрахунок досліджуваної схеми.

### ОПИС РОЗРАХУНКОВОЇ СХЕМИ

Модель була створена в ПК ЛІРА-САПР: сталевая балка перекриття – Двотавр з наступними характеристиками:

- Висота (H) – 346 мм;
- Ширина полки (Bf) – 155 мм;
- Товщина полки (Tf) – 8.5 мм;
- Товщина стінки (Tw) – 6.2 мм;

- Модуль пружності сталі (E) –  $2.1 \cdot 10^7$  т/м<sup>2</sup>.

На двотавр спирається залізобетонна плита перекриття товщиною 120 мм. В якості вогнезахисного матеріалу запропоновано силікатні плити FB-300 від українського виробника Ammokote.

Для розрахунку було вибрано захисні плити товщиною 25 та 40 мм. Запропоновано 2 компоновки схеми вогнезахисту:

- 1) Захисні плити товщиною 25 мм по периметру двотавра (рис. 2а);
- 2) Захисні плити товщиною 40 мм по периметру двотавра (рис. 2б).

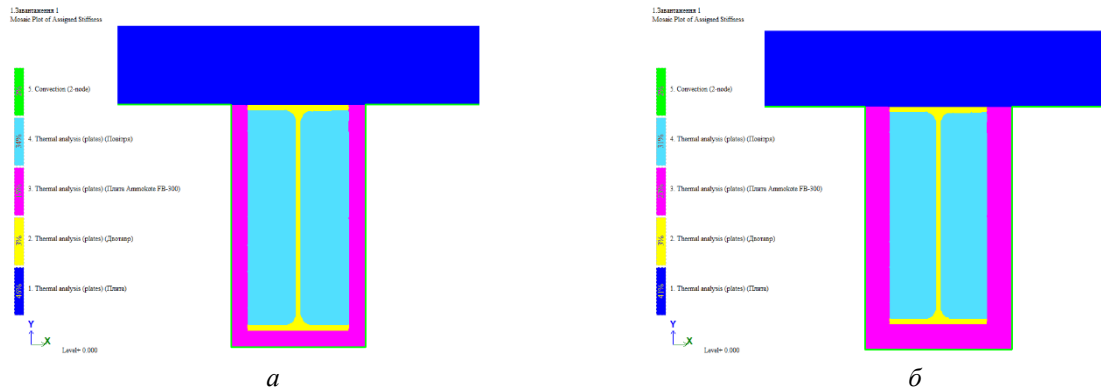


Рис. 2. Розрахункова схема конструкції: *a* – 1-й варіант; *б* – 2-й варіант.

Fig.2. Design scheme of the structure: *a* – 1-st option; *b* – 2-nd option.

Ці схеми складаються з приблизно 24000 скінченних елементів (СЕ) кожна. Така велика кількість СЕ обумовлена необхідністю більш точного розподілення температурних полів. Двотавр, плита перекриття та захисні плити змодельовані за допомогою СЕ 1508 – три-кутного скінченного елемента тепло-провідності. В цій задачі виникла необхідність моделювати повітря між захисною плитою і двотавром. Це було обумовлено тим, що досить складно змодельювати передачу температури від внутрішньої грані захисної плити до грані двотавру.

Саме тому для точного розподілення температури між плитою та двотавром було створено повітряний прошарок за допомогою СЕ 1508. Передача теплового навантаження від джерела тепла (пожежі) на елементи конструкції була змодельована за допомогою скінченного елемента конвективного теплообміну – СЕ 1555.

*Питома теплоємність*

$$c_a = 425 + 7.73 \times 10^{-1} \theta_a - 1.69 \times 10^{-3} \theta_a^2 + 2.22 \times 10^{-6} \theta_a^3 \quad (10,a)$$

- для температури від 600°C до 735°C

$$c_a = 666 + \frac{13002}{138 - \theta_a} \quad (10,b)$$

- для температури від 735°C до 900°C

$\theta_a$  – температура сталі, °C.

*Теплопровідність*

- для температури від 20°C до 800°C

$$a_a = 54 - 3.33 \times 10^{-2} \theta_a \quad (11,a)$$

## ТЕПЛОТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАТЕРІАЛІВ

В дослідженні [1] та інших дослідженнях [2, 3, 8] теплотехнічні характеристики були задані лінійними, незмінними. В моделі, що розглядається задано нелінійні теплотехнічні характеристики матеріалів. Таким чином враховується зміна параметрів теплопровідності та теплоємності зі зміною температури, тим самим ще більше наблизивши результати чисельного моделювання до результатів натурних випробувань.

За формулами, описаними в чинних нормативних документах, було вираховано значення теплотехнічних характеристик на різних проміжках температури.

Для вуглецевої сталі [14]:

- для температури від 20°C до 600°C

$$c_a = 545 + \frac{17820}{\theta_a - 731} \quad (10,b)$$

- для температури від 900°C до 1200°C

$$c_a = 650 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К} \quad (10,g)$$

де  $c_a$  – питома теплоємність, Дж/кг·К;

- для температури від 800°C до 1200°C

$$a_a = 27.3 \text{ Вт/м} \cdot \text{К} \quad (11,b)$$

де  $a_a$  – теплопровідність, Вт/м·К;

$\theta_a$  – температура сталі, °C.

Для бетону [15]:

Питома теплоємність

- для температури від 20°C до 100°C  
 $c_p(\theta) = 900 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$  (12,а)

- для температури від 100°C до 200°C  
 $c_p(\theta) = 900 + (\theta - 100)$  (12,б)

- для температури від 200°C до 400°C

$c_p(\theta) = 1000 + (\theta - 200)/2$  (12,в)

- для температури від 400°C до 1200°C

$c_p(\theta) = 1100 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$  (12,г)

де  $c_p(\theta)$  - питома теплоємність, Дж/кг·К;

$\theta$  - температура бетону, °С.

Теплопровідність

- для температури від 20°C до 1200°C (верхня межа теплопровідності)

$$\lambda_c = 2 - 0,2451 \left( \frac{\theta}{100} \right) + 0,0107 \left( \frac{\theta}{100} \right)^2 \quad (13,а)$$

- для температури від 20°C до 1200°C (нижня межа теплопровідності)

$$\lambda_c = 1.36 - 0.136 \left( \frac{\theta}{100} \right) + 0.0057 \left( \frac{\theta}{100} \right)^2 \quad (13,б)$$

де  $\lambda_c$  – теплопровідність, Вт/м·К;

$\theta$  – температура бетону, °С

Відповідно вище зазначених формул було вираховано теплотехнічні характеристики бетону та сталі (табл. 1) та сформовано закони нелінійного деформування.

**Табл. 1.** Нелінійні теплотехнічні характеристики бетону і сталі.

**Table 1.** Non-linear thermal characteristics of concrete and steel.

Температура, °С	Сталь		Бетон	
	Питома теплоємність, Дж/кг * К	Теплопровідність, Вт/м * К	Питома теплоємність, Дж/кг * К	Теплопровідність, Вт/м * К
20	439.802	53.334	900	1.64222
100	487.62	50.67	900	1.49765
200	529.76	47.34	1000	1.3317
300	564.74	44.01	1050	1.18215
400	605.88	40.68	1100	1.049
500	666.5	37.35	1100	0.93225
600	759.92	34.02	1100	0.8319
700	1008.16	30.69	1100	0.74795
800	803.261	27.3	1100	0.6804
900	650	27.3	1100	0.62925
1000	650	27.3	1100	0.5945

Теплотехнічні характеристики захисного матеріалу та повітря були задані лінійними (табл. 2).

**Табл. 2.** Лінійні теплотехнічні характеристики захисного матеріалу та повітря

**Table 2.** Linear thermal characteristics of the protective material and air

	Питома теплоємність, Дж/кг * К	Теплопровідність, Вт/м * К
Плита FB 300	0.84	0.12
Повітря	1000	0.026

## НАВАНТАЖЕННЯ ТА ГРАФІК ПОЖЕЖІ

В даній моделі було задано 3 види навантаження [16]:

- 1) Задана температура у вузлі величиною. За допомогою цього типу навантаження було змодельовано початкову температуру дослідної конструкції - 20°C.
- 2) Задана температура на елемент конвекції. За допомогою цього типу навантаження було змодельовано початкову температуру в елементі конвекції. Величина температури в елементі конвекції

буде залежити від температури пожежі тому значення цього навантаження – 1°C.

- 3) Тепловий потік в ребро пластини. Величина теплового потоку буде залежити від температури пожежі, тому значення даного навантаження – 1Дж/(с\*м).
- 4) Після того, як були задані навантаження, за формулою (14) [17] було сформовано графік пожежі тривалістю 5 годин (рис. 3).

$$\theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1) [^{\circ}\text{C}] \quad (14)$$

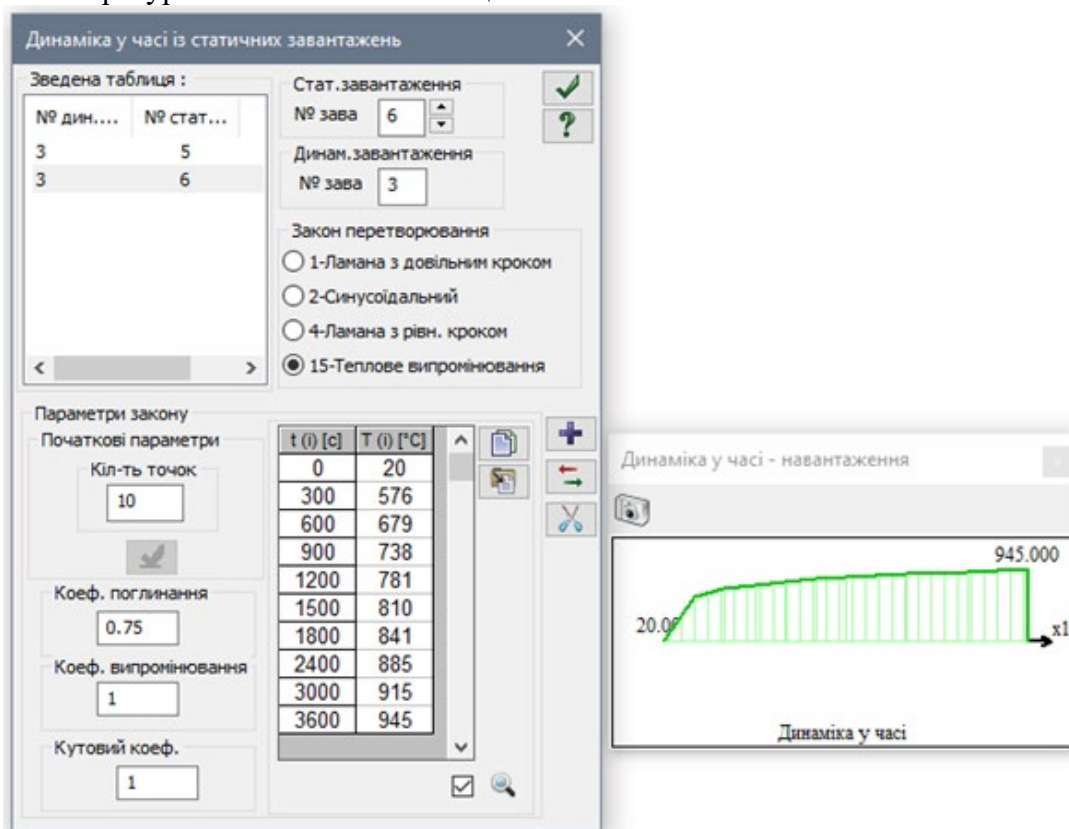


Рис. 3. Графік пожежі тривалістю 5 годин в ПК ЛІРА-САПР.

Fig. 3. Graph of a 5-hour fire in LIRA-SAPR.

## РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКУ

Було проведено нелінійний теплотехнічний розрахунок кожної моделі з

різними компоновками вогнезахисту. На рис. 4,а, 4,б та 5,а, 5,б вказано результати прогрівання перерізу на 60-й хвилині пожежі для варіантів вогнезахисту 25 мм плитами та 40 мм плитами відповідно





**Рис. 4.** Розподілення температурних полів в перерізі двотавру із вогнезахистом 25 мм:  
*a* – візуалізація всієї моделі; *б* – візуалізація двотавру.

**Fig. 4.** Distribution of temperature fields in a cross-section of an I-beam with 25 mm fire protection:  
*a* - visualisation of the entire model; *b* - visualisation of the I-beam.

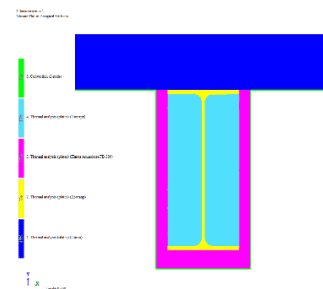


**Рис. 5.** Розподілення температурних полів в перерізі двотавру із вогнезахистом 40 мм:  
*a* – візуалізація всієї моделі; *б* – візуалізація двотавру

**Fig. 5.** Distribution of temperature fields in a cross-section of an I-beam with 40 mm fire protection:  
*a* - visualisation of the entire model; *b* - visualisation of the I-beam.

Як видно з наведених рисунків, плита перекриття забирає достатньо велику кількість тепла, що призводить до того, що нижня полиця прогрівається приблизно на  $150^{\circ}\text{C}$  сильніше. Звідси було прийнято рішення зробити 3-й варіант вогнезахисту для зниження ціни вогнезахисту, а саме зменшити товщину бокової плити до 25мм, а нижню плиту лишити 40 мм (рис. 6).

Результати розрахунку третього варіанту компоновки вогнезахисту наведено на рис. 7а, 7б.



**Рис. 6.** 3-й варіант вогнезахисту.  
**Fig. 6.** 3-rd option for fire protection.

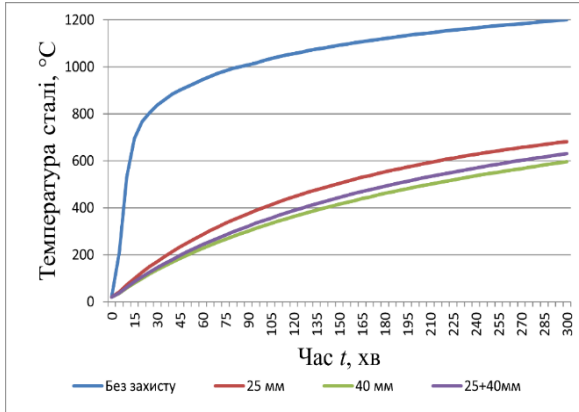


**Рис. 7.** Розподілення температурних полів в перерізі двотавру із вогнезахистом 25 + 40 мм:  
*a* – візуалізація всієї моделі; *б* – візуалізація двотавру.

**Fig. 7.** Distribution of temperature fields in the cross-section of an I-beam with fire protection of 25 + 40 mm: *a* - visualisation of the entire model; *b* - visualisation of the I-beam.



На основі отриманих результатів було сформовано графіки (рис. 8) зміни температури з часом для кожного варіанту вогнезахисту та перерізу без вогнезахисту.



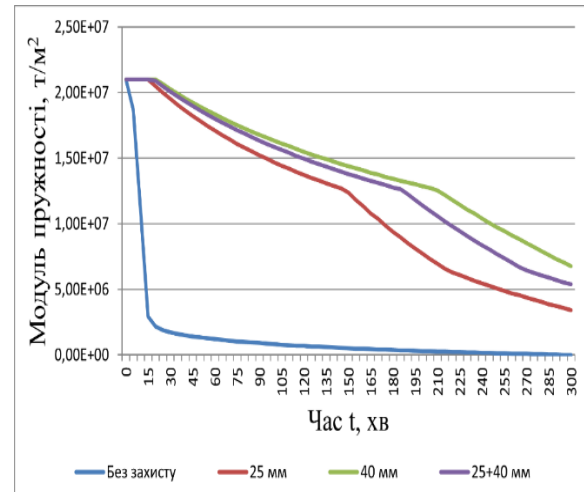
**Рис. 8.** Зведений графік зміни температури в часі в дослідному двотаврі.

**Fig. 8.** Summary graph of temperature changes over time in the I-beam.

Наступним кроком було зниження модуля пружності-деформації сталевого двотавру відносно отриманим температурам. Як видно з рис. 4, 5, 7, температура розподіляється по двотавру нерівномірно, тому для

спрощення було прийнято максимальну температуру в перерізі (нижня полка) на кожній відмітці часу. За допомогою розробленої методики [1], було пораховано модуль пружності-деформації.

Результати вказані на графіку (рис. 9) та в таблиці 3.



**Рис. 9.** Зведений графік зміни модуля пружності-деформації в дослідному двотаврі.

**Fig. 9.** Summary graph of the change in the elasticity-strain modulus in the I-beam

**Табл. 3.** Результати теплотехнічного розрахунку в дослідному двотаврі.

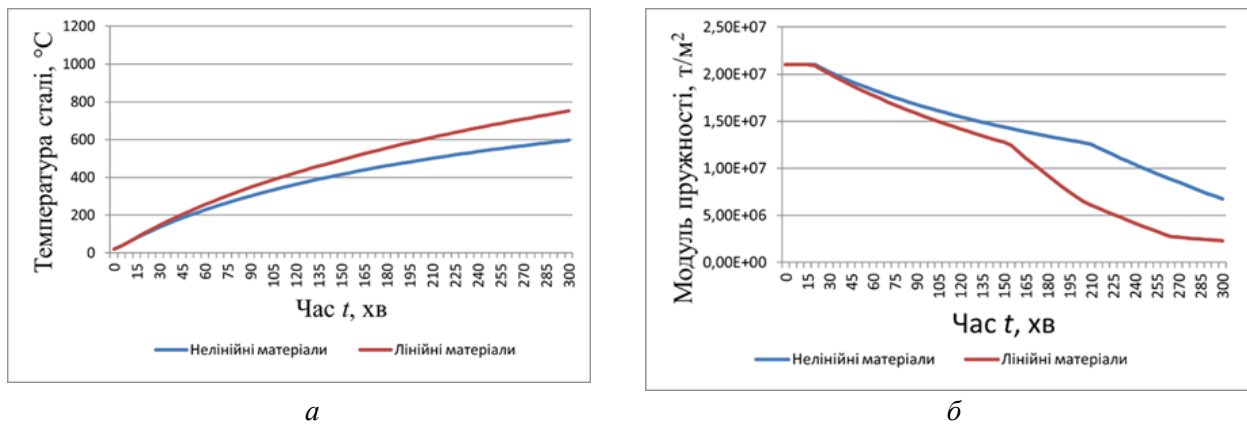
**Table 3.** Results of thermal analysis of the I-beam.

Час, хв	Без захисту		Варіант 1		Варіант 2		Варіант 3	
	T, °C	E, т/м <sup>2</sup>	T, °C	E, т/м <sup>2</sup>	T, °C	E, т/м <sup>2</sup>	T, °C	E, т/м <sup>2</sup>
15	695	2,9*10 <sup>6</sup>	98,9	2,1*10 <sup>7</sup>	79,6	2,1*10 <sup>7</sup>	84,7	2,1*10 <sup>7</sup>
60	946	1,2*10 <sup>6</sup>	286	1,7*10 <sup>7</sup>	227	1,83*10 <sup>7</sup>	243	1,8*10 <sup>7</sup>
300	1201	0	682	3,4*10 <sup>6</sup>	596	6,75*10 <sup>6</sup>	630	5,38*10 <sup>6</sup>

Як видно з вище наведеного графіку, 3-й варіант компоновки вогнезахисту не сильно відрізняється від другого (40мм) до відмітки 180 хв. Після 180 хвилин пожежі значення модуля пружності-деформації починає різко падати. Також з графіків видно, що несуча здатність балки значно знижується після 210 хвилин пожежі, що відповідає заявленій ін-формації на сайті виробника.

Найбільш ефективним варіантом 2-й варіант – а саме плити 40 мм по периметру двотавру.

Тепер порівняємо результати розрахунку з лінійно заданими матеріалами на прикладі 2-го варіанту компоновки вогнезахисту (рис. 10а, 10б).



**Рис. 10.** Порівняльні графіки результатів розрахунку з заданими лінійними та нелінійними матеріалами: *a* – графік зміни температури з часом; *б* – графік зміни модуля пружності з часом.

**Fig. 10.** Comparative graphs of the analysis results with the given linear and nonlinear materials: *a* - graph of temperature change with time; *b* - graph of elastic modulus change with time.

З графіків вище видно, що відмінність результатів дуже значна, що означає, що при розрахунку з заданням лінійних характеристик матеріалів результати будуть завищені,

отже буде витрачено більше коштів на забезпечення вогнезахисту. В таблиці 4 показано відмінність результатів на різних відмітках часу.

**Табл. 4** Таблиця порівняння результатів з заданням лінійних та нелінійних характеристик матеріалів.  
**Table 4.** Table of comparison of results with linear and nonlinear material characteristics.

Час, хв	Нелінійні матеріали		Лінійні матеріали		Похибка, %	
	T, °C	E, т/м <sup>2</sup>	T, °C	E, т/м <sup>2</sup>	T	E
15	79,6	2,1*10 <sup>7</sup>	82,2	2,1*10 <sup>7</sup>	3,3	0
60	227	1,83*10 <sup>7</sup>	256	1,77*10 <sup>7</sup>	12,8	3,28
300	596	6,75*10 <sup>6</sup>	751	2,3*10 <sup>6</sup>	26	65,9

З таблиці, наведеної вище, бачимо, що похибка в розподіленні температури сягає

26%, що тягне за собою похибку в розрахунку модуля пружності до 65.9%.

## ВИСНОВКИ

У статті детально описано розроблену методику розрахунку окремих елементів будівельних конструкцій на вплив пожежі в ПК ЛІРА-САПР.

Результати теплотехнічного розрахунку сталевого перерізу з урахуванням вогнезахисних плит компанії Ammokote практично не відрізняються від заявлених на сайті виробника.

Також було виявлено нерівномірне розподілення температурних полів по перерізу, що вказує на нерівномірну зміну жоркостних характеристик матеріалу. Цей феномен заслуговує на подальше дослідження.

Результати розрахунку з врахуванням нелінійних властивостей матеріалів суттєво відрізняються від результатів з врахуванням лінійних властивостей. Проте в більшу сторону, тож ця різниця відображується лише на вартості проекту вогнезахисту.

## ЛІТЕРАТУРА

1. **Bilyk S.** Determination of changes in thermal stress state of steel beams in LIRA-SAPR software. /Bilyk S., Bashynska O., Bashynskiy O. //Strength of materials and theory of structures. 2022. Issue. 108. pp.189-202. <https://doi.org/10.32347/2410-547.2022.108.189-202>
2. **Круковский П.** Моделирование теплового состояния и огнестойкости многопустотного железобетонного перекрытия. (2018). /Кру-

- ковський П., Ковалев А., Черненко К., Метель М., Абрамов А. // *Пожежна безпека*. 2012. 36. №21. сс. 85-94.  
<https://journal.ldubgd.edu.ua/index.php/PB/article/view/630>
3. **Varabash M.** Thermal stress state of reinforced concrete floor slab. /Varabash M., Romashkina M., Bashynska O. // *Strength of materials and theory of structures*. 2019. Issue. 103. pp.43-56.  
<https://doi.org/10.32347/2410-2547.2019.103.43-56>
  4. **Колякова В.М.; Божинський, М. О.** Порівняльний аналіз теплотехнічних розрахунків з даними отриманими при натурному випробуванні. // *Містобудування та територіальне планування*, Київ: КНУБА. 2016, Вип 61: 288-296 с.
  5. **Колякова В.М.; Божинський, М. О.** Дослідження напружено-деформованого стану залізо-бетонних колон при дії температурних впливів за допомогою ПК ЛІРА 9.6. // *Комунальне господарство міст*, 2009, 109: 27-32.
  6. **Дауров М.** Забезпечення живучості сталевих каркасів висотних будівель при дії пожежі. /Дауров М., Білик А. // *Містобудування та територіальне планування*. 2018. Вип. 66. сс. 134-140.  
<https://doi.org/10.32347/2410-2547.2019.102.62-68>
  7. **Daurov M.** Investigation of changes in steel frames stress state in fire and influence on its vitality. /Daurov M., Bilyk A. // *Strength of materials and theory of structures*. 2019. Issue. 108. pp.325-336.  
<https://doi.org/10.32347/2410-547.2022.108.325-336>
  8. **Фесенко О.** Розрахунок на вогнестійкість дерев'яних згинальних конструкцій за методикою Єврокоду 5. /Фесенко О., Колякова В., Дмитренко Є., Момотюк Д. // *Будівельні конструкції. Теорія і практика*. 2022. Вип. 10. сс. 94-107.  
<https://doi.org/10.32347/2522-4182.10.2022.94-107>
  9. **PD 6688-1-2:2007.** Справочний документ к британському національному приложенію к BS EN 1991-1-2 (с изменениями, внесенными в июне 2007 г.). // *Британский институт стандартов*. 2007. Лондон – 22с.
  10. **Розрахунок сталевих конструкцій на вогнестійкість відповідно до Єврокоду 3.** Практичний посібник до ДСТУ-Н EN 1993-1-2:2010 /Український Центр Сталевого Будівництва. – Київ, 2016. 81 с.
  11. **Городецкий А.** Компьютерные модели конструкций /Городецкий А., Евзеров Д. //М.: Изд-во АСВ, 2009. –360 с.
  12. **Зенкевич О.** Метод конечных элементов в технике. Монография. (Перевод с английского.) /Зенкевич О. //М.: Мир, 1975. — 543 с.
  13. **Клованич С.** Метод конечных элементов в нелинейных задачах инженерной механики /Клованич С. //Запорожье: Издательство журнала «Світ геотехніки», 2009, – 400 с.
  14. **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). //К.: Мінрегіонбуд України, 2012. – 98 с.
  15. **ДСТУ-Н Б EN 1992-1-2:2012.** Єврокод 2. Проектування залізобетонних конструкцій. Частина 1-2. Загальні положення. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість (EN 1992-1-2:2004, IDT). //К.: Мінрегіонбуд України, 2012. – 129 с.
  16. **Башинська О.** Розв'язання задачі теплопровідності. /Башинська О. // *Довідковий центр (База Знань). Компанія ЛІРА-САПР*. 2019 – 10 с.  
<https://help.liraland.com/uk-ua/high-technology-innovations/solving-the-problem-of-heat-conduction.html>
  17. **ДСТУ-Н Б EN 1991-1-2:2012.** Єврокод 1. Дії на конструкції. Частина 1-2. Загальні дії. Дії на конструкції під час пожежі (EN 1991-1-2:2002, IDT). //К.: Мінрегіонбуд України, 2011. – 74 с.

## REFERENCE

1. **Bilyk S.** Determination of changes in thermal stress state of steel beams in LIRA-SAPR software. /Bilyk S., Bashynska O., Bashynskyi O. // *Strength of materials and theory of structures*. 2022. Issue. 108. pp.189-202.  
<https://doi.org/10.32347/2410-547.2022.108.189-202>
2. **Krukovskyi P.** Modelyrovanye teplovoho sostoiannya y ohnestoikosty mnohopustotnoho zhelezobetonnoho perekrytya. (2018). / Krukovskyi P., Kovalev A., Chernenko K., Metel M., Abramov A. // *Pozhezhna bezpeka*. 2012. Issue. №21. pp. 85-94.  
<https://journal.ldubgd.edu.ua/index.php/PB/article/view/630>
3. **Varabash M.** Thermal stress state of reinforced concrete floor slab. /Varabash M., Romashkina

- M., Bashynska O. // *Strength of materials and theory of structures*. 2019. Issue. 103. pp.43-56. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2019.103.43-56>
4. **Koliakova V.M.; Bozhynskiy, M.O.** Porivnialnyi analiz teplotekhnichnykh rozrakhunkiv z danymy otrymanymy pry naturnomu vyprobuvanni. // *Mistobuduvannia ta terytorialne planuvannia*, Kyiv: KNUBA.- 2016, Issue 61: 288-296 pp.
  5. **Koliakova V.M.; Bozhynskiy, M.O.** Doslidzhennia napruzhenno-deformovanoho stanu zalizo-betonnykh kolon pry dii temperaturnykh vplyviv za dopomohoiu PK LYRA 9.6. // *Komunalne hospodarstvo mist*, 2009, Issue 109: pp. 27-32.
  6. **Daurov M.** Zabezpechennia zhyvuchosti stalevykh karkasiv vysotnykh budivel pry dii pozhezhi. / Daurov M., Bilyk A. // *Mistobuduvannia ta terytorialne planuvannia*. 2018. Issue. 66. pp. 134-140. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2019.102.62-68>
  7. **Daurov M.** Investigation of changes in steel frames stress state in fire and influence on its vitality. / Daurov M., Bilyk A. // *Strength of materials and theory of structures*. 2019. Issue. 108. pp.325-336. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2022.108.325-336>
  8. **Fesenko O.** Rozrakhunok na vohnestiikist derevianykh zghynalnykh konstruktsii za metodykoiu Yevrokodu 5. / Fesenko O., Koliakova V., Dmytrenko Ye., Momotiu D. // *Budivelni konstruktsii. Teoriia i praktyka*.. 2022. Issue. 10. pp. 94-107. <https://doi.org/10.32347/2522-4182.10.2022.94-107>
  9. **Spravochnii dokument k britanskomu natsyonalnomu prilozheniyu k BS EN 1991-1-2** (s izmeneniyami, vnesennimy v iyune 2007 h.). // *Britanskiy institut standartov*. 2007. London – 22p.
  10. **Rozrakhunok stalevykh konstruktsii na vohnestiikist vidpovidno do Yevrokodu 3.** Praktychnyi posibnyk do DSTU-N EN 1993-1-2:2010 // *Ukrainskyi Tsentri Stalevoho Budivnytstva*. – Kyiv, 2016. 81 p.
  11. **Horodetskiy A.** Kompiuternye modeli konstruktsiy / Horodetskiy A., Evzerov D. // *M.: Izd-vo ASV*, 2009. –360 p.
  12. **Zenkevich O.** Metod konechnykh elementov v tekhnike. Monohrafiya. (Perevod s anhliyskoho.) / Zenkevich O. // *M.: Mir*, 1975. — 543 p.
  13. **Klovanych S.** Metod konechnykh elementov v nelineynykh zadachakh inzhenernoy mekhaniki / Klovanych S. // *Zaporozhye: Izdatelstvo zhurnala «Svit heotekhniki»*, 2009, – 400 p.
  14. **DSTU-N B EN 1993-1-2:2010.** Yevrokod 3. Proektuvannia stalevykh konstruktsii. Chastyna 1-2. Zahalni polozhennia. Rozrakhunok konstruktsii na vohnestiikist (EN 1993-1-2:2005, IDT). // *K.: Minrehionbud Ukrainy*, 2012. – 98 p.
  15. **DSTU-N B EN 1992-1-2:2012.** Yevrokod 2. Proektuvannia zalizobetonnykh konstruktsii. Chastyna 1-2. Zahalni polozhennia. Rozrakhunok konstruktsii na vohnestiikist (EN 1992-1-2:2004, IDT). // *K.: Minrehionbud Ukrainy*, 2012.– 129 p.
  16. **Bashynska O.** Rozviazannia zadachi teploprovodnosti. / Bashynska O. // *Dovidkovyi tsestr (Baza Znan)*. Kompaniia LIRA-SAPR. 2019 – 10p. <https://help.liraland.com/uk-ua/high-technology-innovations/solving-the-problem-of-heat-conduction.html>
  17. **DSTU-N B EN 1991-1-2:2012.** Yevrokod 1. Dii na konstruktsii. Chastyna 1-2. Zahalni dii. Dii na konstruktsii pid chas pozhezhi (EN 1991-1-2:2002, IDT). // *K.: Minrehionbud Ukrainy*, 2011. – 74 p.

## ANALYSIS OF THE STRESS-STRAIN STATE OF A FIRE-RESISTANT STEEL FLOOR BEAM

Oleksii BASHYNSKYI,  
Olha BASHYNSKA

**Summary.** The article presents an improved methodology for numerical modeling of steel structural elements on the example of a floor beam, taking into account the influence of fire protection material. The article describes a step-by-step methodology for calculating fire resistance in LIRA-SAPR software, which shows in detail the principles of fire resistance analysis.

This methodology takes into account the nonlinear dependence of changes in the main thermal and technical characteristics of materials, such as the coefficient of thermal conductivity, heat capacity and convective heat transfer, on temperature. The influence of fire protection materials at high temperatures on the strength and

deformation characteristics of structural elements was analyzed.

The article also describes the distribution of temperature fields over the elements of the experimental section and investigates the change in temperature and strength characteristics of the steel I-beam of the floor as a function of time. Several options for fire protection using materials from a Ukrainian manufacturer are proposed. The effectiveness of the above materials is numerically verified. The analysis results of different fire protection options are compared, which allows you to choose the most optimal option. The results of analysis with and without taking into account the nonlinearity of materials are also compared and described. In addition, the article investigates the

role of the floor slab as a fire protection material. This makes it possible to determine the influence of the floor slab on the fire resistance of the structure and provide an additional level of safety.

The article will be useful for design engineers who work with steel structures, as well as for researchers interested in the impact of fire protection materials on fire resistance. It provides valuable scientific and practical information that can be used to improve the safety and reliability of steel structures in fire-resistant environments.

**Keywords.** Stress-strain state; finite element method; nonlinear thermal conductivity; fire resistance; LIRA-SAPR software.

*Стаття надійшла до редакції 08.05.2023*