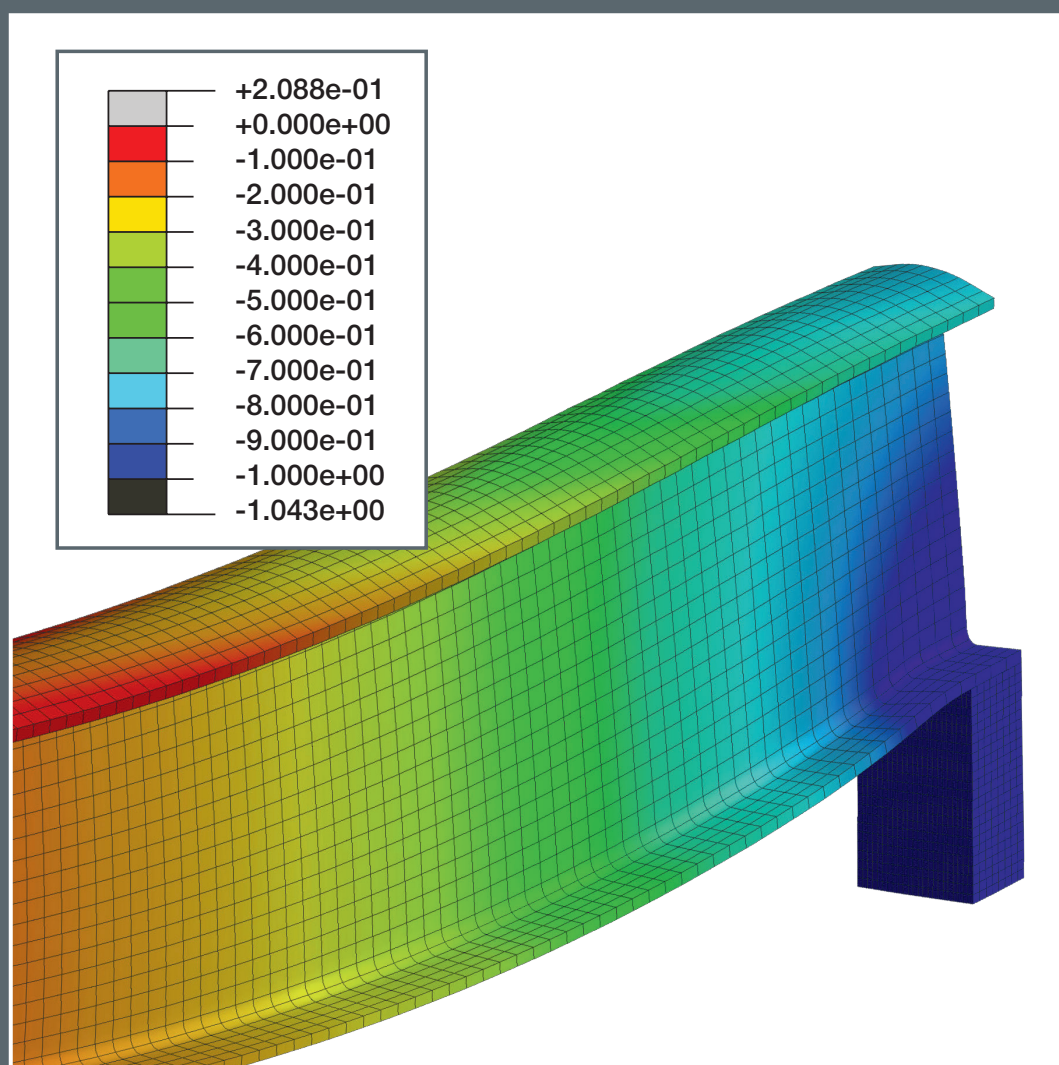




УКРАЇНСЬКИЙ ЦЕНТР
СТАЛЕВОГО
БУДІВНИЦТВА

РОЗРАХУНОК СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ НА ВОГНЕСТІЙКІСТЬ ВІДПОВІДНО ДО ЄВРОКОДУ 3

ПРАКТИЧНИЙ ПОСІБНИК ДО ДСТУ-Н EN 1993-1-2:2010



Український Центр Сталевого Будівництва
(УЦСБ)

РОЗРАХУНОК СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ НА ВОГНЕСТІЙКІСТЬ ВІДПОВІДНО ДО ЄВРОКОДУ 3

Практичний посібник
до ДСТУ-Н EN 1993-1-2:2010

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.

Розроблено до серії стандартів Єврокоду 3 «Проектування сталевих конструкцій».

Для архітекторів, проектувальників, інженерно-технічних працівників будівельних організацій, фахівців здійснюючих державний пожежний нагляд, а також студентів будівельних факультетів та факультетів пожежної безпеки вищих навчальних закладів

Схвалено рішенням Науково-технічної ради Мінрегіону від 21.04.2016 р. №27

Розроблено:

АСОЦІАЦІЯ «УКРАЇНСЬКИЙ ЦЕНТР СТАЛЕВОГО БУДІВНИЦТВА»:

К.В. Калафат – керівник комітету з вогнезахисту

А.С. Білик – к.т.н, керівник інженерного центру

М.А. Біляєв – провідний інженер-конструктор інженерного центру

Е.А. Ковалевська – провідний інженер-конструктор інженерного центру

Під редакцією К.В. Калафат

Незважаючи на те, що були вжиті всі заходи для забезпечення коректності даного посібника в межах відомих фактів або прийнятих на момент публікації посібника, Український Центр Сталевого Будівництва, автори та редактори не несуть відповідальності за будь-які помилки або невірні тлумачення цієї інформації та за будь-які втрати, пов'язані з її використанням. Викладені в посібнику думки є авторськими і можуть не співпадати з позицією фахівців в галузі будівництва.

© Украинский Центр Стального Строительства, 2016

ISBN 978-617-696-539-8

ПЕРЕДМОВА

У даному посібнику викладено методичні рекомендації для проектування сталевих конструкцій згідно Єврокоду 3 з урахуванням національних додатків України та вимог з вогнестійкості.

Поведінка конструкцій в умовах пожежі багато в чому обумовлена відповідним сценарієм пожежі та температурним режимом, що з ним пов'язаний. В роботі наведені основні варіанти температурно-часових залежностей, а розрахункові методи та довідкові матеріали дані для умов стандартного температурного режиму, який застосовується у більшості випадків.

Характеристики сталі змінюються при підвищеній температурі. У даному посібнику наведені та проілюстровані залежності властивостей сталі від температури.

Єврокоди дозволяють визначити вогнестійкість за допомогою спрощених або уточнених методів розрахунку. Посібник наводить класифікацію та опис методів розрахунку конструкцій на вогнестійкість та випадки, в яких вони застосовуються. Дається обґрунтування застосування у більшості випадків спрощених методів розрахунку, для яких наведений докладний алгоритм розрахунку та робочі приклади.

Детальний опис методу розрахунку, який наведений у даному посібнику розділений на дві основні частини:

Частина 1 – Розрахунок сталевих конструкцій, який виконується інженером-конструктором розділів КМ (конструкції металеві) та КМД (конструкції металеві деталювальні);

Частина 2 – Проектування вогнезахисту сталевих конструкцій, яке виконується розробниками проекту вогнезахисних робіт.

У першій частині дана теоретична база та довідкові матеріали для двох основних спрощених методів розрахунку за параметрами міцності та за критичною температурою. Друга частина доповнює першу та містить алгоритм розрахунку на етапах від отримання значень критичної температури до оформлення проекту виробництва вогнезахисних робіт. Для кожної з частин наведені робочі приклади, розділені за характером роботи розглянутих елементів конструкції (розтяг, стиск, згин і т. д.).

ЗМІСТ

1.	ВСТУП	6
1.1	Галузь застосування	6
1.2	Структура	6
2.	ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РОЗРАХУНКУ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ НА ВОГНЕСТІЙКІСТЬ	7
2.1	Основні принципи розрахунку конструкцій на вогнестійкість	7
2.2	Температурні режими пожеж	8
2.2.1	Номінальні температурно-часові залежності	8
2.2.2	Параметричні температурні режими	9
2.2.3	Робочий приклад	12
2.3	Методи розрахунку вогнестійкості конструкцій	15
2.3.1	Розрахункові методи за рівнями поділу конструктивної системи	16
2.3.2	Моделі розрахунку вогнестійкості конструкцій	17
2.4	Властивості матеріалів	18
2.4.1	Механічні властивості вуглецевих сталей	18
2.4.2	Теплотехнічні властивості вуглецевих сталей	19
3.	СПРОЩЕНІ МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ ВОГНЕСТІЙКОСТІ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ. ЧАСТИНА 1 – РОЗРАХУНОК СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ	21
3.1	Метод розрахунку за параметрами міцності при підвищеній температурі	21
3.1.1	Сфера застосування	22
3.1.2	Алгоритм (блок-схема) розрахунку вогнестійкості сталевих конструкцій та визначення необхідності їх вогнезахисту за параметрами міцності при підвищеній температурі.	21
3.1.3	Статичний розрахунок	22
3.1.4	Класифікація поперечних перерізів	23
3.1.5	Визначення коефіцієнта зниження η_{fi} для розрахунку рівня навантаження в умовах пожежі	25
3.1.6	Визначення розрахункових сполучень зусиль $E_{fi,d}$ в умовах пожежі	26
3.1.7	Визначення залежності несучої здатності від температури сталі	26
3.1.8	Робочі приклади	32
3.2	Метод розрахунку критичної температури	47
3.2.1	Сфера застосування	47
3.2.2	Алгоритм (блок-схема) розрахунку критичної температури сталевих конструкцій та визначення необхідності їх вогнезахисту	47
3.2.3	Робочі приклади	49
3.2.4	Розрахунок вогнестійкості з'єднань	55

4.	СПРОЩЕНІ МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ ВОГНЕСТІЙКОСТІ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ.	
	ЧАСТИНА 2 – ПРОЕКТУВАННЯ ВОГНЕЗАХИСТУ.	56
4.1	Визначення необхідної вогнестійкості конструкції	56
4.1.1	Загальні поняття	56
4.1.2	Методи визначення вогнестійкості сталевих конструкцій	57
4.1.3	Нормування класів вогнестійкості сталевих будівельних конструкцій	58
4.2	Розрахунок коефіцієнтів перерізу сталевих конструкцій.	58
4.2.1	Коефіцієнт перерізу незахищеної сталеві конструкції A_m/V , або профільний коефіцієнт перерізу	58
4.2.2	Коробчастий коефіцієнт перерізу сталеві конструкції A_{mk}/V	60
4.2.3	Прямокутний коефіцієнт перерізу сталеві конструкції $[A_m/V]_b$	60
4.2.4	Коефіцієнт перерізу сталеві конструкції, що вкрита вогнезахисним матеріалом A_p/V	60
4.2.5	Коефіцієнт перерізу сталеві конструкції з урахуванням тіньового ефекту $[A_m/V]_{sh}$	61
4.2.6	Робочі приклади	62
4.3	Визначення часу t_{cr} необхідного для досягнення критичної температури сталеві елемента $\theta_{a,cr}$	66
4.3.1	Розрахунок вогнестійкості незахищених сталевих конструкцій	66
4.3.2	Розрахунок вогнестійкості сталевих конструкцій, захищених вогнезахисними матеріалами	68
4.4	Визначення характеристик вогнезахисного покриття за критерієм критичної температури	70
4.4.1	Робочі приклади	71
	ДОДАТОК 1. Терміни та визначення	77
	ДОДАТОК 2. Позначення	78
	ДОДАТОК 3. Перелік нормативних документів та посилань	80

1. ВСТУП

1.1 Галузь застосування

Мета цього посібника: в першій частині – надати інженерам нормативну базу, довідкові матеріали та робочі приклади для розрахунку вогнестійкості сталевих конструкцій в будівлях та спорудах згідно з Єврокодами; у другій частині посібника наведено алгоритм дій для організацій, що виконують проектування вогнезахисту на об'єктах при використанні вогнезахисної продукції, що пройшла вогневі випробування відповідно до чинних стандартів.

Посібник узагальнює та зводить воедино інформацію з різних частин Єврокодів та містить основні довідкові матеріали, які дозволяють значно скоротити час проведення розрахунків.

Методи розрахунку, які докладно розглядаються у даному посібнику, припускають:

1. Розташування конструкцій всередині будівлі;
2. Рівномірний розподіл температури сталі по перерізу та по довжині;
3. Використання стандартної температурно-часової залежності;
4. Використання сталі S235-S460 за ДСТУ EN 10025 та всіх марок згідно з ДСТУ EN 10210-1 та ДСТУ EN 10219-1.

4.1 (1)Р
ДСТУ-Н Б
EN 1991-1-2

Проте слід розуміти, що прикладені та вимушені видовження й деформації конструкцій, що спричинені змінами температур внаслідок пожежі, викликають навантажувальні ефекти, окрім випадків, коли:

- впливи незначні або їх ефект є сприятливим;
- впливи враховані традиційно вибраними умовами спираючої та граничними умовами і/або беззастережно враховані традиційно визначеними протипожежними вимогами.

4.1 (2)
ДСТУ-Н Б
EN 1991-1-2

Також оцінка непрямих впливів повинна враховувати:

- вимушене теплове розширення конструкцій (наприклад, колон у багатопверхових каркасних будинках з діафрагмами жорсткості);
- різне теплове розширення статично невизначених конструкцій (наприклад, нерозрізних плит перекриття);
- температурні градієнти в поперечних перерізах, що спричиняють внутрішні напруження;
- теплове розширення прилеглих конструкцій (наприклад, зміщення верхньої частини колони через розширення плит перекриття або видовження підвісних тросів);
- теплове розширення конструкцій, що впливає на конструкції за межами протипожежного відсіку.

4.1 (3), (4)
ДСТУ-Н Б
EN 1991-1-2

Розрахункові значення непрямих впливів пожежі слід визначати на основі відповідних сценаріїв пожежі та розрахункових значень теплофізичних та термомеханічних характеристик матеріалу. Непрямі впливи від прилеглих конструкцій не розглядаються, якщо вимоги пожежної безпеки стосуються конструкцій, що розглядаються за стандартним температурним режимом пожежі.

Для конструкцій, до яких не можна застосувати припущення вказані в цьому розділі, слід керуватися відповідними частинами Єврокодів.

1.2 Структура

Всі розділи та параграфи у даному посібнику мають наскрізну нумерацію. Посилання на розділи та пункти документів, з яких береться те або інше правило, вказуються на полі кожної сторінки.

В Єврокодах розділяють принципи та правила застосування. Принципи маркуються буквою Р після номера розділу або пункту. Правила застосування – це загальноприйняті положення, які відповідають принципам та задовольняють їх вимогам. Це розділення збережене у даному посібнику.

Відомості щодо використання параметрів, який дозволено визначати на національному рівні (ПВНР), наводяться відповідно до обов'язкового Додатку НБ. «Національний додаток до ДСТУ-Н Б EN 1991-1-2:2010» Зміни №1 до ДСТУ-Н Б EN 1991-1-2:2010

Додаткова інформація наводиться на сірому фоні, наприклад, як даний текст. Є кілька типів такої інформації:

- пояснення правил Єврокодів;
- загальні пояснення до розрахунків (такі як переваги щодо вибору матеріалів та рішень);
- довідкова інформація (така як табличні дані, графіки та номограми, засновані на положеннях та формулах Єврокодів);
- додаткові правила проектування, взяті з допоміжних джерел.

Зверніть увагу, що в Єврокодах немає поняття додаткової інформації. Це просто інформація, взята з іншого джерела, яка доповнює Єврокоди, але не суперечить їм.

2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РОЗРАХУНКУ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ НА ВОГНЕСТІЙКІСТЬ

2.1 (3)P
ДСТУ-Н Б
EN 1990

- (1)P У разі пожежі повинен бути забезпечений достатній запас несучої здатності протягом необхідного періоду часу.

2.1 Основні принципи розрахунку конструкцій на вогнестійкість

5.1.4 (1)P
ДСТУ-Н Б
EN 1990

- (1)P Аналіз несучої конструкції з точки зору протипожежного захисту слід проводити з застосуванням встановлених для заданих розрахункових ситуацій моделей термічних та механічних впливів, а також параметрів несучої конструкції при підвищених температурах.

2.1.1. (1)P
ДСТУ-Н Б
EN 1993-1-2

- (2)P У випадках, коли потрібне забезпечення механічної міцності в умовах пожежі, сталеві конструкції повинні бути запроектовані та змонтовані таким чином, щоб вони могли виконувати свою несучу функцію протягом відповідного часу дії пожежі.

2.5 (2)
ДСТУ-Н Б
EN 1991-1-2

- (3) Вогнестійкість підтверджується виконанням наступних умов:

- у часових параметрах

$$t_{fi,d} \geq t_{fi,requ} \quad (2.1)$$

- у міцнісних параметрах

$$R_{fi,d,t} \geq E_{fi,d,t} \quad (2.2)$$

- у температурних параметрах

$$\theta_d < \theta_{cr,d} \quad (2.3)$$

де:

$t_{fi,d}$ – розрахункова межа вогнестійкості;

$t_{fi,requ}$ – нормативна межа вогнестійкості;

$R_{fi,d,t}$ – розрахункова несуча здатність елемента при пожежі у момент часу t ;

$E_{fi,d,t}$ – розрахунковий результат впливу при пожежі у момент часу t ;

θ_d – розрахункова температура матеріалу;

$\theta_{cr,d}$ – розрахункова критична температура матеріалу.

Порівняння за часовими параметрами напряду, як правило, застосовується тільки у випадку використання уточнених методів (їх ще називають просунутих методів) розрахунку вогнестійкості конструкцій. Непрямо у спрощених методах розрахунку воно використовується для визначення необхідності у вогнезахисті елемента.

При розрахунку за параметрами міцності визначається зменшена несуча здатність через необхідний проміжок часу. На цьому критерії ґрунтується спрощений метод розрахунку для сталевих елементів, схильних до втрати стійкості. Він використовується у комбінації з порівнянням за температурними та часовими параметрами.

Порівняння за температурними параметрами є найбільш поширеним методом згідно Єврокоду 3, коли визначається критична температура сталеві конструкції для встановленого рівня навантаження. Воно застосовується в обох докладно описаних даним посібником спрощених методах розрахунку.

Всі умови взаємопов'язані та одночасно враховуються розрахунком.

2.1 (1)
ДСТУ-Н Б
EN 1991-1-2

- (4) Розрахунок вогнестійкості конструкції включає наступні етапи:
- вибір можливих проектних сценаріїв пожежі;
 - визначення відповідних температурних режимів;
 - розрахунок підвищення температури в конструкціях (теплотехнічний розрахунок);
 - розрахунок механічних характеристик конструктивної системи в умовах пожежі (статичний розрахунок).

2.4.1. (1)
ДСТУ-Н Б
EN 1993-1-2

2.1 (3)
ДСТУ-Н Б EN 1991-1-2

5.1.4 (6)
ДСТУ-Н Б EN 1990

(5) Прийнята при аналізі модель конструктивної системи повинна відображати очікувану поведінку конструкції в умовах пожежі.

(6) Впливи на конструкції в умовах пожежі класифікуються як надзвичайні згідно з 6.4.3.3(4) ДСТУ-Н Б EN 1990.

(7) Поведінку елементів конструкції при підвищених температурах слід приймати нелінійною.

2.2 Температурні режими пожеж

2.3 (2)
ДСТУ-Н Б
EN 1991-1-2

НБ 2.2 Національний
додаток до
ДСТУ-Н Б
EN 1991-1-2

(1) Одним із основних критеріїв (див. п. 2.1(4)) для розрахунку вогнестійкості будь-якої будівельної конструкції є визначення температурно-часової залежності розвитку пожежі, яка повинна відноситись тільки до одного протипожежного відсіку будівлі, якщо в проектному сценарії розвитку пожежі не вказано інше. Розрізняють номінальні та параметричні температурні режими.

(2) Для проектування сталевих конструкцій у національних нормах проектування використовують номінальні температурні режими. Методи моделювання реальної пожежі можуть бути застосовані під час розробки заходів із протипожежного захисту будівель та споруд.

2.2.1 Номінальні температурно-часові залежності

3.2
ДСТУ-Н Б
EN 1991-1-2

(1) Номінальні температурні режими - це загальноприйняті режими розвитку пожежі, які приймаються для класифікації та підтвердження вогнестійкості різних будівельних матеріалів, виробів та конструкцій.

(2) ДСТУ-Н Б EN 1991-1-2 Єврокод 1 встановлює наступні номінальні температурні режими: стандартний температурний режим, температурний режим зовнішньої пожежі та вуглеводневий температурний режим (НС).

До загальноприйнятих номінальних режимів розвитку пожежі також відносяться: температурний режим пожежі, що розвивається повільно (Додаток В до ДСТУ Б В.1.1-4), модифікована температурно-часова залежність розвитку вуглеводневої пожежі (НСМ), режими розвитку пожежі у тунелях (криві залежності RWS, RABT ZTV та інші). Криві залежності деяких номінальних режимів розвитку пожежі представлені на Рисунок 2.1.

2.2.1.1 Стандартний температурний режим.

3.2.1
ДСТУ-Н Б
EN 1991-1-2

(1) Стандартний температурний режим пожежі – температурно-часова залежність, визначена в ISO 834, для представлення сценарію пожежі, що повністю розвивається в протипожежному відсіку.

(2) Стандартний температурний режим визначається за формулою:

$$\theta_g = 20 + 345 \lg(8t + 1), \quad (2.4)$$

де:

θ_g – температура газового середовища у протипожежному відсіку (°C);

t – час розвитку пожежі (хв).

2.2.1.2 Температурний режим зовнішньої пожежі

3.2.2
ДСТУ-Н Б
EN 1991-1-2

(1) Температурний режим зовнішньої пожежі створює умови менш жорсткі, ніж при випробуваннях у стандартному температурному режимі. Дану температурно-часову залежність використовують при визначенні межі вогнестійкості зовнішніх стін будівель.

(2) Температурний режим зовнішньої пожежі визначається за формулою:

$$\theta_g = 660 (1 - 0,687e^{-0,32t} - 0,313e^{-3,8t}) + 20, \quad (2.5)$$

де:

θ_g – температура газового середовища у протипожежному відсіку (°C);

t – час розвитку пожежі (хв).

2.2.1.3 Вуглеводневий температурний режим пожежі

- (1) Вуглеводневий температурний режим відноситься до більш жорстких режимів, ніж режим стандартної пожежі. Даний режим необхідно використовувати при визначенні межі вогнестійкості будівельних конструкцій, що застосовуються на об'єктах нафтової промисловості, температура горіння яких зростає значно швидше та має більші значення, ніж при горінні будь-яких інших будівельних та облицювальних матеріалів.

- (2) Температурний режим вуглеводневої пожежі визначається за формулою:

$$\Theta_g = 1080 (1 - 0,325e^{-0,167t} - 0,675e^{-2,5t}) + 20, \quad (2.6)$$

де:

Θ_g – температура газового середовища у протипожежному відсіку (°C);

t – час розвитку пожежі (хв).

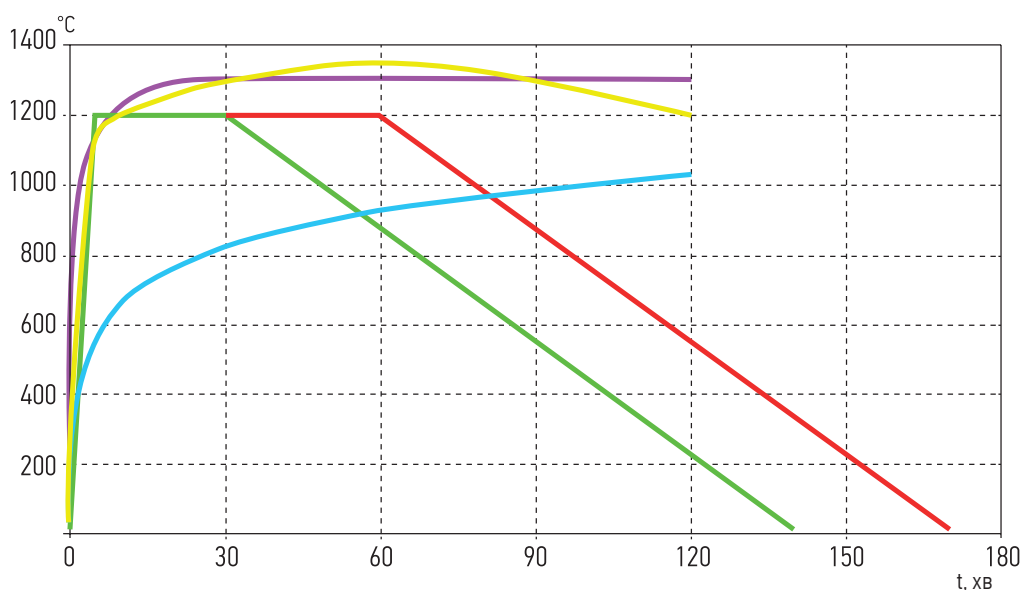


Рисунок 2.1 Номінальні температурно-часові залежності розвитку пожеж

- крива стандартного температурного режиму пожежі
- крива RABT ZTV (для автомобільних тунелів)
- крива RABT ZTV (для залізничних тунелів)
- крива вуглеводневого температурного режиму пожежі (HC)
- крива модифікованого температурного режиму пожежі (HCM)
- крива RWS (імітує горіння 50 м³ бензовозу в тунелях)

2.2.2 Параметрические температурно-временные зависимости

- (1) Параметрична температурні режими пожежі - це температурно-часові залежності, які встановлені на базі моделей пожежі та спеціальних фізичних параметрів, що визначають стан газового середовища у приміщенні при пожежі.
- (2) Розрізняють об'ємні пожежі (пожежі у протипожежному відсіку) та локалізовані пожежі. Для об'ємних пожеж розподіл температури в залежності від часу приймається рівномірним, а для локалізованих – нерівномірним.
- (3) Розрахунок температури газового середовища для пожеж у протипожежному відсіку повинен враховувати фізичні параметри приміщення, питоме пожежне навантаження, умови вентиляції і т. д.
- (4) Розрахунок температури (теплових впливів) газового середовища локальної пожежі повинен бути наведений при неможливості або малої ймовірності появи об'ємного займання.

2.2.2.1 Параметричні температурно-часові режими пожеж у протипожежних відсіках

(1) Додаток А
ДСТУ-Н Б
EN 1991-1-2

(1) Параметричні температурно-часові режими можуть бути застосовані для пожежних відсіків площею до 500 м², висотою до 4 метрів та без прорізів в покритті. За основу розрахунку приймається повне вигорання пожежного навантаження у відсіку, що розглядається.

(2) Параметричний температурно-часовий режим охоплює дві основні фази: фазу нагрівання та фазу охолодження.

(A1) Додаток А
ДСТУ-Н Б
EN 1991-1-2

(3) Температурний режим на стадії нагріву визначається за формулою:

$$\Theta_g = 20 + 1325 (1 - 0,324e^{-0,2t^*} - 0,204e^{-1,7t^*} - 0,472e^{-19t^*}), \quad (2.7)$$

де:

Θ_g – температура навколишнього газового середовища в протипожежному відсіку (°C);

$t^* = t \cdot \Gamma$ (год),

де:

t – час розвитку пожежі (год);

Γ – коефіцієнт, що включає в себе параметри протипожежного відсіку – теплопоглинальну здатність, питому теплоємність, теплопровідність, густину огорожувальних конструкцій, їх площу та площу вертикальних прорізів, висоту вікон, а також розрахункове питоме пожежне навантаження.

(A11 а, б, в)
Додаток А
ДСТУ-Н Б
EN 1991-1-2

(4) Температурний режим на стадії охолодження визначається за формулами:

$$\Theta_g = \Theta_{max} - 625 \cdot (t^* - t^*_{max} x), \text{ якщо } t^*_{max} < 0,5; \quad (2.8a)$$

$$\Theta_g = \Theta_{max} - 250 \cdot (3 - t^*_{max}) \cdot (t^* - t^*_{max} x), \text{ якщо } 0,5 < t^*_{max} < 2; \quad (2.8b)$$

$$\Theta_g = \Theta_{max} - 250 \cdot (t^* - t^*_{max} x), \text{ якщо } t^*_{max} > 2, \quad (2.8c)$$

де:

Θ_g – температура навколишнього газового середовища в протипожежному відсіку (°C);

Θ_{max} – максимальна температура (°C);

$t^* = t \cdot \Gamma$ (час);

t – час розвитку пожежі (год);

Γ – коефіцієнт, розрахований згідно з п. 2.2.2.1 (3);

$t^*_{max} = (0,2 \cdot 10^{-3} q_{t,d} / O) \cdot \Gamma$ (°C);

$q_{t,d}$ – розрахункове пожежне навантаження, віднесене до площі поверхні (МДж/м²);

$x = 1,0$, якщо $t_{max} > t_{lim}$, або $x = t_{lim} \cdot \Gamma / t^*_{max}$, якщо $t_{max} = t_{lim}$;

t_{lim} – час досягнення максимальної температури параметричної пожежі, що визначається пожежним навантаженням (год).

Додатки А та Е
ДСТУ-Н Б
EN 1991-1-2

(5) Час досягнення максимальної температури пожежі t_{lim} , який регулюється пожежним навантаженням, також залежить від функціонального призначення приміщень та приймається:

- 15 хвилин для швидкого розвитку пожежі (торгові центри, бібліотеки, кінотеатри);
- 20 хвилин для середнього розвитку пожежі (житлові та офісні приміщення, лікарні, школи, готелі);
- 25 хвилин для повільного розвитку пожежі (вокзали).

2.2.2.2 Розрахункові режими локалізованих пожеж

- (1) Оцінювання вогневих впливів локалізованих пожеж не має широкого застосування на практиці, однак при необхідності допускається проведення розрахунків різних сценаріїв локалізованих пожеж згідно з Додатком С до ДСТУ-Н Б EN 1991-1-2. При цих розрахунках враховується два основних параметри: довжині полум'я та висота приміщення.
- (2) При виконанні розрахунків розглядаються два основні сценарії локалізованих пожеж: коли довжина полум'я (L_f) менше висоти приміщення (H) та коли довжина полум'я більше висоти приміщення (Рисунок 2.2).

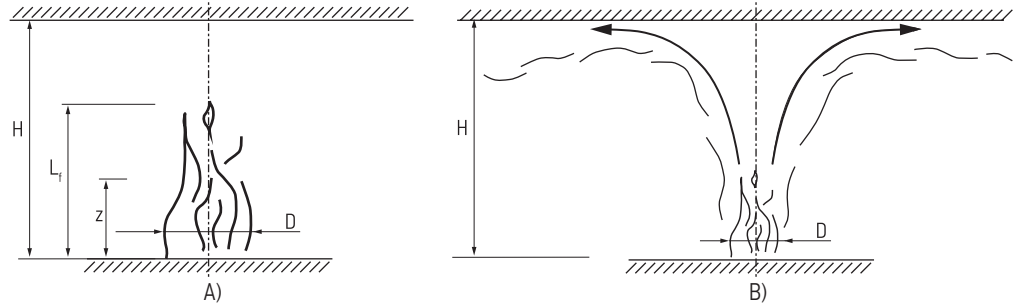


Рисунок 2.2 Розвиток локалізованої пожежі

А) $H > L_f$

В) $H \leq L_f$

- (3) Наведені моделі локалізованих пожеж найчастіше використовуються для розрахунку теплових впливів (в умовах теплового потоку в результаті дії радіаційної складової потоку та його конвекційної складової) на горизонтальні елементи сталевих конструкцій.
- (4) Підходи до розрахункових режимів локалізованої пожежі обмежені випадками, коли діаметр пожежі D складає менше 10 м, а швидкість теплового потоку Q менше 50 МВт.

Приклади деяких варіантів параметричних режимів розвитку пожежі представлені на Рисунку 2.3.

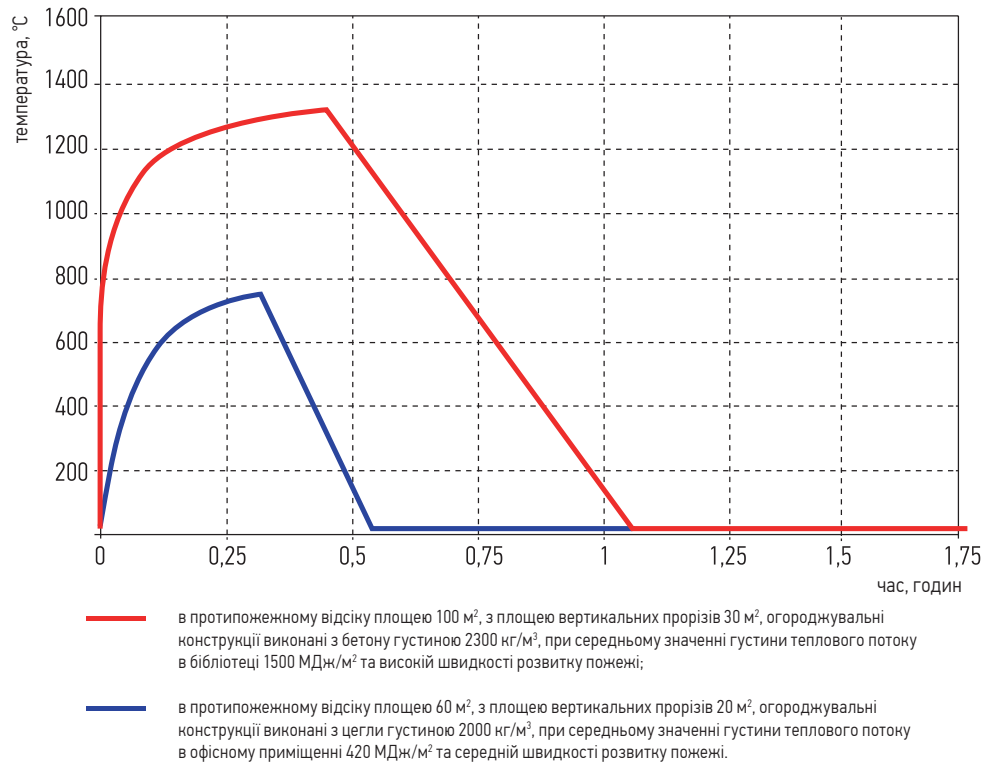


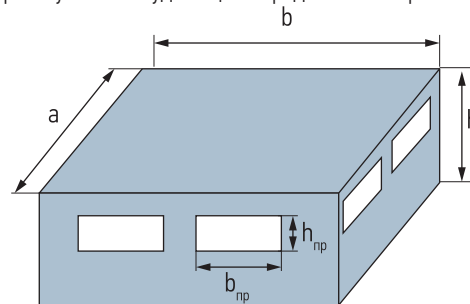
Рисунок 2.3 Приклади параметричних температурних режимів розвитку пожеж.

2.2.3 Робочий приклад

Формули або параметри, відмічені на полях даного розділу символом IND, відносяться тільки до даного прикладу.

2.2.3.1 Приклад розрахунку параметричної температурно-часової залежності в офісній будівлі

Вихідні дані: Протипожежний відсік розміром 12×15 м
Висота приміщення - 3,6 м
Середня висота вікон на всіх стінах, $h_{eq} = 1,6$ м
Загальна площа вертикальних прорізів - 25,2 м²
Матеріал огорожувальних конструкцій - бетон
При проектуванні та будівництві передбачені всі протипожежні заходи



1. 1. Визначення геометричних параметрів приміщення:

- площа приміщення A_f
 $A_f = a \times b = 12 \times 15 = 180 \text{ м}^2$;
- площа вертикальних прорізів A_v
 $A_v = n \times h_{pr} \times b_{pr} = 12 \times 1,5 \times 1,4 = 25,2 \text{ м}^2$
(n - кількість прорізів);
- загальна площа огорожувальних конструкцій A_t
 $A_t = 2ab + 2ah + 2bh = 2 \times 12 \times 15 + 2 \times 12 \times 3,6 + 2 \times 15 \times 3,6 = 554,4 \text{ м}^2$;
- коефіцієнт врахування прорізів O
 $O = A_v \times (h_{eq})^{0,5} / A_t = 25,2 \times 1,6^{0,5} / 554,4 = 0,0575 \text{ м}^{0,5}$.

Довідкові дані,
IND

2. Характеристики огорожувальних конструкцій приміщення:

- густина матеріалу огорожувальних конструкцій (бетон), $\rho = 2300 \text{ кг/м}^3$;
- питома теплоємність поверхні огорожувальних конструкцій, $c = 1000 \text{ Дж/кгК}$;
- коефіцієнт теплопровідності огорожувальних конструкцій, $\lambda = 1,6 \text{ Вт/мК}$;

3. Розрахунок пожежного навантаження:

- розрахункове питоме пожежне навантаження, приведене до сумарної площі поверхні огорожувальних конструкцій A_t , визначається за формулою:

$$q_{t,d} = q_{f,d} \times A_f / A_t$$

де:

$q_{f,d}$ – розрахункове питоме пожежне навантаження, приведене до сумарної площі підлоги A_f (МДж/м²);

- розрахункове питоме пожежне навантаження визначається за формулою:

$$q_{f,d} = q_{f,k} \times m \times \delta_{q1} \times \delta_{q2} \times \delta_{qn}$$

де:

- m – коефіцієнт повноти згоряння. Для більшості целюлозних матеріалів коефіцієнт приймається 0,8;
- δ_{q1} – коефіцієнт урахування ризику виникнення пожежі, що залежить від розмірів протипожежного відсіку;
- δ_{q2} – коефіцієнт урахування ризику виникнення пожежі в залежності від призначення приміщення;
- δ_{qn} – коефіцієнт, що враховує наявність спеціальних заходів (протипожежних заходів) для гасіння пожежі. Для звичайних рішень протипожежних заходів коефіцієнт приймається 1,0. Якщо протипожежні заходи не передбачені, коефіцієнт приймається 1,5;
- $q_{f,k}$ – нормативне пожежне навантаження, приведене до площі поверху (МДж/м²). Середнє значення для офісних приміщень 420 МДж/м².

(7) Додаток А
ДСТУ-Н Б
EN 1991-1-2

Е.1 (3)
Додаток Е
ДСТУ-Н Б EN 1991-1-2

Е.3 (2)
Додаток Е
ДСТУ-Н Б EN 1991-1-2, IND
Таблиця Е.1 Додаток Е
ДСТУ-Н Б EN 1991-1-2
Таблиця Е.1 Додаток Е
ДСТУ-Н Б EN 1991-1-2
Таблиця Е.2; Е.1 (4)
Додаток Е
ДСТУ-Н Б EN 1991-1-2 IND
Таблиця Е.4
Додаток Е
ДСТУ-Н Б EN 1991-1-2

(3) Додаток А
ДСТУ-Н Б
EN 1991-1-2

Таким чином:

$$q_{f,d} = 420 \times 0,8 \times 1,5 \times 1 \times 1 = 504 \text{ МДж/м}^2;$$

$$q_{t,d} = 504 \times 180/554,4 = 163,6 \text{ МДж/м}^2.$$

4. Температурний режим параметричної пожежі у фазі нагріву визначається за формулою:

$$\Theta_g = 20 + 1325 (1 - 0,324e^{-0,2t^*} - 0,204e^{-1,7t^*} - 0,472e^{-19t^*}),$$

де:

$$t^* = t \times \Gamma;$$

$$\Gamma = (O/b)^2 / (0,04/1160)^2;$$

$$b = (\rho c \lambda)^{0,5};$$

t – час (годин).

Таким чином:

$$b = (2300 \times 1000 \times 1,6)^{0,5} = 1918,333 \text{ Дж/м}^2\text{с}^{0,5}\text{К};$$

$$\Gamma = (0,0575/1918,333)^2 / (0,04/1160)^2 = 0,7558;$$

$$\Theta_g = 20 + 1325 (1 - 0,324e^{-0,1512t} - 0,204e^{-1,2849t} - 0,472e^{-14,36t}).$$

(3), (7) Додаток А
ДСТУ-Н Б
EN 1991-1-2

5. Розрахунок максимальної температури пожежі Θ_{max} :

- максимальна температура у фазі нагріву настає при $t_{max} = t^*_{max}$,

$$\Theta_{max} = 20 + 1325 (1 - 0,324e^{-0,2t^*_{max}} - 0,204e^{-1,7t^*_{max}} - 0,472e^{-19t^*_{max}});$$

IND

$$t^*_{max} = t_{max} \times \Gamma;$$

$$t_{max} = 0,0002 \times q_{t,d} / O \text{ або } t_{max} = t_{lim}.$$

Величина t_{max} приймається більшою з двох значень: або обчислене за формулою, або значення, що відповідає t_{lim} .

(10) Додаток А;
Таблиця Е.5
Додаток Е
ДСТУ-Н Б
EN 1991-1-2

- час досягнення максимальної температури пожежі t_{lim} для середнього розвитку пожежі приймається 20 хвилин (0,333 години).

$$t_{lim} = 0,333 \text{ год};$$

$$t_{max} = 0,0002 \times 163,6 / 0,0575 = 0,569 \text{ год}.$$

Таким чином, у якості t_{max} приймається значення, рівне 0,569 год.

$$t^*_{max} = 0,569 \times 0,7558 = 0,43 \text{ год};$$

$$\Theta_{max} = 20 + 1325 (1 - 0,324e^{-0,2 \times 0,43} - 0,204e^{-1,7 \times 0,43} - 0,472e^{-19 \times 0,43}) = 820,8^\circ\text{C}.$$

(11) Додаток А
ДСТУ-Н Б
EN 1991-1-2

6. Температурний режим параметричної пожежі у фазі охолодження (для $t^*_{max} \leq 0,5$) визначається за формулою:

$$\Theta_g = \Theta_{max} - 625(t^* - t^*_{max} \times X),$$

IND

де:

$$t^* = t \times \Gamma;$$

$$t^*_{max} = t_{max} \times \Gamma;$$

$$X = I \text{ при } t_{max} > t_{lim}.$$

IND

Таким чином, температурний режим в стадії охолодження:

$$\Theta_g = 820,8 - 625(t^* - 0,43 \times I);$$

$$\Theta_g = 820,8 - 625(0,7558 \times t - 0,43) = 1089,55 - 472,38t.$$

7. Висновок.

Температурний режим (таблиця 2.1, рисунок 2.4) параметричної пожежі у відповідності з умовами задачі буде визначатися залежностями температури в протипожежному відсіку Θ_g (°C) в момент часу t (годин):

- у фазі нагріву (фаза нагріву триватиме 34 хвилини, при цьому температура досягне 820°C)

$$\Theta_g = 20 + 1325 (1 - 0,324e^{-0,1512t} - 0,204e^{-1,2849t} - 0,472e^{-14,36t});$$

- у фазі охолодження (фаза охолодження розпочнеться з 35-ої хвилини та буде продовжуватися до повного охолодження):

$$\Theta_g = 1089,55 - 472,38t.$$

Таблиця 2.1 Залежність температури в протипожежному відсіку Θ_g в момент часу t при заданих вихідних даних

t, хв	Θ_g , °C	t, хв	Θ_g , °C	t, хв	Θ_g , °C
0	20,0	45	735,3	105	262,9
15	718,3	60	617,2	120	144,8
30	804,3	75	499,1	135	26,7
34	820,8	90	381,0	150	20,0

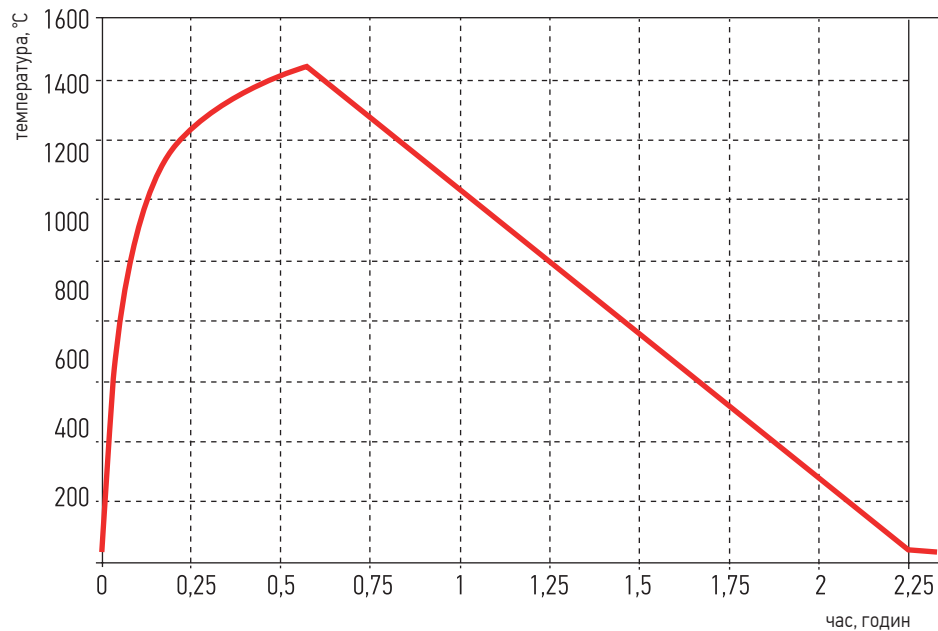


Рисунок 2.4 Параметрична температурно-часова залежність розвитку пожежі в офісному приміщенні при заданих параметрах

2.3 Методи розрахунку вогнестійкості конструкцій

(1) Варіанти методів розрахунку вогнестійкості схематично наведені на Рисунку 2.5.

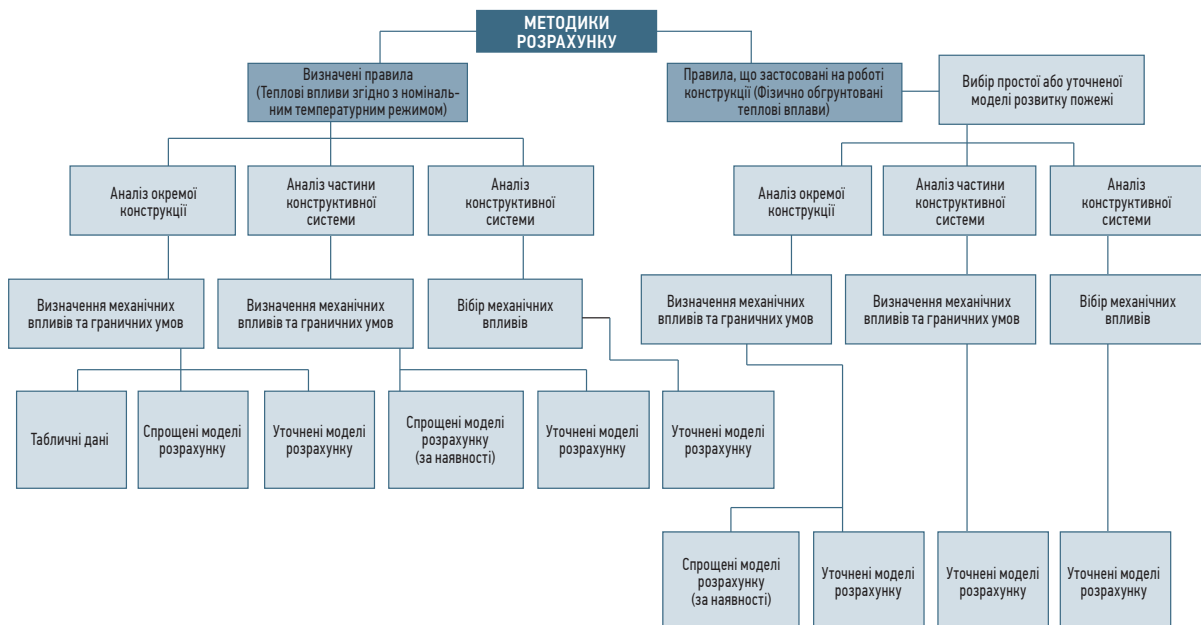


Рисунок 2.5 Варіанти методів розрахунку

ДСТУ-Н Б EN 1991-1-2 та ДСТУ-Н Б EN 1993-1-2 розрізняють наступні підходи для розрахунку:

1. За обраними температурними режимами, які поділяються на:

- (а) номінальні - загальноприйняті залежності відповідно до ДСТУ-Н Б EN 1991-1-2, до яких відносяться:
 - стандартний температурний режим;
 - температурний режим зовнішньої пожежі;
 - температурний режим пожежі вуглеводнів;
- (б) параметричні - залежності, визначені на базі моделей пожежі та спеціальних фізичних параметрів, що визначають стан середовища в приміщенні при пожежі.

Більш докладно про температурні режими - див. Розділ 2.2 цього Посібника.

2. В залежності від прийнятій розрахунковій моделі:

- (а) аналіз окремої конструкції;
- (б) аналіз частини конструктивної системи;
- (в) аналіз всієї конструктивної системи.

Більш докладно про класифікацію за рівнями поділу конструктивної системи - див. Розділ 2.3.1 цього Посібника.

3. В залежності від цього можуть застосовуватися:

- (а) розрахунок вогнестійкості за табличними даними;
- (б) спрощені методи розрахунку;
- (в) уточнені методи розрахунку;
- (г) випробування.

Більш докладний опис окремих методів розрахунку - див. Розділ 2.3.2 цього Посібника.

2.3 (3)
ДСТУ-Н Б
EN 1991-1-2

Примітка 2
до 2.4.1(3)
ДСТУ-Н Б
EN 1993-1-2

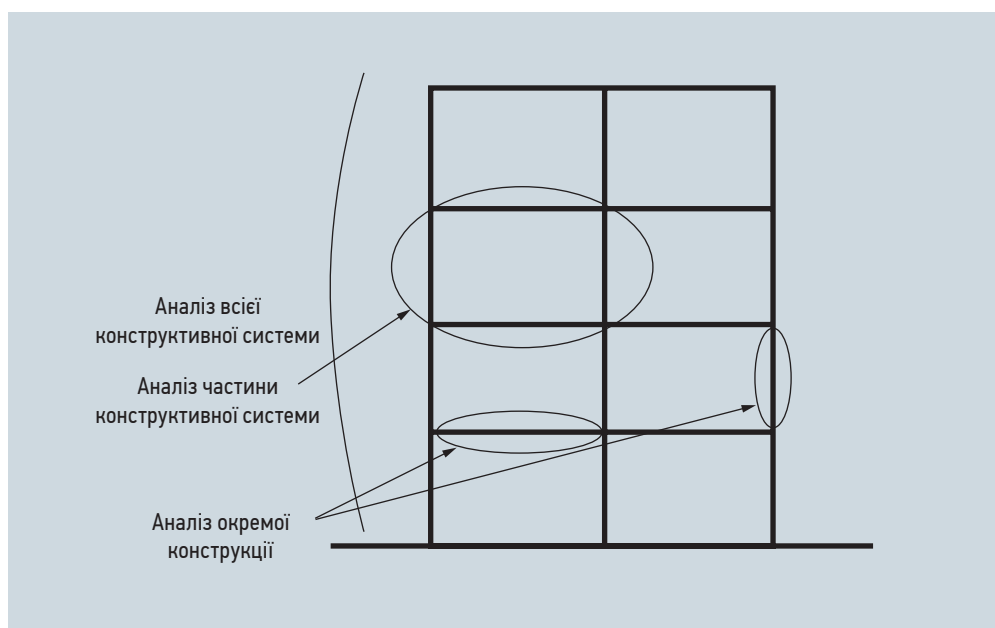
- (4) Якщо для конструкцій національні норми встановлюють вимоги щодо вогнестійкості, за розрахункову приймається стандартний температурний режим пожежі, якщо не встановлено інше.
- (5) Для перевірки відповідності нормованим вимогам щодо вогнестійкості достатньо проведення аналізу окремої конструкції.

Для аналізу окремих елементів конструкції більш раціонально застосовувати спрощені розрахункові моделі та метод табличних даних.

2.3.1 Розрахункові методи за рівнями поділу конструктивної системи

5.1.4 (2)
ДСТУ-Н Б
EN 1990

- (1) Відповідність характеристикам, які вимагаються від конструкції, що зазнає впливи від дії пожежі, повинна здійснюватися на підставі аналізу всієї конструктивної системи, підсистем конструктивної системи - її частин або окремих елементів конструкції, а також за табличними чи дослідними даними.



Умовний розподіл конструктивної системи наведено на Рисунку 2.6.

2.3.1.1 Розрахунок окремої конструкції

2.4.2 (5)
ДСТУ-Н Б
EN 1993-1-2

- (1) При такому методі розрахунку кожна конструкція розглядається окремо, враховуючи відповідні впливи та граничні умови на опорах.
- (2) Граничні умови на опорах та краях конструкції можуть бути прийняті незмінними протягом всього часу впливу пожежі.

Цього методу достатньо для більшості випадків - див. Розділ 2.3 (5) цього Посібника.

2.3.1.2 Розрахунок частини конструктивної системи

2.4.3 (3)
ДСТУ-Н Б
EN 1993-1-2

2.4.3 (4)
ДСТУ-Н Б
EN 1993-1-2

2.4.3 (5)
ДСТУ-Н Б
EN 1993-1-2

- (1) Поділ конструктивної системи на підсистеми проводиться на підставі аналізу можливих температурних розширень та деформацій таким чином, щоб їх взаємодію можна було оцінити за допомогою незалежних від часу граничних умов та схеми спірання протягом усієї тривалості пожежі.
- (2) При розрахунку частини конструктивної системи повинні прийматися до уваги прийнята схема руйнування при впливі пожежі, характеристики матеріалів в залежності від температури їх нагріву, жорсткість конструкцій, результати впливу температурних розширень та деформацій (непрямі дії пожежі).
- (3) Граничні умови на опорах та зусилля, що діють на границях частини конструктивної системи можуть бути прийняті як незмінні протягом всього часу впливу пожежі.

2.4.4 (1)
ДСТУ-Н Б
EN 1993-1-2

2.3.1.3 Розрахунок усієї конструктивної системи

- (1) Аналіз усієї конструктивної системи в умовах пожежі повинен включати обґрунтування прийнятої схеми руйнування, характеристики матеріалів в залежності від температури їх нагріву, жорсткості конструкцій, результатів температурних розширень та деформацій (непрямі впливи пожежі).

Розрахунок частини конструктивної системи та всієї конструкції використовується в уточнених моделях визначення вогнестійкості, які виконуються з застосуванням відповідних програмних продуктів, заснованих на Методі Скінченних Елементів (МСЕ) та Методі Кінцевих Різниць (МКР). Уточнені моделі застосовні також при розрахунку окремих конструкцій.

2.3.2 Моделі розрахунку вогнестійкості конструкцій

2.3.2.1 Спрощені розрахункові моделі

Розрахунковий метод, описаний у стандарті ДСТУ-Н Б EN 1993-1-2, заснований на спрощеній розрахунковій моделі, яка аналізує окремі елементи конструкції, що працюють на розтяг, стиск, згин тощо (Розділ 3.1). У цьому стандарті також наведено спрощений метод розрахунку критичної температури (Розділ 3.2)

2.3.2.2 Уточнені розрахункові моделі

4.3.1.(1)
ДСТУ-Н Б
EN 1993-1-2

- (1) Уточнені методи розрахунку повинні забезпечувати реалістичний аналіз конструктивної системи, що піддається впливу пожежі. Вони повинні ґрунтуватися на основній фізичній поведінці таким чином, щоб забезпечувати прийнятний рівень наближення до очікуваної поведінки відповідного конструктивного елемента в умовах пожежі.

4.3.1.(3)
ДСТУ-Н Б
EN 1993-1-2

- (2) Уточнені методи розрахунку повинні включати окремі розрахункові моделі для визначення:
 - збільшення та розподілу температури всередині конструктивних елементів (теплотехнічний розрахунок);
 - механічної поведінки конструктивної системи або будь-якої її частини (статичний розрахунок).

4.3.2.(2)
ДСТУ-Н Б
EN 1993-1-2

- (3) Модель теплотехнічного розрахунку (або теплова реакція) повинна розглядати:
 - відповідний тепловий вплив, встановлений у ДСТУ-Н Б EN 1991-1-2;
 - зміну теплотехнічних властивостей матеріалу в залежності від температури – див. Розділ 2.4.

4.3.3.(3)
ДСТУ-Н Б
EN 1993-1-2

- (4) Модель статичного розрахунку (або механічна реакція) також повинна враховувати:
 - загальний вплив механічних ефектів, геометричних відхилень та теплових впливів;
 - температурну залежність механічних властивостей матеріалу – див. Розділ 2.4;
 - вплив геометричної нелінійності;
 - вплив неоднорідності характеристик матеріалу, включаючи несприятливі ефекти внаслідок навантаження та розвантаження несучої конструкції.

Як зазначалося вище, уточнені розрахункові моделі створюються за допомогою спеціального програмного забезпечення.

2.3.2.3 Визначення вогнестійкості за допомогою табличних даних

Такий метод в якості альтернативи може застосовуватися для сталезалізобетонних конструкцій. ДСТУ-Н Б EN 1994-1-2 також містить спрощені методи розрахунку, але додатково дає табличні дані, які визначають необхідні геометричні параметри конструкцій, для яких допускається приймати стандартні межі вогнестійкості.

2.3.2.4 Визначення вогнестійкості на підставі випробувань

2.4.1 (4)
ДСТУ-Н Б
EN 1993-1-2

- (1) Як альтернативний варіант проектування розрахунковим методом, протипожежні рішення можуть бути обґрунтовані експериментально за результатами вогневих випробувань або поєднанням розрахункового та експериментального методів. Більш докладно у Розділі 4.1.2.3.

2.4 Властивості матеріалів

При підвищеній температурі всі матеріали змінюють свої характеристики, тому для встановлення залежності несучої здатності елемента конструкції від температури, необхідні дані щодо характеру зміни міцності матеріалу. Крім того, наскільки для визначення швидкості нагрівання елемента до температури, при якій він вже не здатний витримувати навантаження, що діють на нього в умовах пожежі, необхідно провести теплотехнічний розрахунок виходячи з відповідних властивостей матеріалу. Тому для заданого матеріалу необхідно мати дані для діапазону температур, що досягаються при розрахунковій пожежі.

2.4.1 Механічні властивості вуглецевих сталей

- (1) Розрахункові значення механічних (міцнісних та деформаційних) характеристик матеріалу X_{dfi} визначаються за формулою:

$$X_{dfi} = \frac{k_{\theta} X_k}{\gamma_{Mfi}}, \quad (2.9)$$

де:

X_k – характеристичне значення міцнісних або деформаційних характеристик (зазвичай f_k або E_k) по ДСТУ-Н Б EN 1993-1-1 при нормальній температурі;

k_{θ} – коефіцієнт зниження міцнісних або деформаційних характеристик ($X_{k\theta}/X_k$), залежний від температури матеріалу, див. п. 2.4.1.1;

$\gamma_{Mfi} = 1.0$ – коефіцієнт надійності для відповідної характеристики матеріалу в умовах пожежі.

2.4.1.1 Міцність та деформація

- (1) В Таблиці 2.2 наведені значення коефіцієнтів зниження для діаграми деформування сталі при підвищених температурах, зображеної на Рисунку 2.7. Понижуючі коефіцієнти визначаються наступним чином:

- відношення розрахункової границі текучості до границі текучості при 20°C

$$k_{y,\theta} = f_{y,\theta} / f_y; \quad (2.10)$$

- відношення межі пружності до границі текучості при 20°C

$$k_{p,\theta} = f_{p,\theta} / f_y; \quad (2.11)$$

- відношення кута нахилу лінійної ділянки області пружних деформацій до кута нахилу кривої при 20°C

$$k_{E,\theta} = E_{a,\theta} / E_a; \quad (2.12)$$

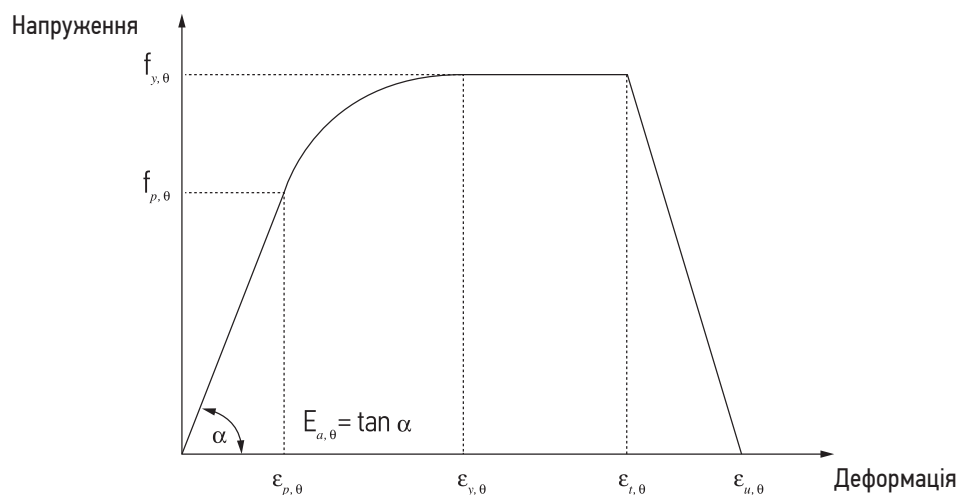


Рисунок 2.7 Діаграма «напруження-деформації» для вуглецевих сталей за підвищеної температури

2.3 (1)
ДСТУ-Н Б
EN 1993-1-2

3.2.1 (3)
ДСТУ-Н Б
EN 1993-1-2

Таблиця 2.2 Коефіцієнти зниження для діаграми деформування вуглецевих сталей

Температура сталі $\theta_a, ^\circ\text{C}$	Коефіцієнти зниження при температурі сталі θ_a відносно значень f_y и E_a при 20°C		
	Коефіцієнт зниження (відносно f_y) розрахункової границі текучості $k_{y,\theta} = f_{y,\theta}/f_y$	Коефіцієнт зниження (відносно f_y) межі пружності $k_{p,\theta} = f_{p,\theta}/f_y$	Коефіцієнт зниження (відносно E_a) для похилої лінійної ділянки області пружних деформацій $k_{E,\theta} = E_{a,\theta}/E_a$
20	1.000	1.000	1.000
100	1.000	1.000	1.000
200	1.000	0.807	0.900
300	1.000	0.613	0.800
400	1.000	0.420	0.700
500	0.780	0.360	0.600
600	0.470	0.180	0.310
700	0.230	0.075	0.130
800	0.110	0.050	0.090
900	0.060	0.0375	0.0675
1000	0.040	0.0250	0.0450
1100	0.020	0.0125	0.0225
1200	0.000	0.0000	0.0000

Примітка. Значення коефіцієнтів для проміжних температур визначається лінійною інтерполяцією

2.4.1.2 Густина

- (1) Густина сталі ρ_a може прийматися не залежною від її температури. При розрахунках допускається використання наступного значення $\rho_a = 7850 \text{ кг/м}^3$.

2.4.2 Теплотехнічні властивості вуглецевих сталей

- (1) Розрахункові значення теплотехнічних характеристик матеріалу $X_{d,fi}$ визначаються наступним чином:
- якщо збільшення характеристики сприятливо для забезпечення безпеки:

$$X_{d,fi} = \frac{X_{k,\theta}}{\gamma_{M,fi}}; \quad (2.13)$$

- якщо збільшення характеристики несприятливо для забезпечення безпеки:

$$X_{d,fi} = \gamma_{M,fi} X_{k,\theta}, \quad (2.14)$$

де:

$X_{k,\theta}$ – значення характеристики матеріалу при розрахунковій пожежі, як правило, залежить від температури матеріалу, див. нижче;

$\gamma_{M,fi} = 1.0$ – коефіцієнт надійності для відповідної характеристики матеріалу в умовах пожежі.

2.4.2.1 Температурне видовження

- (1) Відносне видовження сталі від дії температури $\Delta l/l$ визначається наступним чином:
- для $20^\circ\text{C} \leq \theta_a < 750^\circ\text{C}$

$$\frac{\Delta l}{l} = 1,2 \cdot 10^{-5} \theta_a + 0,4 \cdot 10^{-8} \theta_a^2 - 2,416 \cdot 10^{-6}; \quad (2.15a)$$

- для $750^{\circ}\text{C} \leq \theta_a \leq 860^{\circ}\text{C}$

$$\frac{\Delta l}{l} = 1,1 \cdot 10^{-2}; \quad (2.15b)$$

- для $860^{\circ}\text{C} < \theta_a \leq 1200^{\circ}\text{C}$

$$\frac{\Delta l}{l} = 2 \cdot 10^{-5} \theta_a - 6,2 \cdot 10^{-3}, \quad (2.15c)$$

де:

l – довжина при 20°C ;

Δl – приріст довжини, викликаний зростанням температури;

θ_a – температура сталі ($^{\circ}\text{C}$).

2.4.2.2 Питома теплоємність

Питома теплоємність матеріалу — це об'єм теплової енергії, необхідної для збільшення температури одиниці маси на 1 К (одиниця виміру — Дж/кг · К).

3.4.1.2 (1)
ДСТУ-Н Б
EN 1993-1-2

- (1) Питома теплоємність сталі c_a визначається:

- для $20^{\circ}\text{C} \leq \theta_a < 600^{\circ}\text{C}$

$$c_a = 425 + 7,73 \cdot 10^{-1} \theta_a - 1,69 \cdot 10^{-3} \theta_a^2 + 2,22 \cdot 10^{-6} \theta_a^3 \text{ Дж/(кгК)}; \quad (2.16a)$$

- для $600^{\circ}\text{C} \leq \theta_a < 735^{\circ}\text{C}$

$$c_a = 666 + \frac{13\,002}{738 - \theta_a} \text{ Дж/(кгК)}; \quad (2.16b)$$

- для $735^{\circ}\text{C} \leq \theta_a < 900^{\circ}\text{C}$

$$c_a = 545 + \frac{17\,820}{\theta_a - 731} \text{ Дж/(кгК)}; \quad (2.16c)$$

- для $900^{\circ}\text{C} \leq \theta_a \leq 1200^{\circ}\text{C}$

$$c_a = 650 \text{ Дж/(кгК)}; \quad (2.16d)$$

де:

θ_a – температура сталі ($^{\circ}\text{C}$).

2.4.2.3 Теплопровідність

Теплопровідність матеріалу — це об'єм теплової енергії, який проходить за секунду через одиницю площі поперечного перерізу матеріалу для одиниці температурного градієнта (одиниця виміру — Вт/м · К).

3.4.1.3 (1)
ДСТУ-Н Б
EN 1993-1-2

- (1) Теплопровідність сталі визначається наступним чином:

- для $20^{\circ}\text{C} \leq \theta_a < 800^{\circ}\text{C}$

$$\lambda_a = 54 - 3,33 \cdot 10^{-2} \theta_a \text{ Вт/(мК)}; \quad (2.17a)$$

- для $800^{\circ}\text{C} \leq \theta_a \leq 1200^{\circ}\text{C}$

$$\lambda_a = 27,3 \text{ Вт/(мК)}; \quad (2.17b)$$

де:

θ_a – температура сталі ($^{\circ}\text{C}$).

3. СПРОЩЕНІ МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ ВОГНЕСТІЙКОСТІ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ.

ЧАСТИНА 1 - РОЗРАХУНОК СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ

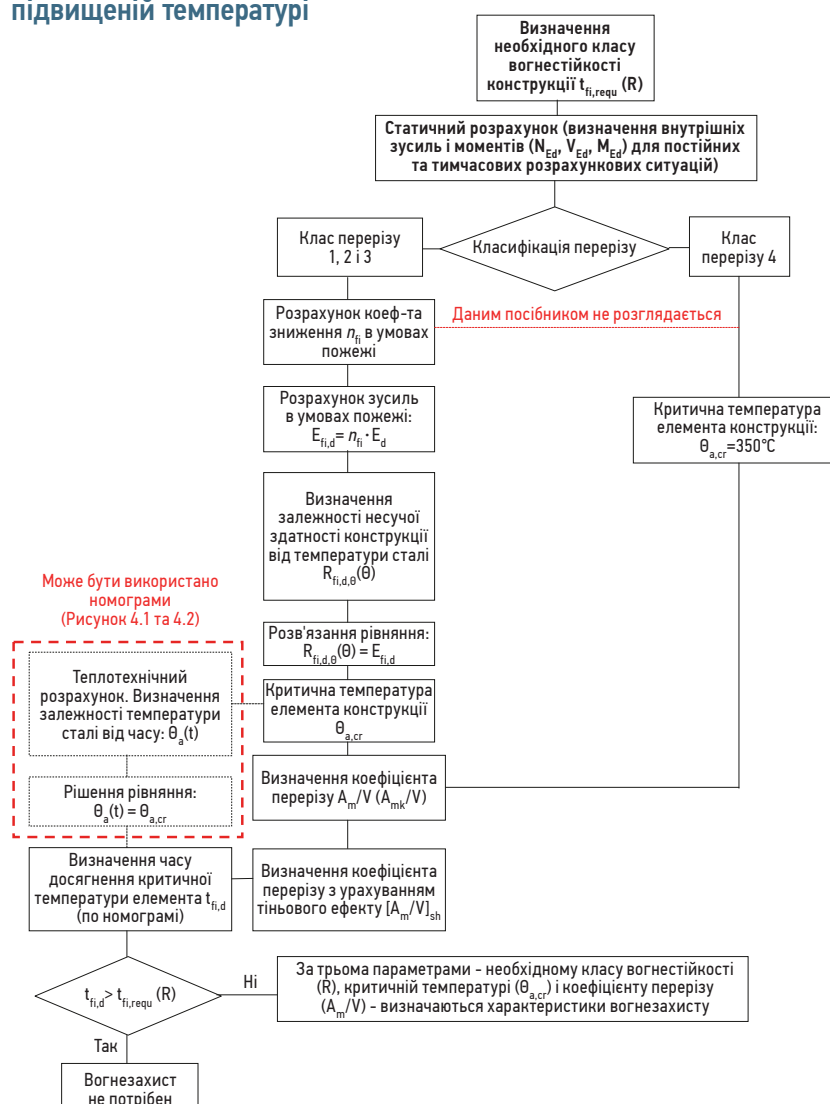
3.1 Метод розрахунку за параметрами міцності при підвищеній температурі

3.1.1 Сфера застосування

Даний метод слід застосовувати при можливості втрати стійкості елемента. Для випадків, коли не враховується критерій деформацій та виключається втрата стійкості, може використовуватись більш простий метод розрахунку критичної температури, описаний у Розділі 3.2.

Для перерізів Класу 4 алгоритм значно спрощується, оскільки допускається без розрахунку приймати $\Theta_{a,cr} = 350^\circ\text{C}$.

3.1.2 Алгоритм (блок-схема) розрахунку вогнестійкості сталевих конструкцій та визначення необхідності їх вогнезахисту за параметрами міцності при підвищеній температурі



3.1.3 Статичний розрахунок

3.1.3.1 Основні положення

5.1.1(1)-(3)Р
ДСТУ-Н Б
EN 1990

- (1)Р У основу статичних розрахунків повинні бути закладені відповідні моделі несучих конструкцій із визначеними величинами.
- (2) Моделі несучих конструкцій повинні із достатньою точністю враховувати розглянуті граничні стани.
- (3)Р Статичні моделі повинні відповідати сталій інженерній теорії та практиці. За необхідності вони можуть підтверджуватися випробуваннями.

3.1.3.2 Механічні дії

4.3.1(1)Р
ДСТУ-Н Б EN 1991-1-2

6.4.3.3.
ДСТУ-Н Б EN 1990
Формула (6.11b)

- (1)Р Поєднання механічних дій для отримання розрахункового значення результату впливу в умовах пожежі $E_{fi,d,t}$ проводиться згідно з ДСТУ-Н Б EN 1990 для аварійної розрахункової ситуації.
- (2) Комбінації навантажень для аварійних розрахункових ситуацій можуть бути виражені у вигляді:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + A_d + (\psi_{1,1} \text{ или } \psi_{2,1}) Q_{k,1} + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} Q_{k,i}, \quad (3.1)$$

де:

A_d – розрахункове значення надзвичайного впливу;

$\psi_{1,1}$ – коефіцієнт ψ_1 для частого значення змінного навантаження $Q_{k,1}$;

$\psi_{2,i}$ – коефіцієнт ψ_2 для квазіпостійного значення змінного навантаження $Q_{k,i}$.

4.3.1(2)
ДСТУ-Н Б
EN 1991-1-2

- (3) Розрахункове значення домінуючого змінного впливу Q_i враховується як часте $\psi_{2,i} Q_i$ або, в якості альтернативи, як майже постійне $\psi_{1,i} Q_i$.

Примітка. Національним додатком рекомендується використовувати поєднання $\psi_{2,i} Q_i$.

4.2(1)Р
ДСТУ-Н Б EN 1991-1-2

4.1(1)Р
ДСТУ-Н Б EN 1991-1-2

- (4)Р Впливи враховуються як для розрахунку за нормальної температури, якщо ймовірна їх дія в умовах пожежі.
- (5) Прикладені та вимушені видовження й деформації, що спричинені змінами температур внаслідок пожежі, викликають навантажувальні ефекти, окрім випадків, коли:
- впливи незначні або їх ефект є сприятливим;
 - впливи враховані традиційно вибраними умовами спирання та граничними умовами і/або беззастережно враховані традиційно визначеними протипожежними вимогами.

4.1(2)
ДСТУ-Н Б
EN 1991-1-2

- (6) Оцінка непрямих впливів повинна враховувати:
- вимушене теплове розширення конструкцій (наприклад, колон у багатоповерхових каркасних будинках з діафрагмами жорсткості);
 - різне теплове розширення статично невизначених конструкцій (наприклад, нерозрізних плит перекриття);
 - температурні градієнти в поперечних перерізах, що спричиняють внутрішні напруження;
 - теплове розширення прилеглих конструкцій (наприклад, зміщення верхньої частини колони через розширенням плити перекриття або видовження підвісних тросів);
 - теплове розширення конструкцій, що впливає на конструкції за межами протипожежного відсіку.

4.1(3)
ДСТУ-Н Б EN 1991-1-2

- (7) Розрахункові значення непрямих впливів пожежі слід визначати на основі відповідних сценаріїв пожежі та розрахункових значень теплофізичних та термомеханічних характеристик матеріалу.

4.1(4)
ДСТУ-Н Б EN 1991-1-2

- (8) Непрямі впливи (від температурного розширення і т. д.) від прилеглих конструкцій не враховуються, якщо протипожежні вимоги до конструкції встановлені для стандартного температурного режиму.

4.2.2(1)
ДСТУ-Н Б EN 1991-1-2

4.3.2(2)
ДСТУ-Н Б EN 1991-1-2

та
2.4.2
ДСТУ-Н Б EN 1993-1-2

- (9) Одночасність виникнення разом з іншими незалежними випадковими впливами не враховується.
- (10) В якості спрощення, результати впливів в умовах пожежі $E_{fi,d}$ допускається визначати з використанням результатів, отриманих при нормальних температурах:

$$E_{fi,d,t} = E_{fi,d} = \eta_{fi} \cdot E_d, \quad (3.2)$$

де:

E_d – розрахункове значення відповідної сили або моменту при нормальній температурі, для основних сполучень впливів згідно з ДСТУ-Н Б EN 1990;

η_{fi} – коефіцієнт зниження для розрахунку рівня навантаження в умовах пожежі.

4.2.2(1)
ДСТУ-Н Б
EN 1993-1-2

3.1.4 Класифікація поперечних перерізів

- (1) При використанні спрощених методів поперечні перерізи можуть класифікуватися як при нормальній температурі з використанням зменшеного значення ϵ за формулою:

$$\epsilon = 0,85 \left[\frac{235}{f_y} \right]^{0,5} \quad (3.3)$$

де:

f_y – границя текучості при 20°C.

Примітка. Коефіцієнт зниження 0,85 враховує вплив підвищеної температури.

5.5.2(6)
ДСТУ-Н Б EN 1993-1-1
5.5.2(8)
ДСТУ-Н Б
EN 1993-1-1

- (2) Поперечний переріз класифікується за найвищим (найменш сприятливим) класом його стиснутих частин.
(3) Граничні співвідношення для стиснутих частин Класів 1, 2 та 3 визначаються за Таблицею 3.1.
(4) Частини перерізів, які не відповідають Класу 3, відносяться до Класу 4.

Для виступаючих частин при поперечному згині в запас можуть використовуватися граничні значення для осьового стиснення (Таблиця 3.1, сторінка 2).

Класифікація з урахуванням коефіцієнта 0,85 застосовується для умов пожежі та не застосовується для інших розрахунків.

З урахуванням коефіцієнта 0,85 клас одного і того ж перерізу при нормальній температурі та в умовах пожежі може бути різним.

Таблиця 5.2
сторінка 1
ДСТУ-Н Б
EN 1993-1-1
зі зниженням
значенням ϵ

Таблиця 3.1 (сторінка 1 из 3). Максимальні відношення ширини до товщини для стиснутих ділянок перерізів в умовах пожежі

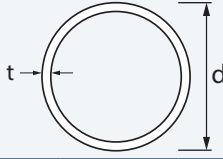
Стиснуті внутрішні частини			
Клас	Частина, що згинається	Частина, що стискається	Частина, що згинається та стискається
Розподіл напруження в частинах перерізів (стиск додатній)			
1	$c/t \leq 72\epsilon$	$c/t \leq 33\epsilon$	якщо $\alpha > 0,5$: $c/t \leq \frac{396\epsilon}{13\alpha-1}$ якщо $\alpha \leq 0,5$: $c/t \leq \frac{36\epsilon}{\alpha}$
2	$c/t \leq 83\epsilon$	$c/t \leq 38\epsilon$	якщо $\alpha > 0,5$: $c/t \leq \frac{456\epsilon}{13\alpha-1}$ якщо $\alpha \leq 0,5$: $c/t \leq \frac{41,5\epsilon}{\alpha}$
Розподіл напруження в частинах перерізів (стиск додатній)			

Таблиця 5.2
сторінка 2
ДСТУ-Н Б
EN 1993-1-1
зі зменшеним
значенням ϵ

Продовження Таблиці 3.1 (сторінка 2 із 3). Максимальні відношення ширини до товщини
для стиснутих ділянок перерізів в умовах пожежі

Клас		Изгибаемый элемент		Сжимаемый элемент		Сжато-изогнутый элемент	
3		$c/t \leq 124\varepsilon$		$c/t \leq 42\varepsilon$		якщо $\psi > -1$: $c/t \leq \frac{42\varepsilon}{0,67+0,33\psi}$ якщо $\psi \leq -1$: $c/t \leq 62\varepsilon(1-\psi)\sqrt{(-\psi)}$	
$\varepsilon = 0,85 \left[\frac{235}{f_y} \right]^{0,5}$	f_y	235	275	355	420	460	
	ε	0,85	0,78	0,69	0,64	0,60	
Звиси полиць							
Прокатні профілі				Зварні профілі			
Клас	Частина, що стискається	Частина, що згинається та стискається					
		Стиснення на кінці		Розтяг на кінці			
Розподіл напруження в частинах перерізів (стиск додатній)							
	1	$c/t \leq 9\varepsilon$		$c/t \leq \frac{9\varepsilon}{\alpha}$		$c/t \leq \frac{9\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$	
2	$c/t \leq 10\varepsilon$		$c/t \leq \frac{10\varepsilon}{\alpha}$		$c/t \leq \frac{10\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$		
Розподіл напруження у частинах перерізів (стиск додатній)							
	3	$c/t \leq 14\varepsilon$		$c/t \leq 21\varepsilon\sqrt{k_\sigma}$ Для k_σ див. ДСТУ-Н Б EN 1993-1-5			
$\varepsilon = 0,85 \left[\frac{235}{f_y} \right]^{0,5}$	f_y	235	275	355	420	460	
	ε	0,85	0,79	0,69	0,64	0,61	
Кутикові профілі							
Також відноситься до звисів полиць (див. Таблицю 3.1, сторінку 2)						Не застосовується для кутиків при неперервному контакті з іншими деталями	
Клас		Переріз, що стискається					
Розподіл напруження у частинах перерізів (стиск додатній)							
3		$h/t \leq 15\varepsilon; \frac{b+h}{2t} \leq 11,5\varepsilon$					

Продовження Таблиці 3.1 (сторінка 3 із 3). Максимальні відношення ширини до товщини для стиснутих ділянок перерізів в умовах пожежі

Трубчастий переріз						
						
Клас	Переріз, що згинається і/або стискається					
1	$d/t \leq 50\epsilon^2$					
2	$d/t \leq 70\epsilon^2$					
3	$d/t \leq 90\epsilon^2$					
ПРИМІТКА. Щодо $d/t > 90\epsilon^2$ див. ДСТУ-Н Б EN 1993-1-6						
$\epsilon = 0,85 \left[\frac{235}{f_y} \right]^{0,5}$	f_y	235	275	355	420	460
	ϵ	0,85	0,79	0,69	0,64	0,61
	ϵ^2	0,72	0,62	0,48	0,40	0,37

3.1.5 Визначення коефіцієнта зниження η_{fi} для розрахунку рівня навантаження в умовах пожежі

2.4.2 (3)
ДСТУ-Н Б
EN 1993-1-2

Формула
(2.5)

- (1) Коефіцієнт зниження η_{fi} для поєднання навантажень згідно з формулою (6.10) ДСТУ-Н Б EN 1990 визначається за формулою:

$$\eta_{fi} = \frac{G_k + \psi_{fi} Q_{k,l}}{\gamma_G G_k + \gamma_{Q,l} Q_{k,l}}, \quad (3.4a)$$

или для сочетания воздействий по формулам (6.10)а и (6.10)б ДСТУ-Н Б EN 1990 - как наименьшее значение из:

Формула
(2.5)

$$\eta_{fi} = \frac{G_k + \psi_{fi} Q_{k,l}}{\gamma_G G_k + \gamma_{Q,l} \psi_{0,l} Q_{k,l}}, \quad (3.4b)$$

Формула
(2.5)б

$$\eta_{fi} = \frac{G_k + \psi_{fi} Q_{k,l}}{\xi \gamma_G G_k + \gamma_{Q,l} Q_{k,l}}, \quad (3.4c)$$

де:

$Q_{k,l}$ – характеристичне значення переважаючого або головного (першого) змінного впливу;

G_k – характеристичне значення постійного впливу;

γ_G – коефіцієнт надійності для постійних впливів;

$\gamma_{Q,l}$ – коефіцієнт надійності для першого змінного впливу;

ψ_{fi} – коефіцієнт поєднання впливів, приймається рівним $\psi_{2,l}$ (див. Таблицю 3.2.);

ξ – коефіцієнт зниження для урахування несприятливих постійних впливів.

Примітка 1. Залежність коефіцієнта η_{fi} від відношення впливів $Q_{k,l}/G_k$ із різними значеннями ψ_{fi} що визначається Формулою (3.4), наведена на Рисунку 3.1 з наступними припущеннями: $\gamma_G = 1,35$ та $\gamma_Q = 1,5$. Формули (3.4a) та (3.4b) дають трохи більш високі значення.

Примітка 2. В якості спрощення рекомендується використовувати значення $\eta_{fi} = 0,65$, за винятком випадків прикладення навантаження категорії Е згідно ДСТУ-Н Б EN 1991-1-1 (площі, призначені для накопичення продукції, включаючи зони приймання), для яких рекомендується значення, рівне 0,7.

Із урахуванням зазначених коефіцієнтів формули (3.4a), (3.4b) та (3.4c) набувають вигляд:

$$\eta_{fi} = \frac{G_k + \psi_{2,l} Q_{k,l}}{1,35 G_k + 1,5 Q_{k,l}} - \text{перетворено з Формули (3.4a);}$$

$$\eta_{fi} = \frac{G_k + \psi_{2,l} Q_{k,l}}{1,35 G_k + 1,5 \psi_{0,l} Q_{k,l}} - \text{перетворено з Формули (3.4b);}$$

$$\eta_{fi} = \frac{G_k + \psi_{2,l} Q_{k,l}}{1,15 G_k + 1,5 Q_{k,l}} - \text{перетворено з Формули (3.4c),}$$

де:

$\psi_{2,l}$ та $\psi_{0,l}$ – коефіцієнти сполучень, прийняті за Таблицею 3.2. (див. Таблицю 3.2.);

Таблиця
НБ.2.2
ДСТУ-Н Б
EN 1990

Таблиця 3.2 Значення коефіцієнтів ψ для будівель

Навантаження та впливи	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Корисні навантаження в будівлях, категорії: (див. ДСТУ-Н Б EN 1991-1-1)			
Категорія А: житлові приміщення	0.7	0.5	0.35
Категорія В: офісні приміщення	0.7	0.5	0.35
Категорія С: приміщення з можливим скупченням людей	0.7	0.7	0.6
Категорія D: торговельні площі	0.7	0.7	0.6
Категорія Е: складські площі	1.0	0.9	0.8
Категорія F: проїзна частина для транспортних засобів вагою:			
а) не більше 30кН	0.7	0.7	0.6
б) більше 30кН, але не більше 160 кН	0.7	0.5	0.3
Категорія Н: дахи	0.7	0	0
Снігові навантаження на будівлях (див. ДСТУ-Н Б EN 1991-1-3)	0.6	0.5	0.3
Вітрові навантаження на будівлях (див. ДСТУ-Н Б EN 1991-1-4)	0.6	0.2	0
Тепловий вплив (без пожежі) у будівлях (див. ДСТУ-Н Б EN 1991-1-5)	0.6	0.5	0

Рисунок 2.1
ДСТУ-Н Б
EN 1993-1-2

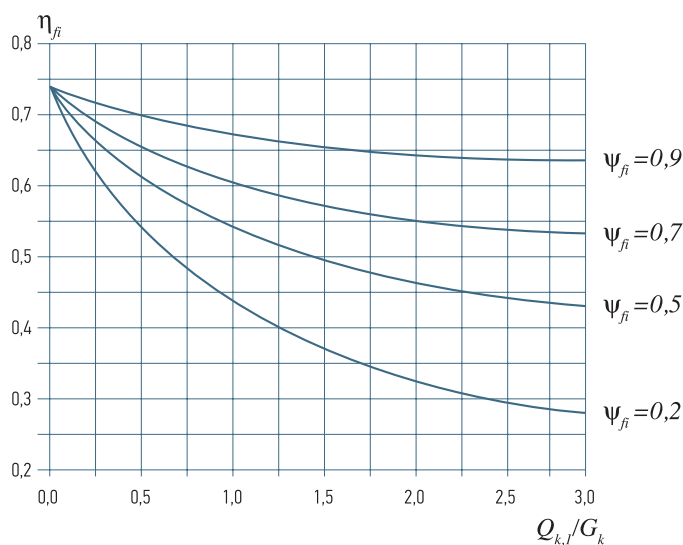


Рисунок 3.1 Залежність коефіцієнта η_{fi} від відношення впливів $Q_{k,i}/G_k$

3.1.6 Визначення розрахункових сполучень зусиль $E_{fi,d}$ в умовах пожежі

Розрахункові поєднання зусиль визначаються відповідно до п. 3.1.3.2(10) даного посібника.

3.1.7 Визначення залежності несучої здатності від температури сталі

4.2.1(2)
ДСТУ-Н Б
EN 1993-1-2

- (1) Розрахунковий опір $R_{fi,d,t}$ ($M_{fi,t,Rd}$, $N_{fi,t,Rd}$, $V_{fi,t,Rd}$) у момент часу t зазвичай визначається в припущенні рівномірного розподілу температури по площі поперечного перерізу, шляхом корегування розрахункового опору при нормальній температурі по ДСТУ-Н Б EN 1993-1-1, із урахуванням зміни механічних властивостей сталі при підвищених температурах - див. Розділ 2.4.

У даному посібнику не розглядається визначення несучої здатності елементів при нормальній температурі M_{Rd} , N_{Rd} , V_{Rd} . Для найбільш поширених типів конструкцій ці методики наведені у публікації УЦСБ-005-14 "Розрахунок сталевих конструкцій будівель відповідно до Єврокоду 3 та національних додатків України".

4.2.3.1(1)
ДСТУ-Н Б
ЕН 1993-1-2

3.1.7.1 Конструкції при дії зусиль розтягу

- (1) Розрахунковий опір $N_{fi, \theta, Rd}$ конструкції розтягуванню при рівномірно розподіленій температурі θ_a визначається за формулою:

$$N_{fi, t, Rd} = k_{y, \theta} N_{Rd} \frac{\gamma_{M, \theta}}{\gamma_{M, fi}}, \quad (3.5)$$

де:

$k_{y, \theta}$ – коефіцієнт зниження границі текучості при досягненні сталю температурі θ_a в момент часу t , див. п. 2.4.1.1;

N_{Rd} – розрахунковий опір поперечного перерізу $N_{pl, Rd}$ при проектуванні для умов експлуатації при нормальній температурі, відповідно до ДСТУ-Н Б ЕН 1993-1-1.

Для розтягнутих елементів може бути застосований більш простий метод розрахунку критичної температури, наведений в Розділі 3.2, де:

$$N_{fi, d, 0} = N_{fi, 20, Rd} = N_{Rd}. \quad (3.6)$$

3.1.7.2 Конструкції при дії зусиль стиску з поперечними перерізами Класу 1, 2 або 3

4.2.3.2(1)
ДСТУ-Н Б
ЕН 1993-1-2

- (1) Розрахункова несуча здатність за втратою стійкості в формі поздовжнього $N_{b, fi, t, Rd}$ стиснутої конструкції з поперечними перерізами Класу 1, 2 або 3 при рівномірному розподілі температури θ_a в момент часу t визначається за формулою:

$$N_{b, fi, t, Rd} = \frac{\chi_{fi} A k_{y, \theta} f_y}{\gamma_{M, fi}}, \quad (3.7)$$

де:

χ_{fi} – понижуючий коефіцієнт для відповідної кривої втрати стійкості в умовах пожежі;

$k_{y, \theta}$ – коефіцієнт зниження границі текучості при досягненні сталю температурі θ_a в момент часу t , див. Розділ 2.4.1.1.

- (2) Значення χ_{fi} приймається меншим зі значень $\chi_{y, fi}$ та $\chi_{\sigma, fi}$, визначених за формулою:

$$\chi_{fi} = \frac{I}{\Phi_{\theta} + \sqrt{\Phi_{\theta}^2 - \bar{\lambda}_{\theta}^2}}, \quad (3.8)$$

де:

$$\Phi_{\theta} = \frac{I}{2} \left[1 + \alpha \bar{\lambda}_{\theta} + \bar{\lambda}_{\theta}^2 \right]; \quad (3.9)$$

$$\alpha_{\theta} = 0,65 \sqrt{\frac{235}{f_y}}. \quad (3.10)$$

Умовна гнучкість $\bar{\lambda}$ при досягненні сталю температурі θ_a приймається рівною:

$$\bar{\lambda}_{\theta} = \bar{\lambda} \left[\frac{k_{y, \theta}}{k_{E, \theta}} \right]^{0,5}. \quad (3.11)$$

6.3.1.3(1)
ДСТУ-Н Б
ЕН 1993-1-1

- (3) Для поздовжнього згину $\bar{\lambda}$ визначається з виразу:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i} \frac{1}{\lambda_1} \quad (3.12)$$

для поперечних перерізів Класів 1, 2 та 3,

де:

L_{cr} – розрахункова довжина елемента відносно осі, що розглядається;

i – радіус інерції, який визначається для перерізу бруто відносно осі, що розглядається

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 93,9 \epsilon. \quad (3.13)$$

З урахуванням того, що $\gamma_{M,fi} = 1.0$, $N_{b,fi,Rd}$ для Класів перерізів 1, 2 та 3 при рівномірному розподілі температури θ_a можна виразити наступним чином:

$$N_{b,fi,Rd} = \chi_{fi} \cdot A \cdot k_{y,\theta} \cdot f_y = f'_{y,\theta,\bar{\lambda}} \cdot A,$$

де:

A – площа поперечного перерізу;

$$f'_{y,\theta,\bar{\lambda}} = \chi_{fi} \cdot k_{y,\theta} \cdot f_y$$

- це граничне напруження стиснення для заданої температури сталі θ_a та умовної гнучкості $\bar{\lambda}$.

Виходячи з вищенаведених виразів, для найбільш поширених Класів сталі були розраховані Таблиці 3.3, 3.4 та 3.5 з залежністю граничного напруження від умовної гнучкості при нормальній температурі та від температури сталі. За цими таблицями, знаючи розрахункові напруження, що діють у перерізі, можна визначити значення критичної температури.

Таблиця 3.3 Граничне напруження стиску $f'_{y,\theta,\bar{\lambda}}$ для сталі S235

$\bar{\lambda}$ (20°C)	Температура сталі θ_a					
	400°C	500°C	600°C	700°C	800°C	900°C
	$f'_{y,\theta,\bar{\lambda}}$ (МПа)					
0.0	235	183	110	54	26	14
0.1	218	171	102	50	24	13
0.2	202	159	94	46	22	13
0.3	187	147	87	42	21	12
0.4	171	136	80	38	19	11
0.5	156	124	72	34	18	10
0.6	140	113	65	30	16	10
0.7	126	102	58	26	15	9
0.8	112	91	51	23	13	8
0.9	99	81	45	20	12	7
1.0	88	73	40	18	11	7
1.1	78	65	35	16	9	6
1.2	70	58	31	14	8	6
1.3	62	52	28	12	8	5
1.4	56	47	25	11	7	5
1.5	50	42	22	10	6	4
1.6	45	38	20	9	6	4
1.7	41	35	18	8	5	4
1.8	37	31	17	7	5	3
1.9	34	29	15	7	4	3
2.0	31	26	14	6	4	3

Таблиця 3.4 Граничне напруження стиску $f'_{y,\theta,\bar{\lambda}}$ для сталі S355

$\bar{\lambda}$ (20°C)	Температура сталі θ_a					
	400°C	500°C	600°C	700°C	800°C	900°C
	$f'_{y,\theta,\bar{\lambda}}$ (МПа)					
0.0	355	277	167	82	39	21
0.1	334	261	157	76	37	20
0.2	313	246	147	71	35	19
0.3	293	231	137	66	33	18
0.4	272	215	126	60	31	17

Продовження таблиці 3.4 Граничне напруження стиску $f'_{y,\theta,\bar{\lambda}}$ для сталі S355

0.5	250	199	116	54	28	16
0.6	227	182	105	49	26	15
0.7	204	165	94	43	24	14
0.8	182	148	83	38	21	13
0.9	161	132	73	33	19	12
1.0	143	118	65	29	17	11
1.1	126	105	57	25	15	10
1.2	112	93	51	22	14	9
1.3	100	83	45	19	12	8
1.4	89	75	40	17	11	8
1.5	80	67	36	15	10	7
1.6	72	61	32	14	9	6
1.7	65	55	29	13	8	6
1.8	59	50	26	11	7	5
1.9	54	46	24	10	7	5
2.0	49	42	22	9	6	4

Таблиця 3.5 Граничне напруження стиску $f'_{y,\theta,\bar{\lambda}}$ для сталі S460

$\bar{\lambda}$ (20°C)	Температура сталі θ_a					
	400°C	500°C	600°C	700°C	800°C	900°C
	$f'_{y,\theta,\bar{\lambda}}$ (МПа)					
0.0	460	359	216	106	51	28
0.1	435	341	204	100	48	26
0.2	412	323	193	93	46	25
0.3	388	305	181	87	43	24
0.4	362	286	169	80	41	23
0.5	335	266	155	73	38	22
0.6	305	245	141	66	35	21
0.7	276	222	127	58	32	19
0.8	246	200	112	51	29	18
0.9	218	179	99	44	26	16
1.0	193	159	87	39	23	15
1.1	170	142	77	34	21	14
1.2	151	126	68	30	19	12
1.3	134	112	60	26	17	11
1.4	119	100	54	23	15	10
1.5	107	90	48	21	13	9
1.6	96	81	43	18	12	8
1.7	87	73	39	17	11	8
1.8	79	67	35	15	10	7
1.9	72	61	32	14	9	6
2.0	66	56	29	12	8	6

3.1.7.3 Елементи при дії зусиль згину із поперечними перерізами Класів 1, 2 або 3

4.2.3.3(1) и
4.2.3.4(1)
ДСТУ-Н Б
EN 1993-1-2

- (1) Розрахункова несуча здатність $M_{fi,\theta,Rd}$ поперечних перерізів Класів 1, 2 та 3 на згинальний момент при рівномірно розподіленій температурі θ_a визначається за формулою:

$$M_{fi,\theta,Rd} = k_{y,\theta} M_{Rd} \left[\frac{\gamma_{M,O}}{\gamma_{M,fi}} \right], \quad (3.15)$$

де:

M_{Rd} – відповідна несуча здатність перерізу бруто за міцністю при нормальній температурі, що визначається наступним чином:

$M_{Rd} = M_{pl,Rd}$ або $M_{pl,V,Rd}$ – для перерізів Класів 1 та 2 в пластичній стадії відповідно без урахування та з урахуванням дії поперечної сили (при $V_{Ed} \geq 0,5V_{Rd}$);

$M_{Rd} = M_{el,Rd}$ або $M_{el,V,Rd}$ – для перерізів Класу 3 в пружній стадії відповідно без урахування та з урахуванням дії поперечної сили (при $V_{Ed} \geq 0,5V_{Rd}$);
 $k_{y,\theta}$ – коефіцієнт зниження границі текучості при досягненні сталлю температури θ_a у момент часу t , див. п. 2.4.1.1.

Для балок з композитною (сталебетонною) або бетонною плитою на одній із сторін з метою підвищення критичної температури та відповідного зменшення необхідного вогнезахисту рекомендується враховувати нерівномірний розподіл температури введенням коефіцієнтів k_1 та k_2 . Тоді несуча здатність балки за міцністю в умовах пожежі визначається формулою:

$$M_{fi,t,Rd} = k_{y,\theta} M_{Rd} \frac{\gamma_{M,0}}{\gamma_{M,fi} k_1 k_2}, \quad (3.16)$$

де коефіцієнти k_1 та k_2 приймають значення:

- для **незахищеної** балки, що піддається дії вогню з трьох сторін та сталебетонною або бетонною плитою, - $k_1 = 0.7$;
- для **захищеної** балки, що піддається дії вогню з трьох сторін з сталебетонною або бетонною плитою, - $k_1 = 0.85$;

Для нерівномірного температурного розподілу вздовж балки коефіцієнт k_2 приймають:

- для статично невизначеної балки $k_2 = 0.85$
- для інших випадків $k_2 = 1$

Аналогічна рекомендація зберігається для методу розрахунку критичної температури згідно з Розділом 3.2.

4.2.3.3(7)
ДСТУ-НБ
EN 1993-1-2

4.2.3.3(8)
ДСТУ-НБ
EN 1993-1-2

4.2.3.3(4) і
4.2.3.4(3)
ДСТУ-НБ
EN 1993-1-2

(2) Розрахункова несуча здатність $M_{b,fi,t,Rd}$ за втратою стійкості плоскої форми згину не розкріпленої конструкції із поперечним перерізом Класів 1, 2 та 3 у момент часу t визначається за формулою:

$$M_{b,fi,t,Rd} = \chi_{LT,fi} W_y k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}, \quad (3.17)$$

де:

W_y – відповідний момент опору перерізу, що визначається наступним чином:

$W_y = W_{pl,y}$ для поперечних перерізів Класів 1 та 2;

$W_y = W_{el,y}$ для поперечних перерізів Класу 3;

$\chi_{LT,fi}$ – понижуючий коефіцієнт для втрати стійкості плоскої форми згину в умовах пожежі.

4.2.3.3(5)
ДСТУ-НБ
EN 1993-1-2

(3) Значення $\chi_{LT,fi}$ визначається у відповідності з наступною залежністю:

$$\chi_{LT,fi} = \frac{1}{\phi_{LT,\theta} + \sqrt{(\phi_{LT,\theta})^2 - (\bar{\lambda}_{LT,\theta})^2}}, \quad (3.18)$$

где:

$$\phi_{LT,\theta} = \frac{1}{2} \left[1 + \alpha \bar{\lambda}_{LT,\theta} + (\bar{\lambda}_{LT,\theta})^2 \right];$$

$$\alpha = 0,65 \sqrt{\frac{235}{f_y}};$$

$$\bar{\lambda}_{LT,\theta} = \bar{\lambda}_{LT} \left[\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}} \right]^{0,5}.$$

Умовна гнучкість $\bar{\lambda}$ залежить від критичного моменту M_{cr} втрати стійкості плоскої форми згину в пружній стадії. Методика його визначення для різних типів балок наведена в публікації УЦСБ-005-14 "Розрахунок сталевих конструкцій будівель відповідно до Єврокоду 3 та національних додатків України".

Якщо поперечне зусилля перевищує 50% відповідної несучої здатності на зріз, це необхідно враховувати шляхом зниження границі текучості.

Коли втрата стійкості балки виключена, раціонально використовувати метод визначення критичної температури, викладений у Розділі 3.2 даного посібника.

3.1.7.4 Елементи з Класами перерізів 1, 2 або 3, що працюють на зріз

- (1) Розрахунковий опір на зріз $V_{fi,t,Rd}$ поперечних перерізів Класів 1, 2 та 3 в момент часу t визначається за формулою:

$$V_{fi,t,Rd} = k_{y,\theta} V_{Rd} \left(\frac{\gamma_{M,O}}{\gamma_{M,fi}} \right), \quad (3.19)$$

4.2.3.3(6) і
4.2.3.4(4)
ДСТУ-Н Б
EN 1993-1-2

де:

V_{Rd} – несуча здатність на зріз поперечного перерізу брутто згідно ДСТУ-Н Б EN 1993-1-1 при нормальній температурі;

$k_{y,\theta}$ – коефіцієнт зниження границі текучості при досягненні сталю температури θ_a в момент часу t , див. в Розділі 2.4.1.1.

3.1.7.5 Стиснуто-зігнуті та позацентрово стиснуті елементи з Класами перерізів 1, 2 або 3

4.2.3.5(1)
ДСТУ-Н Б
EN 1993-1-2

- (1) Розрахункова несуча здатність за міцністю та стійкістю стиснуто-зігнутих та позацентрово стиснутих елементів Класів перерізів 1, 2 або 3 в момент часу t визначається за формулами:

$$\frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{min,fi} A k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_y M_{y,fi,Ed}}{W_y k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_z M_{z,fi,Ed}}{W_z k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} \leq 1,0; \quad (3.20a)$$

$$\frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{z,fi} A k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_{LT} M_{y,fi,Ed}}{\chi_{LT} W_y k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_z M_{z,fi,Ed}}{W_z k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} \leq 1,0, \quad (3.20b)$$

де:

W_y та W_z – відповідний момент опору перерізу, що визначається наступним чином:

$W_{pl,y}$ та $W_{pl,z}$ для поперечних перерізів Класів 1 та 2;

$W_{el,y}$ та $W_{el,z}$ для поперечних перерізів Класу 3;

$k_{y,\theta}$ – коефіцієнт зниження границі текучості при досягненні сталю температури θ_a у момент часу t , див. п. 2.4.1.1;

$\chi_{min,fi}$ – див. п. 3.1.7.2;

$\chi_{z,fi}$ – див. п. 3.1.7.2;

$\chi_{LT,fi}$ – див. п. 3.1.7.3(3);

$$k_{LT} = 1 - \frac{\mu_{LT} N_{fi,Ed}}{\chi_{z,fi} A k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} \leq 1 \quad \mu_{LT} = 0,15 \quad \bar{\lambda}_{z,\theta} \quad \beta_{M,LT} - 0,15 \leq 0,9;$$

$$k_y = 1 - \frac{\mu_y N_{fi,Ed}}{\chi_{y,fi} A k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} \leq 3,$$

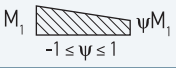
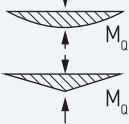
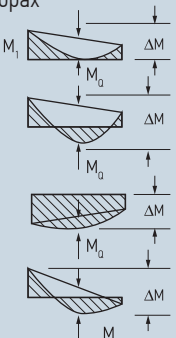
$$\text{при } \mu_y = (1,2\beta_{M,y} - 3) \bar{\lambda}_{y,\theta} + 0,44\beta_{M,y} - 0,29 \leq 0,8$$

$$k_z = 1 - \frac{\mu_z N_{fi,Ed}}{\chi_{z,fi} A k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} \leq 3,$$

$$\text{при } \mu_z = (2\beta_{M,z} - 5) \bar{\lambda}_{z,\theta} + 0,44\beta_{M,z} - 0,29 \leq 0,8 \text{ та } \bar{\lambda}_{z,\theta} \leq 1,1.$$

Рисунок 4.2
ДСТУ-Н Б
EN 1993-1-2

Таблиця 3.6 Коефіцієнти еквівалентного рівномірно розподіленого моменту β_M

Епюра моментів	Коефіцієнт еквівалентного рівномірно розподіленого моменту β_M
Опорні згинальні моменти 	$\beta_{M,\psi} = 1,8 - 0,7\psi$
Згинальні моменти в результаті дії поперечного навантаження, прикладеного в одній площині 	$\beta_{M,Q} = 1,3$ $\beta_{M,Q} = 1,4$
Згинальні моменти від спільної дії навантажень в площині та на опорах 	$\beta_M = \beta_{M,\psi} + \frac{M_Q}{\Delta M} (\beta_{M,Q} - \beta_{M,\psi})$ $M_Q = \max M$ тільки від поперечного навантаження в площині для епюри моментів без знакозмінності $\Delta M = \begin{cases} \max M & \text{для епюри моментів без знакозмінності} \\ \max M + \min M & \text{для епюри моментів зі знакозмінністю} \end{cases}$

3.1.8 Робочі приклади

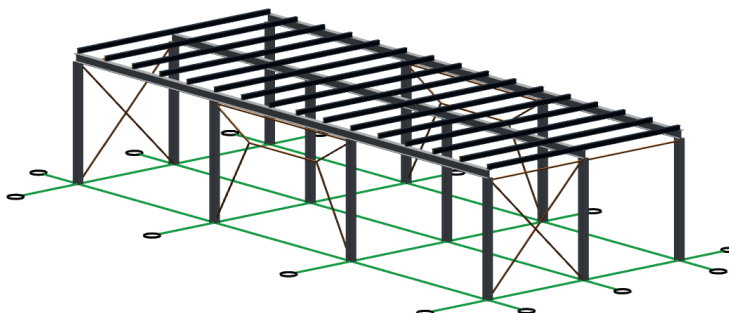
Приклади, що розглядаються нижче **не є** типовими рішеннями. Конструктивні схеми були вибрані таким чином, щоб максимально продемонструвати весь діапазон розрахункових ситуацій з навчальною метою. Багато вихідних даних у наведених прикладах прийнято відповідно до прикладів, розглянутих у публікаціях УЦСБ.

3.1.8.1 Розрахунок центрально-стиснутих елементів, схильних до втрати стійкості

Розглянутий каркас являє собою балочну клітку, яка розташовується усередині об'єму існуючої будівлі.

Подібні конструкції використовують у промисловому будівництві для розміщення технологічного обладнання при організації виробничих процесів в декількох рівнях, а також в цивільному будівництві з метою організації антресольних поверхів. У даному прикладі вважається, що балочна клітка призначена для складування по всій площі негорючих упакованих матеріалів в тарі.

Колони та головні балки в каркасі прийняті зі зварних профілів, складених з листів; другорядні балки прийняті з прокатних двотаврів з ухилом полиць, а елементи в'язей - із прямошовних електрозварних труб. В даному прикладі розглядається центрально стиснута колона, яка знаходиться на перетині осей "Б" та "2". Висота колони 4,65 м.

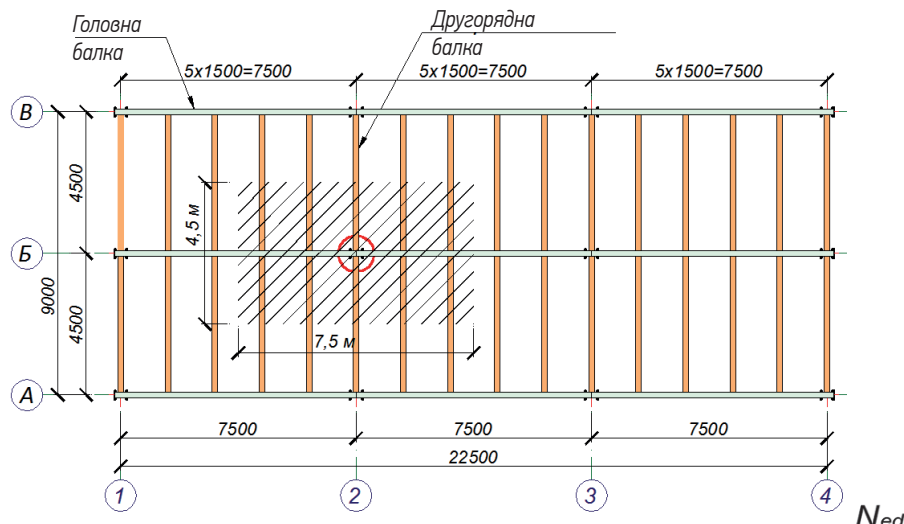


Приклад 5.1.4
Публікація
УЦСБ-006-14

Таблиця 3.1
ДСТУ-Н Б
EN 1993-1-1

4.2.3.2(1)
ДСТУ-Н Б
EN 1993-1-2

2.4.2(2)
ДСТУ-Н Б
EN 1993-1-2



1. Сумарне розрахункове значення навантаження на колону:

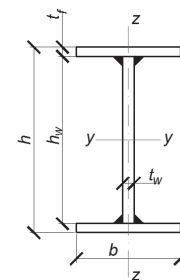
$$N_{ed} = 294,54 \text{ кН.}$$

2. Характеристики перерізу колони:

Колона прийнята зі сталі S235. При попередній максимальній товщині елементів перерізу колони $t \leq 40$ мм границя текучості рівна $f_y = 235 \text{ Н/мм}^2$.

3. Попередньо приймаємо колону наступного перерізу:

Висота поперечного перерізу	$h = 304 \text{ мм}$
Ширина поперечного перерізу	$b = 200 \text{ мм}$
Висота стінки	$h_w = 280 \text{ мм}$
Товщина стінки	$t_w = 10 \text{ мм}$
Товщина полиці	$t_f = 12 \text{ мм}$
Площа поперечного перерізу колони	$A = 76 \text{ см}^2$



Згідно з публікацією УЦСБ-006-14 «Приклади розрахунку сталевих конструкцій будівель відповідно до Єврокоду 3 та національних додатків України», даний переріз колони при нормальній температурі зовнішнього середовища відноситься до 1-го Класу.

4. Розрахункова несуча здатність за втратою стійкості у формі поздовжнього згину $N_{bfi,t,Rd}$ колони при рівномірному розподілі температури θ_a у момент часу t визначається за формулою:

$$N_{bfi,t,Rd} = \frac{\chi_{fi} A k_{y,\theta} f_y}{\gamma_{Mfi}}$$

де:

χ_{fi} – коефіцієнт зниження для відповідної кривої втрати стійкості в умовах пожежі;

$k_{y,\theta}$ – коефіцієнт зниження границі текучості при досягненні сталю температурі θ_a в момент часу t .

5. Розрахункове навантаження в умовах пожежі:

$$E_{fi,d,t} = E_{fi,d} = \eta_{fi} \cdot E_d,$$

де:

E_d – розрахункове значення відповідної сили або моменту при нормальній температурі, для основних сполучень дій відповідно до ДСТУ-Н Б EN 1990; в розглянутому випадку $E_d = N_{ed}$.

2.4.2(3)
ДСТУ-Н Б
EN 1993-1-2

Формула (2.5а)
ДСТУ-Н Б
EN 1993-1-2

Формула (2.5б)
ДСТУ-Н Б
EN 1993-1-2

η_{fi} – коефіцієнт зниження розрахункового рівня навантаження в умовах пожежі;
найменше значення з:

$$\eta_{fi} = \frac{G_k + \psi_{fi} Q_{k,l}}{\gamma_G G_k + \gamma_{Q,l} \psi_{0,1} Q_{k,l}}, \quad (3.4b)$$

$$\eta_{fi} = \frac{G_k + \psi_{fi} Q_{k,l}}{\xi \gamma_G G_k + \gamma_{Q,l} Q_{k,l}}, \quad (3.4c)$$

де:

$Q_{k,l}$ – характеристичне значення переважаючого або головного (першого) змінного впливу;

G_k – характеристичне значення постійного впливу;

γ_G – коефіцієнт надійності для постійних впливів;

$\gamma_{Q,l}$ – коефіцієнт надійності для першого змінного впливу;

ψ_{fi} – коефіцієнт поєднання впливів, приймається рівним $\psi_{2,l}$ (див. Таблицю 3.2.);

ξ – коефіцієнт зниження для урахування несприятливих постійних впливів.

Таким чином, відповідно до прикладу 5.1.4 публікації УЦСБ-006-14:

$$Q_{k,l} = 4,9 \cdot 4,5 \cdot 7,5 = 165,375 \text{ кН};$$

$$G_k = 1,02 \cdot 4,5 \cdot 7,5 \text{ (вага настилу)} + (10 \cdot 0,81225 \div 2 + 2 \cdot 7,67 \div 2) \text{ (вага балок перекриття)} = 46,16 \text{ кН};$$

$$\gamma_G = 1,35;$$

$$\gamma_{Q,l} = 1,5;$$

$$\psi_{fi} = \psi_2 = 0,8 \text{ (для складських площ)}.$$

Коефіцієнт зниження:

$$\eta_{fi} = \frac{46,16 + 0,8 \cdot 165,375}{1,35 \cdot 46,16 + 1,5 \cdot 165,375} = 0,575,$$

$$\text{або } \eta_{fi} = \frac{46,16 + 0,8 \cdot 165,375}{1,15 \cdot 46,16 + 1,5 \cdot 165,375} = 0,592.$$

Приймаємо найменше значення,

$$\eta_{fi} = 0,575;$$

Таким образом, расчетная нагрузка в условиях пожара:

$$E_{fi,d} = N_{fi,d} = 0,575 \cdot 294,54 = 169,36 \text{ кН}.$$

4.2.2
ДСТУ-Н Б
EN 1993-1-2

6. Незважаючи на те, що переріз колони при нормальній температурі відноситься до 1-го Класу, в умовах підвищеної температури він може переходити в інші класи, оскільки

$$\epsilon = 0,85 \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 0,85 \sqrt{\frac{235}{235}} = 0,85.$$

Для полиці:

Звис полиці:

$$c = \frac{b - t_w - 2k_f}{2} = \frac{200 - 10 - 2 \cdot 6}{2} = 89 \text{ мм},$$

де k_f – мінімальне значення катета зварного шва колони.

$$c/t_f = 89/12 = 7,42.$$

Граничне співвідношення звису полиці до товщини для 1-го Класу поперечних перерізів дорівнює:

$$\frac{c}{t} \leq 9\epsilon = 9 \cdot 0,85 = 7,65.$$

Перевіряємо умову:

$$7,42 < 7,65.$$

Таким чином, полиця поперечного перерізу колони відноситься до 1-го Класу.

Для стінки:

При стиску:

$$c = h - 2 \cdot t_f - 2 \cdot k_f = 304 - 2 \cdot 12 - 2 \cdot 6 = 268 \text{ мм.}$$

$$c/t_w = 268/10 = 26,8.$$

Граничне співвідношення висоти стінки до товщини для 1-го Класу поперечних перерізів дорівнює:

$$\frac{c}{t} \leq 72\varepsilon = 33 \times 0,85 = 28,1.$$

Перевіряємо умову:

$$26,8 < 28,1.$$

Умова виконується, отже, стінка відноситься до 1-го Класу.

Таким чином, навіть при впливі підвищеної температури переріз колони відноситься до 1-го Класу.

7. Визначаємо коефіцієнт стійкості χ_{fi} :

$$\chi_{fi} = \frac{I}{\Phi_{\theta} + \sqrt{\Phi_{\theta}^2 - \bar{\lambda}_{\theta}^2}},$$

де:

$$\Phi_{\theta} = \frac{I}{2} \left[I + \alpha \bar{\lambda}_{\theta} + \lambda_{\theta}^2 \right];$$

$$\alpha = 0,65 \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 0,65 \sqrt{\frac{235}{235}} = 0,65.$$

Умовна гнучкість колони $\bar{\lambda}$ (при нормальній температурі зовнішнього середовища) визначається з виразу:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i} \cdot \frac{1}{\lambda_1},$$

де:

L_{cr} – розрахункова довжина у площині, що розглядається, $L_{cr} = 4,65 \text{ м}$;

i – радіус інерції для перерізу бруто відносно осі, що розглядається;

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 93,9\varepsilon = 93,9 \sqrt{\frac{235}{235}} = 93,9.$$

Для перерізу, що розглядається $i_z = 46 \text{ мм}$, тоді

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i} \cdot \frac{1}{\lambda_1} = \frac{4650}{46} \cdot \frac{1}{93,9} = 1,07.$$

Умовна гнучкість $\bar{\lambda}$ при досягненні температури сталі θ_a приймається рівною:

$$\bar{\lambda}_{\theta} = \bar{\lambda} \sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}}.$$

Визначаємо відносну гнучкість та коефіцієнт χ_{fi} відповідно при температурах 400, 500, 600, 700 и 800°C:

Температура сталі θ_a , °C	$k_{y,\theta}$	$k_{E,\theta}$	λ_{θ}	Φ_{θ}	χ_{fi}
400	1,0	0,7	1,28	1,73	0,3444
500	0,78	0,6	1,22	1,64	0,3652
600	0,47	0,31	1,32	1,796	0,3315
700	0,23	0,13	1,42	1,98	0,299
800	0,11	0,09	1,18	1,58	0,3791

4.2.3.2(1)
ДСТУ-Н Б
EN 1993-1-2

8. Визначаємо критичну температуру θ_{cr} , °C, при якій розрахункове значення несучої здатності падає нижче рівня діючих зусиль (в даному випадку це $E_{fi,d} = N_{fi,d} = 169,36$ кН).

$$N_{b,fi,t,Rd} = \frac{\chi_{fi} A k_{y,\theta} f_y}{\gamma_{M,fi}}$$

де:

$\gamma_{M,fi}$ – коефіцієнт надійності для матеріалу під час пожежі, $\gamma_{M,fi} = 1,0$;
A – площа поперечного перерізу колони, A=76 см².

Температура сталі θ_a , °C	χ_{fi}	$N_{b,fi,t,Rd}$
400	0,3444	615,11
500	0,3652	508,85
600	0,3315	278,25
700	0,299	122,8
800	0,3791	74,5

Методом інтерполяції визначаємо **критичну температуру для колони** при розрахунковому навантаженні в умовах пожежі $E_{fi,d} = N_{fi,d} = 169,36$ кН:

$$\theta_{cr} = 600 + \frac{169,36 - 278,25}{122,8 - 278,25} \cdot \frac{700 - 600}{1} = 670^\circ\text{C}.$$

9. В якості альтернативи можна визначити **критичну температуру** спрощеним способом, використовуючи Таблицю 3.3.

При рівномірному розподілі температури θ_a та з урахуванням того, що $\gamma_{M,fi}=1,0$, $N_{fi,\theta,Rd}$ визначається за формулою:

$$N_{b,fi,Rd} = \chi_{fi} \cdot A \cdot k_{y,\theta} \cdot f_y = f'_{y,\theta,\bar{\lambda}} \cdot A,$$

де:

A – площа поперечного перерізу, A = 76 см²;

$f'_{y,\theta,\bar{\lambda}}$ – це граничне напруження втрати стійкості для заданої температури сталі θ_a при умовній гнучкості $\bar{\lambda}$

$$f'_{y,\theta,\bar{\lambda}} = \chi_{fi} \cdot A \cdot k_{y,\theta}$$

Для перерізу, що розглядається

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i} \cdot \frac{1}{\lambda_1} = \frac{4650}{46} \cdot \frac{1}{93,9} = 1,07.$$

Тоді, використовуючи Таблицю 3.3 (сталь S235), методом інтерполяції отримаємо:

Температура сталі θ_a , °C	$f'_{y,\theta,\bar{\lambda}}$	A	$N_{b,fi,t,Rd}$
400	82,3	76 см ²	625,48
500	68,43		520,1
600	37,14		282,3
700	16,86		128,14
800	9,86		75

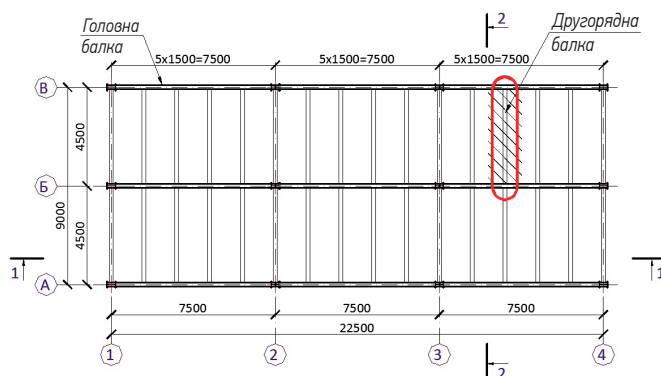
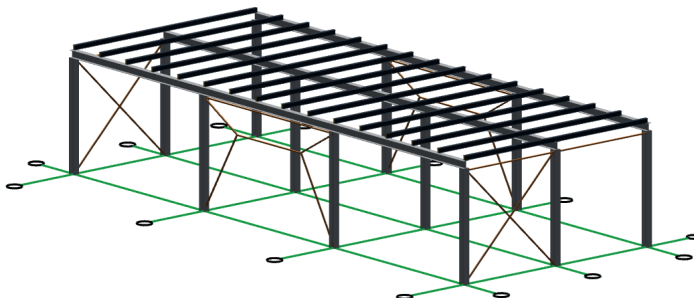
Далі, методом інтерполяції визначаємо **критичну температуру для колони** при розрахунковому навантаженні при пожежі $E_{fi,d} = N_{fi,d} = 169,36$ кН:

$$\theta_{cr} = 600 + \frac{169,36 - 282,3}{128,14 - 282,3} \cdot \frac{700 - 600}{1} = 673,3^\circ\text{C}.$$

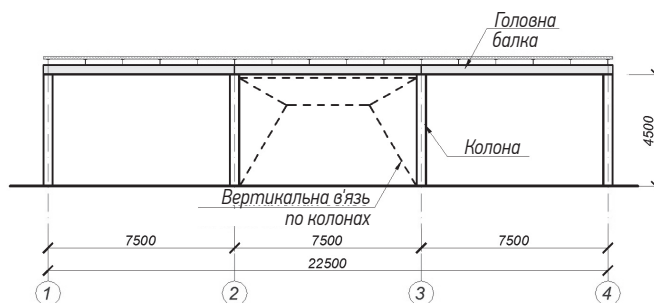
Як бачимо, похибка обчислень за таблицями незначна.

3.1.8.2 Розрахунок згинальних елементів, схильних до втрати стійкості

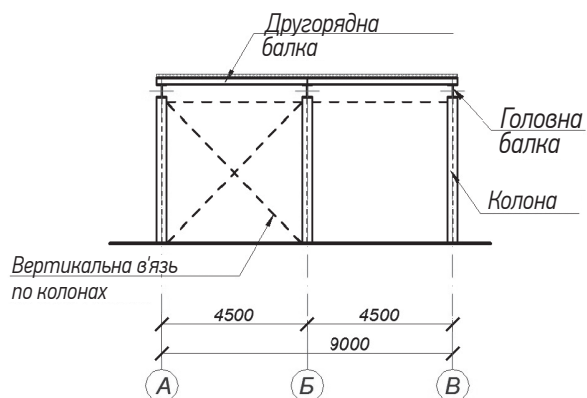
Розглянемо головну балку, розташовану по осі "Б" в осях "2"- "3". Прийнято, що балка шарнірно закріплена на колонах, та її верхній пояс не є розкріпленим із площини, оскільки другорядні балки спираються поповерхово. Проліт головної балки складає $L=7,5$ м, а крок – 4,5 м.



Розріз 1-1



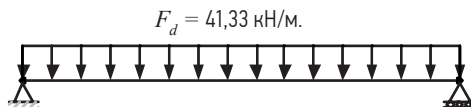
Розріз 2-2



Приклад 5.1.3
Публікація
УЦСБ-006-14

1. Сумарне погонне розрахункове навантаження на головну балку:

$$F_d = 41,33 \text{ кН/м.}$$



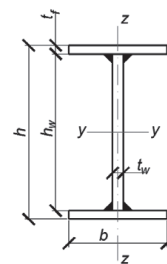
2. Максимальний згинальний момент в головній балці при рівномірно розподіленому навантаженні знаходиться в середині прольоту:

$$M_{y,ED} = \frac{F_d L^2}{8} = \frac{41,33 \cdot 7,5^2}{8} = 290,6 \text{ кНм.}$$

3. Приймаємо балку зі сталі S 235. При попередній максимальній товщині перерізу елемента $t \leq 40$ мм границя текучості для вибраної сталі рівна $f_y = 235 \text{ Н/мм}^2$.

4. Приймаємо зварну балку, складену з листів наступних розмірів:

Висота поперечного перерізу	$h = 412$ мм
Ширина поперечного перерізу	$b = 300$ мм
Висота стінки	$h_w = 380$ мм
Товщина стінки	$t_w = 10$ мм
Товщина полиці	$t_f = 16$ мм
Площа поперечного перерізу балки	$A = 134 \text{ см}^2$



Примітка. Згідно з публікацією УЦСБ-006-14 (Приклад 5.1.3), переріз балки при нормальній температурі зовнішнього середовища відноситься до 1-го Класу.

5. Розрахункове навантаження в умовах пожежі:

$$E_{fi,d,t} = E_{fi,d} \cdot \eta_{fi} \cdot E_d,$$

де:

E_d – розрахункове значення відповідної сили або моменту при нормальній температурі, для основних сполучень впливів згідно з ДСТУ-Н Б EN 1990; у випадку, що розглядається $E_d = M_{Ed}$;

η_{fi} – коефіцієнт зниження для розрахунку рівня навантаження в умовах пожежі;

найменше значення з:

$$\eta_{fi} = \frac{G_k + \psi_{fi} Q_{k,l}}{\gamma_G G_k + \gamma_{Q,l} \psi_{0,1} Q_{k,l}}, \quad (3.4b)$$

$$\eta_{fi} = \frac{G_k + \psi_{fi} Q_{k,l}}{\xi \gamma_G G_k + \gamma_{Q,l} Q_{k,l}}, \quad (3.4c)$$

де:

$Q_{k,l}$ – характеристичне значення переважаючого або головного (першого) змінного впливу;

G_k – характеристичне значення постійного впливу;

γ_G – коефіцієнт надійності для постійних впливів;

$\gamma_{Q,l}$ – коефіцієнт надійності для першого змінного впливу;

ψ_{fi} – коефіцієнт поєднання впливів, приймається рівним $\psi_{2,l}$ (див. Таблицю 3.2.).

ξ – коефіцієнт зниження для урахування несприятливих постійних впливів.

Таким чином:

$$Q_{k,l} = 4,9 \text{ кН/м}^2;$$

$$G_k = 1,02 \text{ (вага покриття)} + 0,483 \text{ (вага балок перекриття)} = 1,503 \text{ кН/м}^2;$$

$$\gamma_G = 1,35;$$

$$\gamma_{Q,l} = 1,5;$$

$$\psi_{fi} = \psi_2 = 0,8 \text{ (для складських площ).}$$

2.4.2(2)
ДСТУ-Н Б
EN 1993-1-2

Формула (2.5a)
ДСТУ-Н Б
EN 1993-1-2

Формула (2.5b)
ДСТУ-Н Б
EN 1993-1-2

Коефіцієнт зниження:

$$\eta_{fi} = \frac{1,503 + 0,8 \cdot 4,9}{1,35 \cdot 1,503 + 1,5 \cdot 1,0 \cdot 4,9} = 0,57,$$

$$\text{або } \eta_{fi} = \frac{1,503 + 0,8 \cdot 4,9}{1,15 \cdot 1,503 + 1,5 \cdot 4,9} = 0,581.$$

Приймаємо найменше значення,

$$\eta_{fi} = 0,57;$$

Отже, розрахункове навантаження в умовах пожежі:

$$E_{fi,d} = M_{fi,d} = 0,57 \cdot 290,6 = 165,64 \text{ кНм.}$$

6. Незважаючи на те, що переріз балки при нормальній температурі відноситься до 1-го Класу, в умовах підвищеної температури він може переходити в інші класи, оскільки

$$\varepsilon = 0,85 \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 0,85 \sqrt{\frac{235}{235}} = 0,85.$$

Для полиці:

Звис полиці:

$$c = \frac{b - t_w - 2k_f}{2} = \frac{300 - 10 - 2 \cdot 6}{2} = 139 \text{ мм,}$$

де k_f - мінімальне значення катета зварного шва балки.

Тоді відношення ширини полиці балки до її товщини дорівнює:

$$\frac{c}{t_f} = \frac{139}{16} = 8,69$$

Граничне співвідношення ширини полиці до товщини для 1-го Класу поперечних перерізів дорівнює:

$$\frac{c}{t} \leq 9\varepsilon = 9 \cdot 0,85 = 7,65.$$

Перевіряємо умову:

$$8,69 > 7,65.$$

Умова виконується, таким чином, полиця поперечного перерізу балки не відноситься до 1-го Класу.

Граничне співвідношення ширини полиці до товщини для 2-го Класу поперечних перерізів дорівнює:

$$\frac{c}{t} \leq 10\varepsilon = 10 \cdot 0,85 = 8,5.$$

Перевіряємо умову:

$$8,69 > 8,5.$$

Отже, полиця поперечного перерізу балки не відноситься до 2-го Класу.

Граничне співвідношення ширини полиці до товщини для 3-го Класу поперечних перерізів дорівнює:

$$\frac{c}{t} \leq 14\varepsilon = 14 \cdot 0,85 = 11,9.$$

Перевіряємо умову:

$$8,69 < 11,9.$$

Таким чином, полиця поперечного перерізу балки відноситься до 3-го Класу.

Для стінки:

При чистому згині:

$$c = h - 2 \cdot t_f - 2 \cdot k_f = 412 - 2 \cdot 16 - 2 \cdot 6 = 368 \text{ мм.}$$

$$\frac{c}{t_w} = \frac{368}{10} = 36,8$$

Граничне співвідношення висоти стінки до товщини для 1-го Класу поперечних перерізів дорівнює:

$$\frac{c}{t} \leq 72\varepsilon = 72 \cdot 0,85 = 61,2.$$

Перевіряємо умову:

$$36,8 < 61,2.$$

Отже, стінка при чистому згині відноситься до 1-го Класу.

Таким чином, при впливі підвищеної температури переріз балки відноситься до 3-го Класу.

7. Несуча здатність поперечного перерізу балки на згин при рівномірному розподіленій температурі θ_a визначається за формулою:

$$M_{fi,t,Rd} = k_{y,\theta,max} M_{Rd} \frac{\gamma_{M,0} / \gamma_{M,fi}}{k_1 k_2},$$

де:

4.2.3.3(7)
ДСТУ-НБ
EN 1993-1-2

k_1 – поправочний коефіцієнт для урахування нерівномірного розподілу температури по ширині поперечного перерізу; $k_1 = 1,0$ (для незахищених балок, що піддаються вогневому впливу з трьох сторін та мають композитну або бетонну плиту з четвертої сторони, даний коефіцієнт $k_1 = 0,7$);

4.2.3.3(8)
ДСТУ-НБ
EN 1993-1-2

k_2 – поправочний коефіцієнт для урахування нерівномірного розподілу температури по довжині балки $k_2 = 1,0$;

M_{Rd} – відповідна несуча здатність перерізу бруто за міцністю при нормальній температурі, що визначається наступним чином:

$M_{Rd} = M_{el,Rd}$ для перерізів Класу 3 в пружній стадії відповідно без урахування або з урахуванням впливу поперечного зусилля (при $V_{Ed} \geq 0,5V_{Rd}$)

$$M_{Rd} = \frac{W_y \cdot f_y}{\gamma_{MO}} = \frac{2049 \cdot 235}{1,0} \cdot 10^{-3} = 481,5 \text{ кНм};$$

Таблиця 3.1
ДСТУ-НБ
EN 1993-1-2

$k_{y,\theta}$ – коефіцієнт зниження границі текучості при досягненні сталлю температури θ_a в момент часу t , див. п. 2.4.1.1;

Коефіцієнт надійності за несучою здатністю при температурі зовнішнього середовища $\gamma_{MO} = 1,0$;

Коефіцієнт надійності за матеріалом при підвищеній температурі $\gamma_{M,fi} = 1,0$.

8. Визначаємо критичну температуру θ_{cr} , °C, при якій розрахункове значення несучої здатності $M_{fi,\theta,Rd}$ падає нижче рівня діючих зусиль (у випадку, що розглядається це $E_{fi,d} = M_{fi,d} = 165,64 \text{ кНм}$).

Температура сталі θ_a , °C	$k_{y,\theta}$	$M_{fi,\theta,Rd}$
400	1,0	687,9
500	0,78	536,5
600	0,47	323,3
700	0,23	158,2
800	0,11	75,7

Методом інтерполяції визначаємо критичну температуру для балки при розрахунковому зусиллі при пожежі $E_{fi,d} = M_{fi,d} = 165,64 \text{ кНм}$:

$$\theta_{cr} = 600 + \frac{165,64 - 323,3}{158,2 - 323,3} \cdot \frac{700 - 600}{1} = 696^\circ\text{C}.$$

9. Розрахункова несуча здатність за втратою стійкості плоскої форми згину балки у момент часу t визначається за формулою:

$$M_{b,fi,t,Rd} = \chi_{LT,fi} W_y k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}},$$

де:

W_y – відповідний момент опору перерізу, $W_y = W_{el,y} = 1972,622 \text{ см}^3$ для перерізу балки (3 Клас перерізу);

$\chi_{LT,fi}$ – коефіцієнт зниження для втрати стійкості плоскої форми згину в умовах пожежі;

значення коефіцієнта стійкості $\chi_{LT,fi}$ визначається у відповідності з наступною залежністю:

$$\chi_{LT,\theta} = \frac{1}{\phi_{LT,\theta} + \sqrt{(\phi_{LT,\theta})^2 - (\bar{\lambda}_{LT,\theta})^2}},$$

где:

$$\phi_{LT,\theta} = \frac{1}{2} \left[1 + \alpha \bar{\lambda}_{LT,\theta} + (\bar{\lambda}_{LT,\theta})^2 \right];$$

$$\bar{\lambda}_{LT,\theta} = \bar{\lambda}_{LT} \left[\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}} \right]^{0,5},$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = 0,93;$$

$$\alpha = 0,65 \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 0,65 \sqrt{\frac{235}{235}} = 0,65$$

Таким чином, визначаємо відносну гнучкість та коефіцієнт χ_{fi} відповідно при температурах 400, 500, 600, 700 и 800°C:

Температура сталі $\theta_a, ^\circ\text{C}$	$k_{y,\theta}$	$k_{E,\theta}$	$\lambda_{LT,\theta}$	ϕ_θ	χ_{fi}
400	1,0	0,7	1,11	1,48	0,41
500	0,78	0,6	1,06	1,41	0,43
600	0,47	0,31	1,15	1,53	0,39
700	0,23	0,13	1,23	1,67	0,36
800	0,11	0,09	1,03	1,36	0,44

10. Визначаємо критичну температуру $\theta_{cr}, ^\circ\text{C}$, при якій розрахункове значення несучої здатності $M_{b,fi,t,Rd}$ падає нижче рівня діючих зусиль (в даному випадку це $E_{fi,d} = M_{fi,d} = 165,64$ кНм).

$$M_{b,fi,t,Rd} = \chi_{LT,\theta} W_y k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}},$$

де:

$\gamma_{M,fi}$ - коефіцієнт надійності для матеріалу під час пожежі, $\gamma_{M,fi} = 1,0$.

Температура сталі $\theta_a, ^\circ\text{C}$	χ_{fi}	$M_{b,fi,t,Rd}$
400	0,41	196,2
500	0,43	161,1
600	0,39	89,13
700	0,36	39,8
800	0,44	23,5

Методом інтерполяції визначаємо критичну температуру для балки при розрахунковому зусиллі в умовах пожежі $E_{fi,d} = M_{fi,d} = 165,64$ кНм:

$$\theta_{cr} = 400 + \frac{165,64 - 196,2}{161,1 - 196,2} \cdot \frac{500 - 400}{1} = 487^\circ\text{C}.$$

Приймаємо гірше з двох значень. Отже, **критична температура для балки складає $\theta_{cr} = 487^\circ\text{C}$.**

3.1.8.3 Розрахунок стиснуто-зігнутих та позацентрово стиснутих елементів, схильних до втрати стійкості

У даному прикладі розглядається колона рамного поперечника будівлі з шарнірним обпиранням зверху ферми покриття. Крок рам із площини складає 6 м. Колона у складі рами будівлі працює як стиснуто-зігнута, оскільки сприймає вітрове навантаження, що призводить до появи згинальних моментів. Прийнято також, що переріз працює тільки в межах пружної стадії роботи сталі.

2.3(1)
ДСТУ-НБ
EN 1993-1-2

Приклад 5.2.3
Публікація
УЦСБ-006-14

Розглянутий переріз колони має головну вісь у-у та другорядну - z-z. При геометричній висоті колони $l_{ef,y} = 700$ см її розрахункова довжина в площині рами буде становити:

$$L_{cr,y} = \mu \cdot l_{ef,y} = 700 \cdot 2 = 1400 \text{ см.}$$

Тут коефіцієнт розрахункової довжини прийнято орієнтовно $\mu = 2$, враховуючи жорстке закріплення колони у базі та шарнірне приєднання ферми на оголовку, яке не забезпечує закріплення від зсуву верху. У реальному проектуванні коефіцієнти розрахункової довжини підлягають уточненню згідно підібраним параметрам жорсткості та реальним умовам закріплення елементів.

Прийнято, що з площини поперечнику колони надійно розкріплена системою в'язей, та зусилля в цьому напрямку в ній не виникають. В'язі з площини поставлені по колоні із кроком 3,5 м, а коефіцієнт розрахункової довжини ділянок між точками розкріплення прийнято $\mu = 1$.

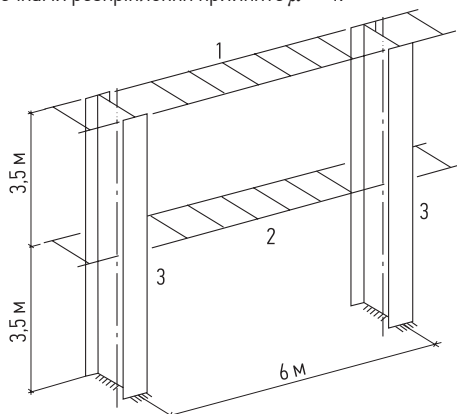
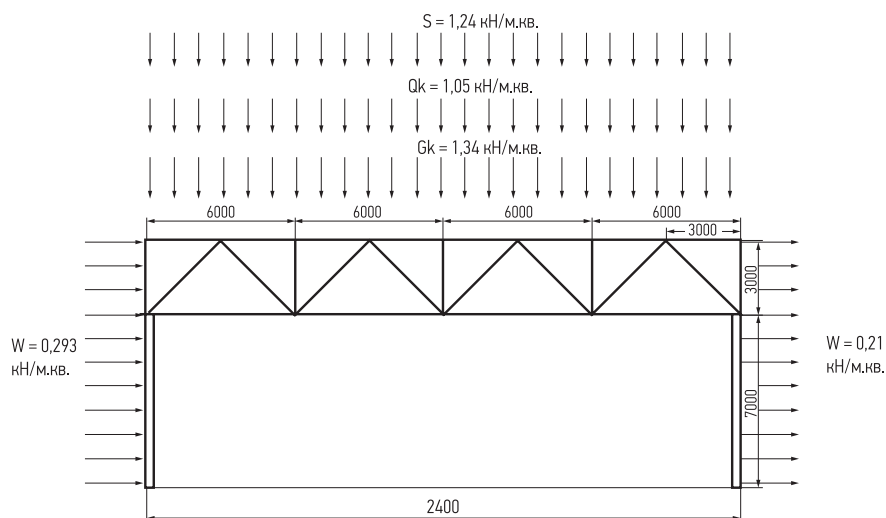
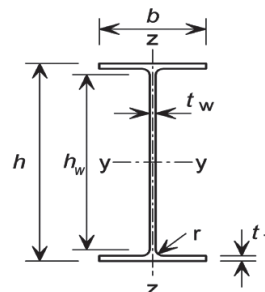


Схема розкріплення колон з площини: 1 – горизонтальні в'язі по верху колон;
2 – проміжні горизонтальні в'язі розкріплення з площини; 3 – колони.

1. Переріз колони - двотавр № 50, згідно сортаменту ГОСТ 8239-89, який має наступні геометричні характеристики:

$A = 100,0 \text{ см}^2$	$i_z = 3,23 \text{ см}$
$I_y = 39\,727 \text{ см}^4$	$t_w = 10,0 \text{ мм}$
$I_z = 1\,043 \text{ см}^4$	$t_f = 15,2 \text{ мм}$
$W_y = 1\,589 \text{ см}^3$	$r = 17,0 \text{ мм}$
$W_z = 123 \text{ см}^3$	$h = 500,0 \text{ мм}$
$W_{pl,y} = 1\,852,8 \text{ см}^3$	$h_w = h - 2t_f = 469,6 \text{ мм}$
$i_y = 19, \text{ см}$	$b = 170 \text{ мм}$



Розрахункова схема поперечника будівлі

Зусилля	Власна вага G_k	Корисне навантаження (змінне) Q_k	Сніг S	Вітер W	Сполучення	Формула
M	7,3	5,7	6,8	68,4	131,2	$G_k \cdot 1,35 + (Q_k + S + W) \cdot 1,5$
N	-110,6	-77,1	-91	-0,6	-402,4	$G_k \cdot 1,35 + (Q_k + S + W) \cdot 1,5$
Q	-1	-0,8	-1	-14,3	-25,5	$G_k \cdot 1,35 + (Q_k + S + W) \cdot 1,5$

Отже, приймаємо до розрахунку ліву колону, в якій виникають більші, ніж у правій, зусилля за результатами сполучень.

Згідно публікації УЦСБ-006-14 (Приклад 5.1.3), переріз колони при нормальній температурі зовнішнього середовища відноситься до 1-го Класу.

2. Розрахункове навантаження в умовах пожежі:

$$E_{fi,d,t} = E_{fi,d} = \eta_{fi} \cdot E_d,$$

де:

E_d – розрахункове значення відповідної сили або моменту при нормальній температурі, для основних сполучень впливів згідно з ДСТУ-Н Б EN 1990; в даному випадку $E_d = M_{Ed}$ и $E_d = N_{Ed}$;

η_{fi} – коефіцієнт зниження для розрахунку рівня навантаження в умовах пожежі

найменше значення з:

$$\eta_{fi} = \frac{G_k + \psi_{fi} Q_{k,l}}{\gamma_G G_k + \gamma_{Q,l} \psi_{0,1} Q_{k,l}}, \quad (3.4b)$$

$$\eta_{fi} = \frac{G_k + \psi_{fi} Q_{k,l}}{\xi \gamma_G G_k + \gamma_{Q,l} Q_{k,l}}, \quad (3.4c)$$

де:

$Q_{k,l}$ – характеристичне значення переважаючого або головного (першого) змінного впливу;

G_k – характеристичне значення постійного впливу;

γ_G – коефіцієнт надійності для постійних впливів;

$\gamma_{Q,l}$ – коефіцієнт надійності для першого змінного впливу;

ψ_{fi} – коефіцієнт поєднання впливів, приймається рівним $\psi_{2,1}$ (див. Таблицю 3.2.).

ξ – коефіцієнт зниження для урахування несприятливих постійних впливів.

Таким чином:

$Q_{k,l} = 91$ кН;

$G_k = 110,6$ кН;

$\gamma_G = 1,35$;

$\gamma_{Q,l} = 1,5$;

$\psi_{fi} = \psi_2 = 0,8$ (для складських площадей).

Коефіцієнт зниження:

$$\eta_{fi} = \frac{110,6 + 0,8 \cdot 91}{1,35 \cdot 110,6 + 1,5 \cdot 91} = 0,64,$$

$$\text{або } \eta_{fi} = \frac{110,6 + 0,8 \cdot 91}{1,15 \cdot 110,6 + 1,5 \cdot 91} = 0,696.$$

Приймаємо найменше значення,

$\eta_{fi} = 0,64$;

Таким чином, розрахункове навантаження в умовах пожежі:

$$N_{fi,d} = 0,64 \cdot 402,4 = 257,54 \text{ кН};$$

$$M_{fi,d} = 0,64 \cdot 131,2 = 83,97 \text{ кНм}.$$

2.4.2(2)
ДСТУ-Н Б
EN 1993-1-2

2.4.2(3)
ДСТУ-Н Б EN 1993-1-2

Формула (2.5a)
ДСТУ-Н Б
EN 1993-1-2

Формула (2.5b)
ДСТУ-Н Б
EN 1993-1-2

4.2.2
ДСТУ-Н Б
EN 1993-1-2

3. Незважаючи на те, що переріз колони при нормальній температурі відноситься до 1-го класу, в умовах підвищеної температури він може переходити в інші класи, оскільки

$$\varepsilon = 0,85 \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 0,85 \sqrt{\frac{235}{270}} = 0,793.$$

Колона прийнята зі сталі С275, для якої при номінальній товщині елемента $t \leq 40$ мм границя текучості рівна: $f_y = 270$ Н/мм².

Для розглянутого двотавра маємо:

Для стінки:

$$c = d = h - 2 \cdot t_f - 2 \cdot r = 500 - 2 \cdot 15,2 - 2 \cdot 17 = 435,6 \text{ мм.}$$

$$\frac{c}{t_w} = \frac{435,6}{10} = 43,56.$$

В даному випадку відносна висота стиснутої зони стінки $\alpha = 0,7$.

Для 1-го Класу поперечних перерізів маємо:

$$\begin{aligned} \frac{c}{t_w} &\leq 396\varepsilon / (13\alpha - 1); \\ 396\varepsilon / (13\alpha - 1) &= 38,8. \end{aligned}$$

Перевіряємо умову:

$$43,56 > 38,8.$$

Для 2-го Класу поперечних перерізів:

$$\frac{c}{t_w} \leq 456\varepsilon / (13\alpha - 1) = 44,6.$$

Перевіряємо умову:

$$43,56 < 44,6.$$

Для полиці:

$$c = (b - t_w) / 2 - r = (170 - 10) / 2 - 17 = 63,0.$$

$$\frac{c}{t_f} = \frac{63,0}{15,2} = 4,14,$$

$$\frac{c}{t_f} \leq 9\varepsilon = 7,1.$$

Перевіряємо умову:

$$4,14 < 7,1.$$

Таким чином, при впливі підвищеної температури даний переріз колони відноситься до **2-го Класу**.

4. Визначаємо гнучкість перерізу при температурі зовнішнього середовища:

$$\bar{\lambda} = \lambda \cdot [f_y / E]^{0,5} \cdot \frac{[\beta_A]^{0,5}}{\pi},$$

где $\beta_A = A_{eff} / A = 1$ для поперечних перерізів Класів 1, 2 або 3;

в площині

$$\lambda_y = 1400 / 19,9 = 70,35;$$

із площини

$$\lambda_z = 350 / 3,23 = 108,36.$$

Звідси:

в площині

$$\bar{\lambda}_y = 70,35 \cdot [270 / 206000]^{0,5} \cdot \frac{[1]^{0,5}}{\pi} = 0,81;$$

із площини

$$\bar{\lambda}_z = 108,36 \cdot [270 / 206000]^{0,5} \cdot \frac{[1]^{0,5}}{\pi} = 1,27.$$

5. Розрахункова несуча здатність за міцністю та стійкістю колони в момент часу t визначається за формулами:

$$\frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{min,fi} A k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_y M_{y,fi,Ed}}{W_y k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_z M_{z,fi,Ed}}{W_z k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} \leq 1,0;$$

$$\frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{z,fi} A k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_{LT} M_{y,fi,Ed}}{\chi_{LT} W_y k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_z M_{z,fi,Ed}}{W_z k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} \leq 1,0,$$

де:

W_y и W_z – відповідні моменти опору перерізу;

$k_{y,\theta}$ – коефіцієнт зниження границі текучості при досягненні температури сталі θ_o в момент часу t .

Для перерізу, який працює тільки у межах пружної стадії:

$$W_y = W_{el,y} = 1\,589 \text{ см}^3.$$

Для колони, що розглядається, згинальний момент у верхньому перерізі стрижня (шарнірний вузол сполучення з фермою) рівний нулю ($M = 0$ кНм), а момент в жорстко защемленій базі колони є максимальним M_f . Отже, коефіцієнт співвідношення моментів $\psi = 0$. Тоді коефіцієнт урахування впливу моменту буде рівний:

$$\beta_{M,\psi} = 1,8 - 0,7\psi = 1,8.$$

Оскільки згин відбувається тільки в площині рами (відносно осі у-у), то формули розрахункової несучої здатності набувають наступну форму:

$$\frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{min,fi} A k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_y M_{y,fi,Ed}}{W_y k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} \leq 1,0;$$

$$\frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{z,fi} A k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_{LT} M_{y,fi,Ed}}{\chi_{LT} W_y k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} \leq 1,0,$$

χ_{fi} – коефіцієнт зниження при втраті стійкості у плоскій формі згину в умовах пожежі.

Значення χ_{fi} визначається згідно наступної залежності:

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\phi_{\theta} + \sqrt{(\phi_{\theta})^2 - (\bar{\lambda}_{\theta})^2}},$$

де:

$$\phi_{\theta} = \frac{1}{2} \left[1 + \alpha \bar{\lambda}_{\theta} + (\bar{\lambda}_{\theta})^2 \right];$$

$$\bar{\lambda}_{\theta} = \bar{\lambda} \cdot \left[\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}} \right]^{0,5};$$

$$\alpha = 0,65 \cdot \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 0,65 \cdot \sqrt{\frac{235}{270}} = 0,61.$$

Значення понижуючого коефіцієнта зниження для прокатних перерізів при згині визначається як:

$$\chi_{LT,fi} = \frac{1}{\phi_{LT,\theta} + \sqrt{(\phi_{LT,\theta})^2 - (\bar{\lambda}_{LT,\theta})^2}}.$$

Умовна гнучкість $\bar{\lambda}_{LT,\theta} = \bar{\lambda}_{LT} \cdot \left[\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}} \right]^{0,5}$, де $\bar{\lambda}_{LT} = 0,902$.

$$\phi_{LT,\theta} = \frac{1}{2} \left[1 + \alpha \cdot \bar{\lambda}_{LT,\theta} + (\bar{\lambda}_{LT,\theta})^2 \right]$$

Для розрахунку у площині рами приймаємо криву втрати стійкості "b" (оскільки $h/b=500/170=2,94>2$) і, отже, коефіцієнт урахування недосконалостей $\alpha_{LT}=0,34$.

Звідси визначаємо умовну гнучкість та коефіцієнт χ_{fi} , χ_{LT} при температурах 300, 400, 500, 600, 700 °C:

Температура сталі $\theta_a, ^\circ\text{C}$	$k_{y,\theta}$	$k_{E,\theta}$	$\lambda_{z,\theta}$	$\lambda_{y,\theta}$	$\lambda_{LT,\theta}$	$\Phi_{z,\theta}$	$\Phi_{y,\theta}$	$\Phi_{LT,\theta}$	$\chi_{z,fi}$	$\chi_{y,fi}$	$\chi_{LT,fi}$
300	1,0	0,8	1,52	0,97	1,08	2,12	1,26	1,41	0,28	0,48	0,43
400	1,0	0,7	1,45	0,92	1,03	1,99	1,21	1,34	0,30	0,50	0,45
500	0,78	0,6	1,56	1,00	1,11	2,20	1,30	1,46	0,27	0,47	0,42
600	0,47	0,31	1,69	1,08	1,2	2,44	1,41	1,59	0,24	0,43	0,38
700	0,23	0,13	1,40	0,90	1,00	1,91	1,17	1,30	0,31	0,52	0,47

4.2.3.5
ДСТУ-НБ
EN 1993-1-2

Визначаємо коефіцієнт k_y і k_{LT} :

$$k_{LT} = 1 - \frac{\mu_{LT} N_{fi,Ed}}{\chi_{z,fi} A k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} \leq 1,$$

при $\mu_{LT}=0,15 \bar{\lambda}_{z,\theta} - \beta_{M,LT} - 0,15 \leq 0,9$

$$k_y = 1 - \frac{\mu_y N_{fi,Ed}}{\chi_{y,fi} A k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} \leq 3,$$

при $\mu_y = (1,2\beta_{M,y} - 3) \bar{\lambda}_{y,\theta} + 0,44\beta_{M,y} - 0,29 \leq 0,8$;

коефіцієнт надійності при підвищеній температурі $\gamma_{M,fi} = 1,0$.

Таким чином:

Температура сталі $\theta_a, ^\circ\text{C}$	μ_{LT}	μ_y	k_{LT}	k_y
300	0,26	-0,31	0,91	1,06
400	0,24	-0,27	0,90	1,07
500	0,27	-0,34	0,79	1,15
600	0,31	-0,40	0,47	1,39
700	0,23	-0,25	0,36	1,42

Знаючи всі необхідні параметри, визначаємо коефіцієнти використання при різних температурах:

Температура сталі $\theta_a, ^\circ\text{C}$	$\frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{min,fi} A k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_y M_{y,fi,Ed}}{W_{y,k_{y,\theta}} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}}$	$\frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{z,fi} A k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_{LT} M_{y,fi,Ed}}{\chi_{LT} W_{y,k_{y,\theta}} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}}$
300	0,55<1	0,75<1
400	0,68<1	0,91>1
500	1,24<1	1,55>1
600	2,92>1	2,78>1
700	5,31>1	4,16>1

6. Далі методом інтерполяції знаходимо критичну температуру для колони, при якій коефіцієнт використання рівний одиниці:

$$\theta_{cr1} = 400 + \frac{1 - 0,68}{1,24 - 0,68} \cdot \frac{500 - 400}{1} = 457,1^\circ\text{C};$$

$$\theta_{cr2} = 400 + \frac{1 - 0,91}{1,24 - 0,91} \cdot \frac{500 - 400}{1} = 414,1^\circ\text{C}.$$

Приймаємо гірше значення з двох. Отже, **критична температура для колони** складає $\theta_{cr} = 414,1^\circ\text{C}$.

Статичний розрахунок – див. Розділ 3.1.3.

Визначення коефіцієнта зниження для розрахунку рівня навантаження в умовах пожежі $\eta_{fi,t}$ – див. Розділ 3.1.5.

Визначення розрахункових сполучень зусиль в умовах пожежі $E_{fi,d}$ – див. Розділ 3.1.6.

Визначення несучої здатності елемента $R_{fi,d,0}$ при пожежі в момент часу $t=0$ с – див. Розділ 3.1.7.
 $R_{fi,d,0}$ визначається при умовах $t=0$ с и $\theta_a=20^\circ\text{C}$, якщо не вказано інше.

3.2.2.1 Визначення ступеня використання μ_0

4.2.4(3)
ДСТУ-Н Б EN
1993-1-2

- (1) Для конструкцій із поперечними перерізами 1, 2 або 3 Класу та для всіх розтягнутих конструкцій, у яких не настає втрата стійкості, ступень використання несучої здатності μ_0 може бути визначений за формулою:

$$\mu_0 = \frac{E_{fi,d}}{R_{fi,d,0}}, \quad (3.21)$$

де:

$R_{fi,d,0}$ – значення $R_{fi,d,t}$ в момент часу $t = 0$, відповідно до Розділу 3.1.7;
 $E_{fi,d}$ и $R_{fi,d,t}$ приймаються відповідно до Розділів 3.1.6 та 3.1.7.

4.2.4(4)
ДСТУ-Н Б EN
1993-1-2

- (2) Як альтернативний варіант, для розтягнутих конструкцій та для балок, у яких не настає втрата стійкості плоскої форми згину, μ_0 може бути визначений за формулою:

$$\mu_0 = \eta_{fi} \left[\frac{\gamma_{M,fi}}{\gamma_{M,0}} \right], \quad (3.22)$$

де:

$\eta_{fi,t}$ – коефіцієнт, що визначається за Розділом 3.1.5.

4.2.4(2)
ДСТУ-Н Б EN
1993-1-2

μ_0 приймається не менше 0,013.

За аналогією з методом, зазначеним в Розділі 3.1, для балок з композитною (сталебетонною) або бетонною плитою на одній із сторін слід враховувати нерівномірний розподіл температури введенням коефіцієнтів k_1 та k_2 . Тоді ступень використання несучої здатності розраховують як:

$$\mu_0 = k_1 k_2 \frac{M_{fi,d}}{M_{fi,0,Rd}}, \quad (3.23)$$

де коефіцієнти k_1 и k_2 приймають значення:

- для **незахищеної** балки, що піддається дії вогню з трьох сторін та сталебетонною або бетонною плитою, $k_1 = 0.7$;
- для **захищеної** балки, що піддається дії вогню з трьох сторін з сталебетонною або бетонною плитою – $k_1 = 0.85$;

Для нерівномірного температурного розподілу вздовж балки коефіцієнт k_2 приймають:

- для статично невизначеної балки $k_2 = 0.85$
- для інших випадків $k_2 = 1$

4.2.3.3(3),
4.2.3.4(2)
ДСТУ-Н Б EN 1993-1-2

4.2.3.3(7)
ДСТУ-Н Б EN
1993-1-2

4.2.3.3(8)
ДСТУ-Н Б EN
1993-1-2

3.2.2.2 Розрахунок критичної температури

4.2.4(2)
ДСТУ-Н Б EN
1993-1-2

- (1) За винятком випадків, коли необхідно враховувати критерій деформації або втрату стійкості, критична температура сталі $\theta_{a,cr}$ при рівномірному розподілі температури по конструкції, виконаної з вуглецевих сталей S235-S460 по ДСТУ EN 10025 та всіх марок по ДСТУ EN 10210 та ДСТУ EN 10219, в момент часу t може бути визначена на підставі ступеня використання несучої здатності μ_0 в момент часу $t = 0$ із використанням наступної формули:

$$\theta_{a,cr} = 39,19 \ln \left[\frac{I}{0,9674 \mu_0^{3,833}} - I \right] + 482. \quad (3.24)$$

Значення $\theta_{a,cr}$ для заданих значень μ_0 в інтервалі від 0,16 до 1,00 наведені в Таблиці 3.7.

Таблиця 3.7 Значення критичної температури сталі $\theta_{a,cr}$
в залежності від ступеня використання несучої здатності μ_0

μ_0	$\theta_{a,cr}, ^\circ\text{C}$	μ_0	$\theta_{a,cr}, ^\circ\text{C}$	μ_0	$\theta_{a,cr}, ^\circ\text{C}$	μ_0	$\theta_{a,cr}, ^\circ\text{C}$	μ_0	$\theta_{a,cr}, ^\circ\text{C}$
0,16	758,5	0,33	649,3	0,50	584,7	0,67	534,3	0,84	482,6
0,17	749,4	0,34	644,7	0,51	581,5	0,68	531,5	0,85	479,0
0,18	740,8	0,35	640,3	0,52	578,3	0,69	528,6	0,86	475,3
0,19	732,7	0,36	636,0	0,53	575,2	0,70	525,8	0,87	471,4
0,20	725,0	0,37	631,8	0,54	572,1	0,71	522,9	0,88	467,3
0,21	717,6	0,38	627,7	0,55	569,1	0,72	520,1	0,89	463,0
0,22	710,6	0,39	623,7	0,56	566,1	0,73	517,2	0,90	458,4
0,23	703,9	0,40	619,8	0,57	563,1	0,74	514,3	0,91	453,5
0,24	697,5	0,41	616,0	0,58	560,1	0,75	511,3	0,92	448,3
0,25	691,4	0,42	612,2	0,59	557,2	0,76	508,4	0,93	442,5
0,26	685,4	0,43	608,6	0,60	554,3	0,77	505,4	0,94	436,1
0,27	679,7	0,44	605,0	0,61	551,4	0,78	502,3	0,95	428,9
0,28	674,2	0,45	601,4	0,62	548,5	0,79	499,2	0,96	420,6
0,29	668,9	0,46	598,0	0,63	545,7	0,80	496,1	0,97	410,6
0,30	663,8	0,47	594,6	0,64	542,8	0,81	492,8	0,98	397,9
0,31	658,8	0,48	591,2	0,65	540,0	0,82	489,5	0,99	380,1
0,32	654,0	0,49	587,9	0,66	537,1	0,83	486,1	1,00	349,1

3.2.3 Робочі приклади

3.2.3.1 Розрахунок розтягнутих елементів

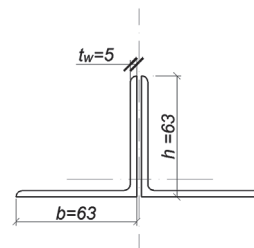
В даному прикладі розглянемо розтягнутий елемент ферми – розкіс.

$N_{Ed} = 326$ кН – розрахункове зусилля у розтягнутому розкісі;

$t_{\phi} = 14$ мм – товщина фасонки;

$l_{ef,x} = 435$ см – розрахункова довжина в площині ферми;

$l_{ef,y} = 435$ см – розрахункова довжина із площини ферми.



Розкіс прийнятий зі спарених гарячекатаних рівнополочкових кутиків відповідно до сортаменту ГОСТ 8509-93: 2 шт 63×5 мм.

1. Геометричні характеристики одного кутика:

$A = 6,13$ см²;

$i_x = 1,94$ см;

$i_y = 3,12$ см.

2. Розрахункове навантаження в умовах пожежі:

$$E_{fi,d,t} = E_{fi,d} = \eta_{fi} \cdot E_d,$$

де:

E_d – розрахункове значення відповідного зусилля або моменту при нормальній температурі, для основних сполучень навантажень відповідно до ДСТУ-Н Б EN 1990. В даному випадку $E_d = N_{Ed}$;

η_{fi} – коефіцієнт зниження для розрахунку рівня навантаження в умовах пожежі

найменше значення з:

Формула (2.5а)
ДСТУ-Н Б
EN 1993-1-2

$$\eta_{fi} = \frac{G_k + \psi_{fi} Q_{k,l}}{\gamma_G G_k + \gamma_{Q,l} \psi_{0,1} Q_{k,l}}, \quad (3.4b)$$

Формула (2.5б)
ДСТУ-Н Б
EN 1993-1-2

$$\eta_{fi} = \frac{G_k + \psi_{fi} Q_{k,l}}{\xi \gamma_G G_k + \gamma_{Q,l} Q_{k,l}}, \quad (3.4c)$$

де:

$Q_{k,l}$ – характеристичне значення переважаючого або головного (першого) змінного навантаження;
 G_k – характеристичне значення постійного навантаження;
 γ_G – коефіцієнт надійності для постійних навантажень;
 $\gamma_{Q,l}$ – коефіцієнт надійності для першого змінного навантаження;
 ψ_{fi} – коефіцієнт поєднання навантажень, приймається рівним $\psi_{2,l}$ (див. Таблицю 3.2).
 ξ – коефіцієнт зниження для урахування несприятливих постійних впливів.

Таким чином:

$$\begin{aligned} Q_{k,l} &= 1,24 \text{ кН/м}^2; \\ G_k &= 1,34 \text{ кН/м}^2; \\ \gamma_G &= 1,35; \\ \gamma_{Q,l} &= 1,5; \\ \psi_{fi} &= \psi_2 = 0,8 \text{ (для складських площ)}. \end{aligned}$$

Коефіцієнт зниження:

$$\eta_{fi} = \frac{1,34 + 0,8 \cdot 1,24}{1,35 \cdot 1,34 + 1,5 \cdot 1,24} = 0,64.$$

$$\text{або } \eta_{fi} = \frac{1,34 + 0,8 \cdot 1,24}{1,15 \cdot 1,34 + 1,5 \cdot 1,24} = 0,686.$$

Приймаємо найменше значення,

$$\eta_{fi} = 0,64;$$

Отже, розрахункове зусилля в умовах пожежі:

$$E_{fi,d} = 0,64 \cdot 326 = 208,64 \text{ кН}.$$

3. Критична температура сталі $\theta_{a,cr}$ при рівномірному розподілі температури в розкосі в момент часу t може бути визначена на підставі ступеня використання несучої здатності μ_0 в момент часу $t = 0$ із застосуванням наступної формули:

$$\theta_{a,cr} = 39,19 \ln \left[\frac{1}{0,9674 \mu_0^{3,833}} - 1 \right] + 482,$$

де ступень використання несучої здатності μ_0 визначається наступним чином:

$$\mu_0 = \frac{E_{fi,d}}{R_{fi,d,0}},$$

де:

$R_{fi,d,0}$ – значення розрахункової несучої здатності $R_{fi,d,t}$ в момент часу $t = 0$ (тобто розрахункова несуча здатність на розтяг до підвищення температури), $R_{fi,d,0} = N_{fi,d,0}$;
 $E_{fi,d}$ – розрахункове зусилля в умовах пожежі $E_{fi,d} = N_{fi,d} = 208,64 \text{ кН}$.

$$N_{fi,\theta,Rd} = k_{y,\theta} N_{Rd} \frac{\gamma_{M,0}}{\gamma_{M,fi}},$$

де:

N_{Rd} – розрахункова несуча здатність поперечного перерізу $N_{pl,Rd}$ при нормальній температурі

$$N_{Rd} = N_{pl,Rd} = 2 \frac{A f_y}{\gamma_{MO}} = 331,02 \text{ кН};$$

$k_{y,\theta}$ – коефіцієнт зниження границі текучості при температурі зовнішнього середовища $\theta_a = 20^\circ\text{C}$ в момент часу $t = 0$, $k_{y,\theta} = 1,0$;

коефіцієнт надійності за несучою здатністю при нормальній температурі $\gamma_{MO} = 1,0$;

коефіцієнт надійності за матеріалом в умовах пожежі $\gamma_{M,fi} = 1,0$.

Звідси:

$$N_{fi,\theta,Rd} = k_{y,\theta} \cdot N_{Rd} \cdot \frac{\gamma_{M,0}}{\gamma_{M,fi}} = 1,0 \cdot 331,02 \cdot \frac{1,0}{1,0} = 331,02 \text{ кН}.$$

Отже, коефіцієнт μ_0 рівний:

$$\mu_0 = \frac{208,64}{331,02} = 0,63.$$

За Таблицею 3.7 визначаємо критичну температуру θ_{cr} , $^\circ\text{C}$:

$$\theta_{cr} = 545,7^\circ\text{C}.$$

4.2.4(2)
ДСТУ-НБ
EN 1993-1-2

4.2.4(3)
ДСТУ-НБ
EN 1993-1-2

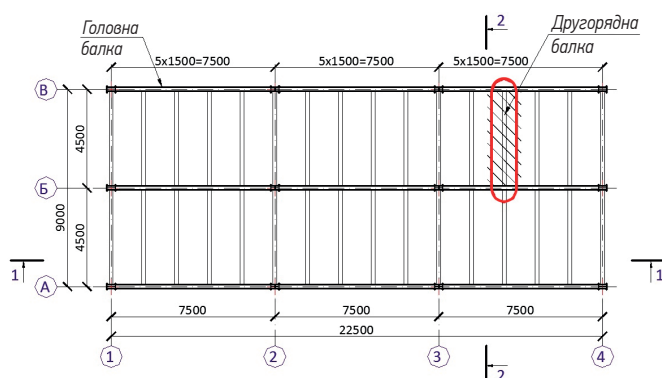
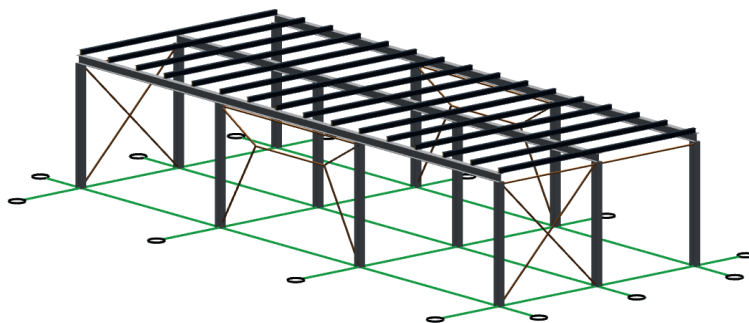
6.2.3(2)
ДСТУ-НБ
EN 1993-1-1

Таблиця 3.1
ДСТУ-НБ
EN 1993-1-2

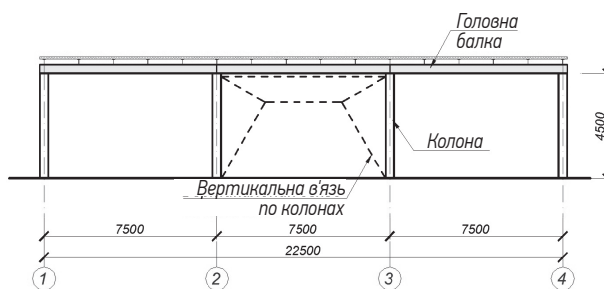
3.2.3.2 Розрахунок елементів, не схильних до втрати стійкості при дії зусиль згину

В даному прикладі розглянемо другорядну балку в осях "2", "Б"- "В". Проліт балки - $L=4,5$ м. Ширина, з якою збирається навантаження на балку, складає 1,5 м.

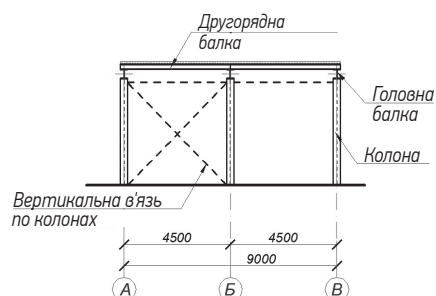
Розглянутий каркас являє собою сталеву конструкцію, в якій колони та головні балки прийняті зі зварних профілів, другорядні балки - з прокатних двотаврів, а в'язі - з замкнених трубчастих перерізів.



Розріз 1-1



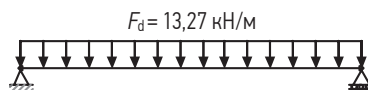
Розріз 2-2



Приклад 5.1.2
Публікація
УЦСБ-006-14

1. Сумарне розрахункове навантаження на другорядну балку дорівнює:

$$F_d = 13,1 \text{ кН/м.}$$

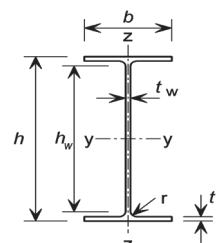


Проліт шарнірно спертої однопролітної балки рівний $L = 4,5 \text{ м}$.

2. Максимальний згинальний момент у середині прольоту:

$$M_{y,ED} = \frac{F_d L^2}{8} = \frac{13,27 \cdot 4,5^2}{8} = 33,6 \text{ кНм.}$$

3. Балка прийнята зі сталі **S235**, для якої при номінальній товщині елемента $t \leq 40 \text{ мм}$ границя текучості рівна $f_y = 235 \text{ Н/мм}^2$.



4. Двотаврова гарячекатана балка з ухилом полиць №18 має наступні геометричні розміри та характеристики перерізу:

Висота поперечного перерізу	$h = 180,0 \text{ мм}$
Висота стінки	$h_w = h - 2t_f = 163,8 \text{ мм}$
Ширина полиці	$b = 90 \text{ мм}$
Товщина стінки	$t_w = 5,1 \text{ мм}$
Товщина полиці	$t_f = 8,1 \text{ мм}$
Радіус закруглення між полицею та стінкою	$r = 9,0 \text{ мм}$
Площа поперечного перерізу	$A = 23,4 \text{ см}^2$
Момент інерції відносно осі у-у	$I_y = 1290,0 \text{ см}^4$
Момент інерції відносно осі z-z	$I_z = 82,6 \text{ см}^4$
Радіус інерції перерізу відносно осі z-z	$i_z = 1,88 \text{ см}$
Момент опору перерізу в пружній стадії відносно осі у-у	$W_{el,y} = 143,0 \text{ см}^3$ $W_{pl,y} = 160,16 \text{ см}^3$
Модуль пружності	$E = 210000 \text{ Н/мм}^2$

Примітка. Згідно зі здійсненими раніше розрахунками в публікації УЦСБ-006-14 (Приклад 5.1.3), переріз балки при нормальній температурі зовнішнього середовища відноситься до 1-го Класу.

5. Розрахункове навантаження в умовах пожежі:

$$E_{f_i,d,t} = E_{f_i,d} \cdot \eta_{f_i} \cdot E_d,$$

де:

E_d – розрахункове значення відповідного зусилля або моменту при нормальній температурі, для основних сполучень навантажень згідно ДСТУ-Н Б EN 1990. В даному випадку $E_d = M_{Ed}$;

η_{f_i} – коефіцієнт зниження для розрахунку рівня навантаження в умовах пожежі

2.4.2(2)
ДСТУ-Н Б
EN 1993-1-2

Формула (2.5а)
ДСТУ-НБ
EN 1993-1-2

Формула (2.5b)
ДСТУ-НБ
EN 1993-1-2

найменше значення з:

$$\eta_{fi} = \frac{G_k + \psi_{fi} Q_{k,l}}{\gamma_G G_k + \gamma_{Q,l} \psi_{0,1} Q_{k,l}}, \quad (3.4b)$$

$$\eta_{fi} = \frac{G_k + \psi_{fi} Q_{k,l}}{\xi \gamma_G G_k + \gamma_{Q,l} Q_{k,l}}, \quad (3.4c)$$

де:

$Q_{k,l}$ – характеристичне значення переважаючого або головного (першого) змінного навантаження;

G_k – характеристичне значення постійного навантаження;

γ_G – коефіцієнт надійності для постійних навантажень;

$\gamma_{Q,l}$ – коефіцієнт надійності для першого змінного навантаження;

ψ_{fi} – коефіцієнт поєднання навантажень, приймається рівним $\psi_{2,l}$ (див. Таблицю 3.2.);

ξ – коефіцієнт зниження для урахування несприятливих постійних впливів.

Таким чином:

$$Q_{k,l} = 4,9 \text{ кН/м}^2;$$

$$G_k = 1,02 \text{ кН/м}^2;$$

$$\gamma_G = 1,35;$$

$$\gamma_{Q,l} = 1,5;$$

$$\psi_{fi} = \psi_2 = 0,8 \text{ (для складських площ)}.$$

Понижуючий коефіцієнт:

$$\eta_{fi} = \frac{1,02 + 0,8 \cdot 4,9}{1,35 \cdot 1,02 + 1,5 \cdot 1,0 \cdot 4,9} = 0,57;$$

$$\text{або } \eta_{fi} = \frac{1,02 + 0,8 \cdot 4,9}{1,15 \cdot 1,02 + 1,5 \cdot 4,9} = 0,58.$$

Приймаємо найменше значення,

$$\eta_{fi} = 0,57;$$

Отже, розрахункове навантаження в умовах пожежі:

$$E_{fi,d} = M_{fi,d} = 0,57 \cdot 33,6 = 19,15 \text{ кНм}.$$

6. Незважаючи на те, що переріз балки при нормальній температурі відноситься до 1-го Класу, в умовах підвищеної температури вона може переходити в інші класи, оскільки

4.2.2
ДСТУ-НБ
EN 1993-1-2

$$\varepsilon = 0,85 \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 0,85 \sqrt{\frac{235}{235}} = 0,85.$$

Для полиці:

Звис полиці:

$$c = \frac{b - t_w - 2r}{2} = \frac{90 - 5,1 - 2 \cdot 9}{2} = 33,45 \text{ мм}$$

$$\frac{c}{t_f} = \frac{33,45}{8,1} = 4,13$$

Граничне співвідношення звису полиці до товщини для 1-го Класу поперечних перерізів дорівнює:

$$\frac{c}{t} \leq 9\varepsilon = 9 \cdot 0,85 = 7,65.$$

Перевіряємо умову:

$$4,13 < 7,65.$$

Таким чином, полиця поперечного перерізу балки відноситься до 1-го Класу.

Для стінки при згині:

$$c = d = 180 - 8,12 \cdot 9,2 = 145,8 \text{ мм.}$$

$$\frac{c}{t_w} = \frac{145,8}{5,1} = 28,6$$

Граничне співвідношення висоти стінки до товщини для 1-го Класу поперечних перерізів дорівнює:

$$\frac{c}{t} \leq 72\epsilon = 72 \cdot 0,85 = 61,2.$$

Перевіряємо умову:

$$28,6 < 61,2.$$

Отже, стінка при чистому згині відноситься до 1-го Класу.

Таким чином, при впливі підвищеної температури переріз балки відноситься до 1-го Класу.

7. Критична температура сталі $\theta_{a,cr}$ при рівномірному розподілі температури по балці в момент часу t може бути визначена на підставі ступеня використання несучої здатності μ_0 в момент часу $t = 0$ із використанням наступної формули:

$$\theta_{a,cr} = 39,19 \ln \left[\frac{I}{0,9674 \mu_0^{3,833}} - I \right] + 482,$$

де ступень використання несучої здатності μ_0 визначається як:

$$\mu_0 = \frac{E_{fi,d}}{R_{fi,d,0}},$$

де:

$R_{fi,d,0}$ – значення розрахункової несучої здатності $R_{fi,d,t}$ момент часу $t = 0$ (тобто розрахункова несуча здатність елемента на згин до впливу підвищеної температури), $R_{fi,d,0} = M_{fi,d,0}$;

$E_{fi,d}$ – розрахункове зусилля в умовах пожежі $E_{fi,d} = M_{fi,d} = 19,15 \text{ кНм}$.

Для балок рекомендується враховувати можливий нерівномірний розподіл температури введенням коефіцієнтів k_1 та k_2 :

$$M_{fi,t,Rd} = \frac{M_{fi,\theta,Rd}}{k_1 k_2},$$

де:

k_1 – поправочний коефіцієнт для урахування нерівномірного розподілу температури по ширині поперечного перерізу, $k_1 = 1,0$ (для незахищених балок, що піддаються впливу дії вогню із трьох сторін при обпиранні композитної або бетонної плити, даний коефіцієнт $k_1 = 0,7$);

Примітка. В даному прикладі балка вважається розкріпленою із площини, однак не за допомогою бетонної або композитної плити, а за допомогою в'язей, що встановлюються додатково по верхньому поясу балок і на схемі умовно не показані, тому $k_1 = 1,0$.

k_2 – поправочний коефіцієнт для урахування нерівномірного розподілу температури по довжині балки, $k_2 = 1,0$;

$$M_{fi,\theta,Rd} = k_{y,\theta} M_{Rd} \frac{\gamma_{MO}}{\gamma_{M,fi}},$$

де:

M_{Rd} – відповідна несуча здатність перерізу бруто за міцністю при нормальній температурі, що визначається наступним чином:

$M_{Rd} = M_{pl,Rd}$ для перерізів Класу 1 в пластичній стадії відповідно без урахування або з урахуванням дії поперечного зусилля (при $V_{Ed} \geq 0,5 V_{Rd}$)

$$M_{Rd} = \frac{W_y \cdot f_y}{\gamma_{MO}} = \frac{160,16 \cdot 235}{1,0} \cdot 10^{-3} = 37,64 \text{ кНм};$$

4.2.4(2)
ДСТУ-Н Б EN
1993-1-2

4.2.4(3)
ДСТУ-Н Б EN
1993-1-2

4.2.3.3(7)
ДСТУ-Н Б EN
1993-1-2

4.2.3.3(8)
ДСТУ-Н Б
EN 1993-1-2

$k_{y,\theta}$ – коефіцієнт зниження границі текучості при температурі зовнішнього середовища $\theta_a = 20^\circ\text{C}$ в момент часу $t=0$, $k_{y,\theta} = 1,0$;

коефіцієнт надійності за несучою здатністю при температурі зовнішнього середовища $\gamma_{MO} = 1,0$;

коефіцієнт надійності за матеріалом в умовах пожежі $\gamma_{M,fi} = 1,0$.

Звідси:

$$M_{fi,Rd} = \left[1,0 \cdot 37,64 \cdot \frac{1,0}{1,0} \right] / [1,0 \cdot 1,0] = 37,64 \text{ кНм.}$$

Ступень використання μ_0 :

$$\mu_0 = \frac{18,9}{37,64} = 0,5.$$

Згідно з Таблицею 3.7 даного посібника, визначаємо **критичну температуру θ_{cr} , $^\circ\text{C}$:**

$$\theta_{cr} = 584,7^\circ\text{C}.$$

3.2.4 Розрахунок вогнестійкості з'єднань

(1) Руйнування по площі нетто в місцях розташування отворів для розміщення з'єднувальних елементів допускається не враховувати за умови наявності з'єднувального елемента в кожному отворі, оскільки температура сталі в місці з'єднання внаслідок присутності додаткового матеріалу буде нижчою, ніж у перерізі.

(2) Межа вогнестійкості болтового або зварного з'єднання може бути оцінена як достатня при виконанні наступних умов:

- (а) Опір теплопередачі $(d_f / \lambda_f)_e$ вогнезахисту в місці з'єднання рівний або вищий мінімального значення опору теплопередачі $(d_f / \lambda_f)_m$ вогнезахисту, що використовується для будь-якого з елементів, що з'єднуються,

де:

d_f – товщина вогнезахисного матеріалу ($d_f = 0$ для незахищеної конструкції);

λ_f – розрахунковий коефіцієнт теплопровідності вогнезахисного матеріалу.

- (б) Використання несучої здатності з'єднання не повинен перевищувати максимального значення використання несучої здатності будь-якої з конструкцій, що з'єднуються.

З метою спрощення, порівняння ступеня використання несучої здатності з'єднань та з'єднаних конструкцій може проводитися при кімнатній температурі.

- (с) Міцність з'єднання при температурі зовнішнього середовища має задовольняти вимогам ДСТУ-Н Б EN 1993-1-8.

(3) Як альтернативний варіант способу, вказаному в 3.2.4(2), межа вогнестійкості з'єднання може бути визначена з використанням метода, наведеного в Додатку D, ДСТУ-Н Б EN 1993-1-2.

На практиці вогнестійкість з'єднань повинна бути не нижче вогнестійкості елементів, що з'єднуються. При використанні пасивних методів вогнезахисту конструкцій (покриття, плити та облицювання) дана умова вважається виконаною, якщо запроектовані відповідно до ДСТУ-Н Б EN 1993-1-8 з'єднання покриваються шаром вогнезахисного матеріалу. Товщина матеріалу при цьому повинна бути не менше тієї, яка використовується для елементів, що з'єднуються.

4. СПРОЩЕНІ МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ ВОГНЕСТІЙКОСТІ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ.

ЧАСТИНА 2 – ПРОЕКТУВАННЯ ВОГНЕЗАХИСТУ

4.1 Визначення необхідної вогнестійкості конструкції

4.1.1 Загальні поняття

4.2.1(5)
ДСТУ-Н Б
EN 1993-1-2

- (1) Основною метою захисту від пожежі обмеження ризику для людей, їх майна, навколишнього середовища та ін., що безпосередньо зазнає впливу вогню у разі пожежі.
- (2) Регламент ЄС 305/2011 Європейського Парламенту та Ради встановлює основні вимоги для обмеження пожежних ризиків:
«Будівлі та споруди проектує та зводять так, щоб у разі виникнення пожежі:
 - забезпечувалась несуча здатність конструктивної системи протягом певного проміжку часу;
 - обмежувалось виникнення та поширення вогню і диму в будівлях;
 - обмежувалось поширення вогню на сусідні будівлі;
 - мешканці могли самостійно залишити будівлі або врятуватися іншими способами;
 - враховувалась безпека пожежно-рятувальних підрозділів.»
- (3) Забезпечити несучу здатність конструктивної системи (частини конструктивної системи або окремої конструкції) протягом певного проміжку часу з визначеним рівнем навантаження у разі виникнення пожежі, це забезпечення її вогнестійкості.
- (4) Межа вогнестійкості конструкції є одним з характеристичних показників поведінки будівельних конструкцій в умовах пожежі.

Згідно з ДСТУ Б В.1.1-4, межа вогнестійкості конструкції – це показник вогнестійкості конструкції, що визначається часом від початку вогневого випробування при стандартному температурному режимі до настання одного з нормованих для даної конструкції граничних станів за вогнестійкістю.

Розрізняють такі основні види граничних станів будівельних конструкцій:

- за ознакою втрати несучої здатності (умовне літерне позначення R);
- за ознакою втрати цілісності (умовне літерне позначення E);
- за ознакою втрати теплоізолювальної здатності (умовне літерне позначення I);
- за ознакою втрати теплоізолювальної здатності за величиною щільності теплового випромінювання (умовне літерне позначення W);
- за ознакою втрати димогазонепроницності (умовне літерне позначення S).

Будівельні конструкції в залежності від нормованих граничних станів по вогнестійкості та меж вогнестійкості поділяються на класи вогнестійкості. Позначення класів вогнестійкості будівельних конструкцій складається з умовних літерних позначень граничних станів та числа, що відповідає нормованій межі вогнестійкості (в хвилинах), і обирається з ряду: 15; 30; 45; 60; 90; 120; 150; 180; 240; 360.

Наприклад:

Клас вогнестійкості R 120 означає, що за ознакою втрати несучої здатності конструкції значення межі вогнестійкості повинно бути не менше 120 хвилин та не перевищувати 150 хвилин.

Клас вогнестійкості REI 150 означає, що за ознаками втрати несучої здатності, втрати цілісності та теплоізолювальної здатності значення межі вогнестійкості повинно бути не менше 150 хвилин та не перевищувати 180 хвилин незалежно від того, яке з цих трьох граничних станів настане раніше.

Основним показником вогнестійкості для нормування класів вогнестійкості несучих сталевих конструкцій – колон, балок, ферм, арок та рам – є показник втрати несучої здатності конструкцій та вузлів R.

Межі вогнестійкості більшості незахищених сталевих конструкцій надзвичайно малі та знаходяться в межах 10÷15 хвилин. Винятком є сталеві конструкції із жаростійких сталей або масивного суцільного перерізу, у яких клас вогнестійкості без систем вогнезахисних покриттів може досягати R30÷R45, але застосування

таких конструкцій на практиці вкрай обмежене (більш докладно розрахунок вогнестійкості незахищених сталевих конструкцій розглядається у Розділі 4.3.1).

Швидка втрата при пожежі несучої здатності незахищених сталевих конструкцій настає через великі значення коефіцієнта теплопровідності (λ_a) та малі значення теплоємності при постійному тиску (c_p), що веде до великих значень температуропровідності сталі (χ), яка характеризує швидкість поширення температури всередині сталевих конструкцій при певній густині сталі (ρ_a).

$$\chi = \frac{\lambda_a}{c_p \cdot \rho_a} \quad (4.1)$$

Висока теплопровідність сталі практично не викликає температурного градієнта всередині конструкції, що призводить до швидкого досягнення критичних температур прогріву сталевих конструкцій, при яких відбувається зниження характеристик несучої здатності сталевих елементів до величин, при яких конструкція стає нездатною витримувати прикладене до неї зовнішнє навантаження. В результаті цього настає граничний стан сталевих конструкцій за ознакою втрати несучої здатності (R).

4.1.2 Методи визначення вогнестійкості сталевих конструкцій

4.1.2.1 Основні методи

- (1) Для визначення вогнестійкості сталевих конструкцій при проектуванні (див. Розділ 2.3.2) допускається використання наступних методів:
 - спрощені розрахункові моделі;
 - уточнені розрахункові моделі;
 - натурні вогневі випробування.

4.1.2.2 Спрощені та уточнені розрахункові моделі

- (1) Спрощені розрахункові моделі ґрунтуються на традиційних припущеннях та є спрощеними методами розрахунку конструкцій на вогнестійкість (див. п. 2.3.2.1).
- (2) Уточнені методи розрахунку є способами розрахунку, при яких відповідним чином використовуються інженерні принципи для вирішення специфічних прикладних задач (див. п. 2.3.2.2).
- (3) Уточнені розрахункові моделі рекомендується використовувати для відтворення цілої конструктивної системи, частини конструктивної системи або окремої конструкції.

4.1.2.3 Випробування

- (1) Як альтернатива розрахунку конструкції визначення вогнестійкості може базуватись на результатах вогневих випробувань або на спільних результатах отриманих методом розрахунку та вогневих випробувань.

Вогневі випробування для визначення меж вогнестійкості несучих сталевих конструкцій проводять відповідно до національних стандартів ДСТУ Б В.1.1-4, ДСТУ Б В.1.1-13, ДСТУ Б В.1.1-14 та ДСТУ Б В.1.1-17. В них детально викладені вимоги до методів випробувань конструкцій в умовах номінальних режимів розвитку пожежі (див. Розділ 2.2.1).

Суть методів випробувань сталевих конструкцій полягає у визначенні часу від початку теплового впливу за номінальним температурним режимом, до настання одного з граничних станів за вогнестійкістю. При проведенні вогневих випробувань зразків сталевих конструкцій за граничними станами, ознакою втрати несучої здатності (R) є обвалення зразка або виникнення граничних деформацій, що виникають під дією нормативного навантаження – граничне значення прогинів (поздовжніх зміщень) або граничне значення швидкості наростання деформацій.

Проведення випробувань із визначення меж вогнестійкості сталевих конструкцій із системами вогнезахисних покриттів згідно ДСТУ Б В.1.1-13, ДСТУ Б В.1.1-14 не дають можливості мінімізувати витрати із підбору оптимальних товщин вогнезахисних покриттів для тієї або іншої конструкції, так як припускають приймати граничний стан за ознакою несучої здатності, як перевищення температури сталевих конструкцій над її початковою температурою на 480°C (в загальному випадку це час досягнення температури в 500°C).

Іншими словами, результатом випробувань, проведених згідно вимог вищевказаних стандартів, є інформація, що деяка конструкція, що розглядається (з параметрами випробуваного зразка) має клас вогнестійкості ($R, хв$) при товщині покриття ($d, мм$). Застосована при цьому вогнезахисна система може бути використана тільки для захисту сталевих конструкцій, які мають коефіцієнти перерізу, рівні або більші коефіцієнтів тієї, яка піддавалася вогневим випробуванням.

При проведенні випробувань засобів вогнезахисту відповідно до ДСТУ Б В.1.1-17, залежність меж вогнестійкості сталевих конструкцій від товщини використовуваної системи вогнезахисту визначається шляхом прогріву зразків у вогневій печі при номінальному температурному режимі з подальшим оцінюванням отриманих даних методами математичного аналізу. Оцінка здатності систем вогнезахисних покриттів зберігати несучу здатність сталевих конструкцій полягає в отриманні математичної залежності між мінімальною товщиною вогнезахисного покриття, коефіцієнтом перерізу конструкцій та нормованою межею вогнестійкості при різних критичних температурах сталевих елементів – 350, 400, 450, 500, 550, 600, 650, 700 та 750°C.

4.1.3 Нормування класів вогнестійкості сталевих будівельних конструкцій

(1) Основні цілі нормування класів вогнестійкості будівельних конструкцій наступні:

- встановити вимоги до вогнестійкості протягом заданого, але обмеженого проміжку часу, коли можуть бути здійснені необхідні евакуаційні та пожежно-рятувальні заходи;
- встановити вимоги до вогнестійкості основної конструкції, при якій вона не втратить свої основні функціональні характеристики у випадку повного вигорання всіх горючих матеріалів, без здійснення заходів із гасіння пожежі.

(2) Необхідні мінімальні значення меж вогнестійкості будівельних конструкцій (зокрема у випадку сталевих конструкцій) для різних ступенів вогнестійкості будівель наведені в ДБН В.1.1-7 та інших національних нормах на проектування будівель різного функціонального призначення та поверховості, наприклад, ДБН В.2.2-24, ДБН В.2.2-15 та інших.

НБ 2.1 Національний
додаток до
ДСТУ-НБ
EN 1991-1-2

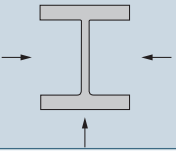
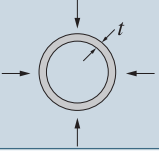
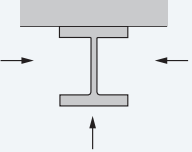
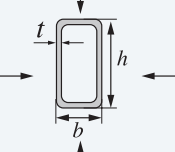
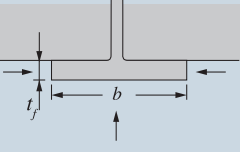
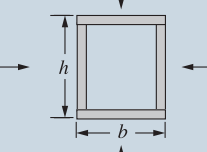
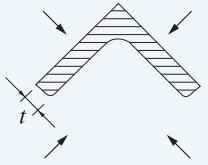
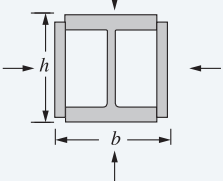
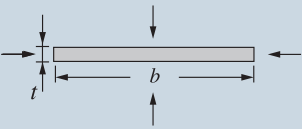
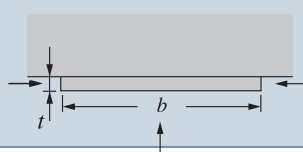
4.2 Розрахунок коефіцієнтів перерізу сталевих конструкцій

4.2.1 Коефіцієнт перерізу незахищеної сталевих конструкції A_m/V , або профільний коефіцієнт перерізу

- (1) Коефіцієнт перерізу незахищеної сталевих конструкції A_m/V є характеристичною величиною її перерізу, рівною відношенню площі A_m поверхні у одиницях довжини конструкції, до її об'єму V в тій же одиниці довжини.
- (2) У загальному випадку, коли площа перерізу сталевих конструкції не змінюється по всій довжині елемента, коефіцієнт перерізу визначається як відношення периметра сталевих конструкції до її площі перерізу. Приклади розрахунків деяких коефіцієнтів перерізу сталевих конструкцій A_m/V наведені в Таблиці 4.1
- (3) Сталеві конструкції з високим коефіцієнтом A_m/V швидше реагують на теплові та вогневі навантаження та мають нижчу межу вогнестійкості. Сталеві конструкції з низьким коефіцієнтом перерізу A_m/V є більш масивними та мають більшу інерцію до прогріву всього об'єму конструкції, внаслідок чого мають більш високу межу вогнестійкості.

Таблиця 4.2
ДСТУ-НБ
EN 1993-1-2

Таблиця 4.1 Приклади розрахунків коефіцієнтів перерізу A_m/V для незахищених сталевих конструкцій

Відкритий переріз, що піддається дії вогню з усіх сторін: $\frac{A_m}{V} = \frac{\text{периметр}}{\text{площа перерізу}}$ 	Трубчастий переріз, що піддається дії вогню з усіх сторін: $\frac{A_m}{V} = \frac{l}{t}$ 
Відкритий переріз, що піддається дії вогню з трьох сторін: $\frac{A_m}{V} = \frac{\text{поверхня, що зазнає вогневого впливу}}{\text{площа перерізу}}$ 	Замкнений переріз, або зварний коробчастий переріз із однаковою товщиною стінок, що піддається дії вогню з усіх сторін: $\text{при } t \ll b: \frac{A_m}{V} \approx \frac{l}{t}$ 
Двотавровий переріз, що піддається дії вогню з трьох сторін: $\frac{A_m}{V} = \frac{(b+2t_f)}{(b \cdot t_f)},$ $\text{при } t \ll b: \frac{A_m}{V} \approx \frac{l}{t_f}$ 	Зварний коробчастий переріз, що піддається дії вогню з усіх сторін: $\frac{A_m}{V} = \frac{2(b+h)}{\text{площа перерізу}}$ $\text{при } t \ll b: \frac{A_m}{V} \approx \frac{l}{t}$ 
Кутиковий переріз, що піддається дії вогню з усіх сторін: $\frac{A_m}{V} = \frac{2}{t}$ 	Двотавровий переріз із бічним підсиленням, що піддається дії вогню з усіх сторін: $\frac{A_m}{V} = \frac{2(b+h)}{\text{площа перерізу}}$ 
Плоский переріз, що піддається впливу пожежі з усіх сторін: $\frac{A_m}{V} = \frac{(b+t)}{b \cdot t},$ $\text{при } t \ll b: \frac{A_m}{V} \approx \frac{2}{t}$ 	Плоский переріз, що піддається впливу пожежі з трьох сторін: $\frac{A_m}{V} = \frac{(b+2t)}{b \cdot t},$ $\text{при } t \ll b: \frac{A_m}{V} \approx \frac{l}{t}$ 

- (4) Поняття «профільний коефіцієнт перерізу» є ідентичним поняттю «коефіцієнт перерізу незахищеної сталеві конструкції» та найчастіше використовується при випробуваннях або проектуванні засобів вогнезахисту для сталевих конструкцій.
- (5) При проведенні розрахунків із визначення коефіцієнтів перерізу сталевих конструкцій та визначення їх межі вогнестійкості необхідно враховувати тільки площу (або периметр) поверхні сталеві конструкції, яка піддається дії вогню.
- (6) Приклади розрахунків різних коефіцієнтів перерізу сталевих конструкцій із вогнезахисними матеріалами (забарвленням, облицюванням) наведені в Таблиці 4.2.

По суті, профільний коефіцієнт перерізу сталеві конструкції A_m/V є величиною, оберненою загально-прийнятому показнику перерізу конструкцій – зведеної товщині металу δ_{np} (мм), яка визначається як відношення площі перерізу конструкції до її периметру, який піддається дії вогню.

$$A_m/V = (1/\delta_{np}) \times 1000 = P/S \times 1000 \quad (4.2)$$

4.2.2 Коробчастий коефіцієнт перерізу сталеві конструкції A_{mk}/V

- (1) При проектуванні вогнезахисних матеріалів, що представляють собою конструкційні матеріали (плити, мати і т. д.), призначені для облицювання сталевих будівельних конструкцій, використовується поняття «коробчастий коефіцієнт перерізу».

ДСТУ Б В.1.1-17

Коробчастий коефіцієнт перерізу – це відношення площі найменшого прямокутника або квадрата, які можуть бути описані навколо сталеві профілю, до його об'єму.

- (2) Так само, як і при розрахунку профільного коефіцієнта перерізу (п. 4.2.1(2)) у загальних випадках, коли площа перерізу сталеві конструкції не змінюється по всій довжині елемента, коробчастий коефіцієнт перерізу визначається як відношення периметра найменшого прямокутника або квадрата, які можуть бути описані навколо сталеві профілю, до загальної площі перерізу конструкції. При розрахунках необхідно враховувати тільки площу (або периметр) поверхні сталеві конструкції, яка піддається дії вогню.
- (3) Приклади розрахунків коробчастих коефіцієнтів перерізу сталевих конструкцій із вогнезахисними матеріалами (забарвленням, облицюванням) наведені у Таблиці 4.2.

4.2.3 Прямокутний коефіцієнт перерізу сталеві конструкції $[A_m/V]_b$

4.2.5.1 (2)
ДСТУ-Н Б
EN 1993-1-2

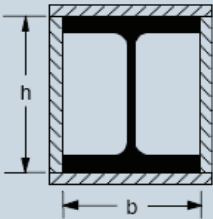
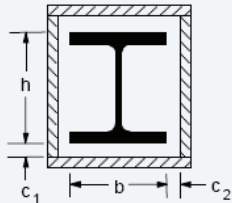
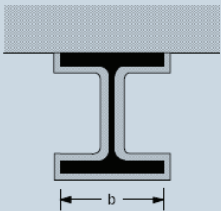
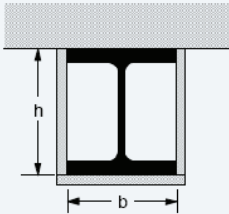
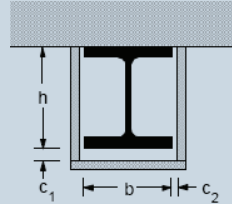
- (1) При розрахунках вогнестійкості незахищених сталевих конструкцій, зокрема при розрахунку поправочного коефіцієнта урахування впливу тінювого ефекту k_{sh} , використовується поняття, аналогічне коробчастому коефіцієнту перерізу – коефіцієнт прямокутного поперечного перерізу $[A_m/V]_b$.
- (2) Розрахунок коефіцієнта прямокутного поперечного перерізу проводиться по аналогії з розрахунком коробчастого коефіцієнта перерізу сталевих конструкцій (Розділ 4.2.2).

Таблиця 4.3
ДСТУ-Н Б
EN 1993-1-2

4.2.4 Коефіцієнт перерізу сталеві конструкції, що вкрита вогнезахисним матеріалом A_p/V

- (1) Для проведення розрахунків із визначення вогнестійкості сталевих конструкцій, вкритих вогнезахисними матеріалами, використовується коефіцієнт перерізу A_p/V , рівний відношенню площі A_p вогнезахисного матеріалу у одиницях довжини конструкції до її об'єму V в тих же одиницях довжини.
- (2) У якості площі вогнезахисного матеріалу A_p , як правило, приймається площа його внутрішньої поверхні. Однак при облицюванні навколо сталеві конструкції із зазорами, може бути використано значення площі для порожнистих облицювань без зазорів (Таблиця 4.2).
- (3) Коефіцієнт перерізу сталевих конструкцій, вкритих вогнезахисним матеріалом A_p/V , є аналогом профільного та коробчастого коефіцієнтів перерізу сталевих конструкцій.
- (4) Деякі розрахункові значення коефіцієнтів A_p/V наведені в Таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 Коефіцієнт перерізу сталевих конструкцій, вкритих вогнезахисним матеріалом A_p/V

Схематичне креслення	Опис конструкції	Коефіцієнт перерізу (A_p/V)
	Зовнішнє контурне облицювання однакової товщини	$\frac{\text{периметр сталевій конструкції}}{\text{площа поперечного перерізу сталевій конструкції}}$
	Порожнисте облицювання рівномірної товщини	$\frac{2(b + h)}{\text{площа поперечного перерізу сталевій конструкції}}$
	Порожнисте облицювання однакової товщини	$\frac{2(b + h)}{\text{площа поперечного перерізу сталевій конструкції}}$ $c_1 \text{ и } c_2 < h/4$
	Облицювання однакової товщини по контуру, пожежі дія вогню із трьох сторін периметра сталевій конструкції	$\frac{\text{периметр сталевій конструкції} - b}{\text{площа поперечного перерізу сталевій конструкції}}$
	Порожнисте облицювання однакової товщини, дія вогню із трьох сторін	$\frac{2h + b}{\text{площа поперечного перерізу сталевій конструкції}}$ $c_1 \text{ и } c_2 < h/4$
	Порожнисте облицювання однакової товщини, дія вогню із трьох сторін	$\frac{2h + b}{\text{площа поперечного перерізу сталевій конструкції}}$ $c_1 \text{ и } c_2 < h/4$

4.2.5 Коефіцієнт перерізу сталевій конструкції з урахуванням тіньового ефекту $[A_m/V]_{sh}$

- (1) Для розрахунку приросту температури незахищених сталевих конструкцій двотаврового перерізу і, як наслідок, визначення вогнестійкості конструкцій використовується поправочний коефіцієнт тіньового ефекту k_{sh} , який вираховується за формулою:

4.2.5.1 (2)
ДСТУ-Н Б
EN 1993-1-2

$$k_{sh} = \frac{0,9 \cdot [A_m/V]_b}{[A_m/V]}, \quad (4.3)$$

де:

A_m/V – коефіцієнт перерізу незахищених сталевих конструкцій;
 $[A_m/V]_b$ – прямокутний коефіцієнт перерізу сталевих конструкцій.

- (2) Для сталевих конструкцій із іншими формами поперечних перерізів поправочний коефіцієнт тінювого ефекту k_{sh} визначається за формулою:

$$k_{sh} = \frac{[A_m/V]_b}{[A_m/V]}. \quad (4.4)$$

- (3) Коефіцієнт перерізу сталевій конструкції з урахуванням тінювого ефекту $[A_m/V]_{sh}$ – це добуток поправочного коефіцієнта k_{sh} та коефіцієнта перерізу незахищеної сталевій конструкції A_m/V :

$$[A_m/V]_{sh} = k_{sh} \times A_m/V. \quad (4.5)$$

Слід зазначити, що для поперечних перерізів замкнутого профілю (наприклад, прямокутного або трубчастого перерізу), повністю розташованих у зоні дії вогню, тінювий ефект не спричиняє істотних дій, внаслідок чого поправочний коефіцієнт k_{sh} приймається рівним одиниці. Це дозволяє використовувати традиційні конструктивні рішення. Також тінювий ефект не істотний при розрахунках вогнезахисних сталевих конструкцій, у зв'язку з чим коефіцієнт k_{sh} також приймається рівним одиниці.

4.2.6 Робочі приклади

- (1) У даному розділі будуть розглянуті приклади розрахунків коефіцієнтів перерізу сталевих конструкцій для подальшого проектування різних систем вогнезахисту: фарбування, штукатурення або облицювання.
- (2) Для забезпечення наступності у цьому посібнику робочі приклади розрахунку коефіцієнтів перерізу наведені для сталевих конструкцій з Розділів 3.1.8 та 3.2.3.

Профільний коефіцієнт перерізу сталевій конструкції A_m/V рівний відношенню площі A_m поверхні у одиницях довжини конструкції до об'єму V конструкції в тих же одиницях довжини конструкції.

Оскільки площі перерізу розглянутих елементів не змінюються по всій довжині (Розділ 4.2.1(2)), то коефіцієнт перерізу A_m/V (м^{-1}) визначається як відношення периметра, який піддається дії вогню, до площі перерізу конструкції.

Поняття «коефіцієнт прямокутного поперечного перерізу» $[A_m/V]_b$ часто використовується в розрахунках вогнестійкості незахищених сталевих конструкцій. Даний коефіцієнт є аналогом коробчастого коефіцієнта перерізу, який використовується при проектуванні вогнезахисних матеріалів, що представляють собою конструкційні матеріали (плити, мати), призначені для облицювання сталевих будівельних конструкцій. В сертифікатах відповідності на конструкційні вогнезахисні матеріали даний коефіцієнт може бути позначений як A_{mk}/V .

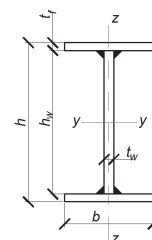
- (3) Коробчастий коефіцієнт перерізу сталевій конструкції A_{mk}/V рівний відношенню площі A_{mk} найменшого прямокутника або квадрата, які можуть бути описані навколо сталевого профілю, до його об'єму V .

Оскільки площі перерізу розглянутих елементів не змінюються по всій довжині (Розділ 4.2.2(3)), то коефіцієнт перерізу A_{mk}/V (м^{-1}) визначається як відношення периметра найменшого прямокутника або квадрата, які можуть бути описані навколо сталевого профілю, до його площі перерізу.

4.2.6.1 Розрахунок профільного та коробчастого коефіцієнтів перерізів колони

Згідно п. 3.1.8.1, колона промислової будівлі має наступні геометричні характеристики:

1.	Висота поперечного перерізу	$h = 304 \text{ мм}$
2.	Ширина поперечного перерізу	$b = 200 \text{ мм}$
3.	Висота стінки	$h_w = 280 \text{ мм}$
4.	Товщина стінки	$t_w = 10 \text{ мм}$
5.	Товщина полиці	$t_f = 12 \text{ мм}$



Розрахунок профільного коефіцієнта перерізу

При дії вогню колона буде зазнавати вогневого впливу з усіх сторін, відповідно периметр її перерізу, який піддається дії вогню, дорівнює:

$$P = 2b + 2(b - t_w) + 4t_f + 2h_w = 400 + 380 + 48 + 560 = 1388 \text{ (мм)} = 1,388 \text{ (м)}.$$

Площа поперечного перерізу колони:

$$S = 2 t_f b + t_w h_w = 4800 + 2800 = 7600 \text{ (мм}^2\text{)} = 0,0076 \text{ (м}^2\text{)}.$$

Таким чином, профільний коефіцієнт перерізу A_m/V колони:

$$A_m/V = 1,388/0,0076 = 183 \text{ (м}^{-1}\text{)}.$$

Розрахунок коробчастого коефіцієнта перерізу

При дії вогню колона буде зазнавати вогневого впливу із усіх сторін, відповідно периметр прямокутника, який піддається дії вогню, і може бути описаний навколо розглянутого сталевго профілю, дорівнює:

$$P_k = 2h + 2b = 608 + 400 = 1008 \text{ (мм)} = 1,008 \text{ (м)}.$$

Площа поперечного перерізу колони:

$$S = 2 t_f b + t_w h_w = 4800 + 2800 = 7600 \text{ (мм}^2\text{)} = 0,0076 \text{ (м}^2\text{)}.$$

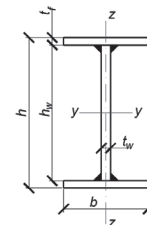
Таким чином, профільний коефіцієнт перерізу A_m/V колони:

$$A_{mk}/V = 1,008/0,0076 = 133 \text{ (м}^{-1}\text{)}.$$

4.2.6.2 Розрахунок коефіцієнтів профільного та коробчастого перерізів балки

Згідно п. 3.1.8.2, головна балка каркаса будівлі спирається на колони, та її верхній пояс не є розкріпленим із площини. Балка має наступні геометричні характеристики:

1.	Висота поперечного перерізу	$h = 412 \text{ мм}$
2.	Ширина поперечного перерізу	$b = 300 \text{ мм}$
3.	Висота стінки	$h_w = 368 \text{ мм}$
4.	Товщина стінки	$t_w = 10 \text{ мм}$
5.	Товщина полиці	$t_f = 16 \text{ мм}$



Розрахунок профільного коефіцієнта перерізу

Відповідно до п. 4.1 (16) ДСТУ-Н Б EN 1994-1-2, при дії вогню балка буде зазнавати вогневого впливу із усіх сторін, відповідно периметр її перерізу, який піддається дії вогню, дорівнює:

$$P = 2b + 2(b - t_w) + 4t_f + 2h_w = 600 + 580 + 64 + 760 = 2004 \text{ (мм)} = 2,004 \text{ (м)}.$$

Площа поперечного перерізу балки:

$$S = 2 t_f b + t_w h_w = 9600 + 3800 = 13400 \text{ (мм}^2\text{)} = 0,0134 \text{ (м}^2\text{)}.$$

Таким чином, профільний коефіцієнт перерізу A_m/V колони:

$$A_m/V = 2,004/0,0134 = 150 \text{ (м}^{-1}\text{)}.$$

Розрахунок коробчастого коефіцієнта перерізу

При дії вогню балка буде нагріватися із усіх сторін, відповідно периметр прямокутника, який піддається дії вогню, і може бути описаний навколо даного сталевго профілю, дорівнює:

$$P_k = 2h + 2b = 824 + 600 = 1424 \text{ (мм)} = 1,424 \text{ (м)}.$$

Площа поперечного перерізу балки:

$$S = 2 t_f b + t_w h_w = 9600 + 3800 = 13400 \text{ (мм}^2\text{)} = 0,0134 \text{ (м}^2\text{)}.$$

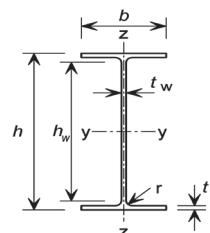
Таким чином, профільний коефіцієнт перерізу A_m/V колони:

$$A_{mk}/V = 1,424/0,0134 = 106 \text{ (м}^{-1}\text{)}.$$

4.2.6.3 Розрахунок профільного та коробчастого коефіцієнтів перерізів колони

Згідно п. 3.1.8.3, колона має наступні геометричні характеристики:

$A = 100,0 \text{ см}^2$
$t_w = 10,0 \text{ мм}$
$t_f = 15,2 \text{ мм}$
$r = 17,0 \text{ мм}$
$h = 500,0 \text{ мм}$
$h_w = 469,6 \text{ мм}$
$b = 170 \text{ мм}$



Розрахунок профільного коефіцієнта перерізу

При дії вогню колона буде зазнавати вогневого впливу із усіх сторін, відповідно периметр її перерізу, який піддається дії вогню, дорівнює:

$$P = 2b + 2(b - t_w) + 4t_f + 2h_w = 340 + 320 + 61 + 939 = 1660 \text{ (мм)} = 1,66 \text{ (м)}.$$

Площа поперечного перерізу колони:

$$S = 100 \text{ (см}^2\text{)} = 0,01 \text{ (м}^2\text{)}.$$

Таким чином, профільний коефіцієнт перерізу A_m/V колони:

$$A_m/V = 1,66/0,01 = 166 \text{ (м}^{-1}\text{)}.$$

Розрахунок коробчастого коефіцієнта перерізу

При дії вогню колона буде зазнавати вогневого впливу із усіх сторін, відповідно периметр прямокутника, який піддається дії вогню, і може бути описаний навколо даного сталевго профілю, дорівнює:

$$P_k = 2h + 2b = 1000 + 340 = 1340 \text{ (мм)} = 1,34 \text{ (м)}.$$

Площа поперечного перерізу колони:

$$S = 0,01 \text{ (м}^2\text{)}.$$

Таким чином, профільний коефіцієнт перерізу A_m/V колони:

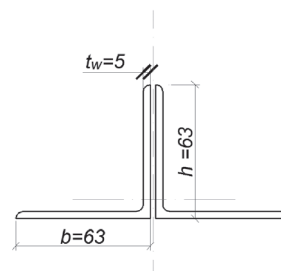
$$A_{mk}/V = 1,34/0,01 = 134 \text{ (м}^{-1}\text{)}.$$

4.2.6.4 Розрахунок коефіцієнтів профільного та коробчастого перерізів розкошу ферми

Згідно п. 3.2.3.1, розкіс ферми являє собою два спарених рівнополічкових кутиків №63×5 по ГОСТ 8509-93. Елемент ферми має наступний геометричний вигляд:

Кутік №63 має наступні розміри:

1.	Висота поперечного перерізу	$h = 63 \text{ мм}$
2.	Ширина поперечного перерізу	$b = 63 \text{ мм}$
3.	Товщина стінки	$t_w = 5 \text{ мм}$
4.	Площа поперечного перерізу	$S = 6,13 \text{ см}^2$



Розрахунок профільного коефіцієнта перерізу

Розкіс як окремий елемент ферми при дії вогню буде нагріватися із усіх сторін, відповідно периметр його перерізу, який піддається дії вогню, дорівнює:

$$P = 6h = 378 \text{ (мм)} = 0,378 \text{ (м)}.$$

Площа поперечного перерізу розкосу:

$$S_p = 2S = 12,26 \text{ (см}^2\text{)} = 0,001226 \text{ (м}^2\text{)}.$$

Таким чином, профільний коефіцієнт перерізу A_m/V розкосу, виконаного зі спарених кутиків, дорівнює:

$$A_m/V = 0,378/0,001226 = 308 \text{ (м}^{-1}\text{)}.$$

Розрахунок коробчастого коефіцієнта перерізу

Даний елемент ферми при дії вогню буде нагріватися із усіх сторін, відповідно периметр прямокутника, який піддається дії вогню, і може бути описаний навколо даного елемента, дорівнює:

$$P_k = 2h + 4b = 6h = 378 \text{ (мм)} = 0,378 \text{ (м)}.$$

Площа поперечного перерізу розкосу:

$$S_p = 2S = 12,26 \text{ (см}^2\text{)} = 0,001226 \text{ (м}^2\text{)}.$$

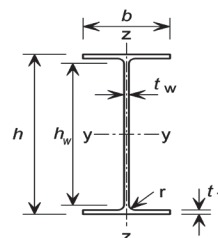
Коробчастий коефіцієнт перерізу A_{mk}/V розкосу, виконаного зі спарених кутиків:

$$A_{mk}/V = 0,378/0,001226 = 308 \text{ (м}^{-1}\text{)}.$$

4.2.6.5 Розрахунок профільного та коробчастого коефіцієнтів перерізів балки

Згідно п. 3.2.3.2, другорядна балка прийнята із прокатного двотавра №18 згідно ГОСТ 8239-89. Балка має наступні геометричні характеристики:

1.	Висота поперечного перерізу	$h = 180 \text{ мм}$
2.	Ширина поперечного перерізу	$b = 90 \text{ мм}$
3.	Висота стінки	$h_w = 163,8 \text{ мм}$
4.	Товщина стінки	$t_w = 5,1 \text{ мм}$
5.	Товщина полиці	$t_f = 8,1 \text{ мм}$
6.	Площа поперечного перерізу	$S = 23,4 \text{ см}^2$



Розрахунок профільного коефіцієнта перерізу

Відповідно до п. 4.1(15) ДСТУ-Н Б EN 1994-1-2, при дії вогню балка буде нагріватися із трьох сторін, відповідно периметр, що піддається дії вогню, дорівнює:

$$P = b + 2(b - t_w) + 4t_f + 2h_w = 180 + 169,8 + 32,4 + 327,6 = 709,8 \text{ (мм)} = 0,71 \text{ (м)}.$$

Таким чином, профільний коефіцієнт перерізу A_m/V колони:

$$A_m/V = 0,71/0,00234 = 303 \text{ (м}^{-1}\text{)}.$$

Розрахунок коробчастого коефіцієнта перерізу

При дії вогню балка буде нагріватися із трьох сторін, відповідно периметр прямокутника, який піддається дії вогню, і може бути описаний навколо даного профілю, дорівнює:

$$P_k = 2h + b = 360 + 90 = 450 \text{ (мм)} = 0,45 \text{ (м)}.$$

Коробчастий коефіцієнт перерізу A_{mk}/V другорядної балки:

$$A_{mk}/V = 0,45/0,00234 = 192 \text{ (м}^{-1}\text{)}.$$

4.3 Визначення часу t_{cr} , необхідного для досягнення критичної температури сталевих елементів $\theta_{a,cr}$

4.3.1 Розрахунок вогнестійкості незахищених сталевих конструкцій

- (1) Згідно з блок-схемою розрахунку критичної температури сталевих елементів (див. п. 3.2.2) та подальшого прийняття рішення щодо необхідності проведення вогнезахисних робіт, у деяких випадках доцільно проводити розрахунок вогнестійкості незахищених сталевих конструкцій (тобто без вогнезахисного покриття).
- (2) Розрахунок вогнестійкості сталевих елементів зводиться до визначення приросту температури сталевих конструкцій з плином часу при номінальному температурному режимі та подальшого порівняння отриманих результатів із значенням критичної температури сталі $\theta_{a,cr}$ (п. 3.2.2.2).
- (3) Приріст температури $\Delta\theta_{a,t}$ при рівномірному розподілі еквівалентної температури в поперечному перерізі незахищеної сталевих конструкції за проміжок часу Δt визначають за формулою:

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} \cdot \frac{A_m}{V c_a \rho_a} \cdot \dot{h}_{net} \Delta t, \quad (4.6)$$

де:

- k_{sh} – поправочний коефіцієнт, що враховує вплив тінювого ефекту;
 A_m/V – коефіцієнт перерізу незахищених сталевих конструкцій, який дорівнює не менше 10 м^{-1} ;
 A_m – площа поверхні конструкцій на одиницю довжини;
 V – об'єм конструкцій на одиницю довжини;
 c_a – питома теплоємність сталі;
 $\dot{h}_{net}$ – розрахункове значення поглиненого питомого теплового потоку на одиницю площі;
 ρ_a – густина сталі, рівна 7850 кг/м^3 ;
 Δt – проміжок часу, при цьому $\Delta t \leq 5 \text{ сек}$.

- (4) При проведенні розрахунків приросту температури сталевих конструкцій із двотавровим перерізом формула набуває вигляду:

$$\Delta\theta_{a,t} = 0,9 \left[\frac{A}{V} \right]_b \frac{1}{c_a \cdot \rho_a} \dot{h}_{net} \Delta t. \quad (4.7)$$

Для решти типів перерізів формула має вигляд:

$$\Delta\theta_{a,t} = \left[\frac{A}{V} \right]_b \frac{1}{c_a \cdot \rho_a} \dot{h}_{net} \Delta t. \quad (4.8)$$

- (5) При використанні коефіцієнта перерізу сталевих конструкцій з урахуванням тінювого ефекту $[A_m/V]_{sh}$ формула розрахунку приросту температури сталевих конструкцій різних перерізів набуває вигляду:

$$\Delta\theta_{a,t} = \left[\frac{A}{V} \right]_{sh} \frac{1}{c_a \cdot \rho_a} \dot{h}_{net} \Delta t, \quad (4.9)$$

де:

$$[A_m/V]_{sh} = k_{sh} \times A_m/V;$$

$$k_{sh} = \begin{cases} \frac{0,9 \cdot [A_m/V]_b}{[A_m/V]} \\ \frac{[A_m/V]_b}{[A_m/V]} \end{cases}$$

Як зазначалося вище, для поперечних перерізів замкнутого профілю (наприклад, прямокутного або трубчастого перерізу) поправочний коефіцієнт $k_{sh} = 1$.

- (6) Поглинутий тепловий потік $\dot{h}_{net}$ на поверхнях, що нагріваються, повинен бути визначений з урахуванням конвекційного та променевого теплообміну:

4.2.5.1 (1)
ДСТУ-Н Б
EN 1993-1-2

4.2.5.1 (5)
ДСТУ-Н Б
EN 1993-1-2

3.2.2(1)
4.2.5.1 (4)
ДСТУ-Н Б
EN 1993-1-2

3.1 (2)
ДСТУ-Н Б
EN 1991-1-2

$$\dot{h}_{net} = \dot{h}_{net,c} + \dot{h}_{net,r}, \quad (4.10)$$

де:

$\dot{h}_{net,c}$ – питомий тепловий потік, що визначається конвекцією;

$\dot{h}_{net,r}$ – питомий тепловий потік, що визначається випромінюванням.

(7) Конвекційна складова поглиненого теплового потоку $\dot{h}_{net,c}$ визначається за формулою:

$$\dot{h}_{net,c} = \alpha_c \cdot (\theta_g - \theta_m), \quad (4.11)$$

де:

θ_g – температура поблизу сталевих конструкцій (температура одного з номінальних режимів пожежі), °C;

θ_m – температура поверхні сталевих конструкцій, °C;

α_c – коефіцієнт конвекційного теплообміну, рівний:

– для стандартного температурного режиму та режиму зовнішньої пожежі – 25 Вт/м²K;

– для вуглеводневого температурного режиму – 50 Вт/м²K.

(8) Тепловий потік випромінювання на одиницю площі поверхні конструкції $\dot{h}_{net,r}$ визначається за формулою:

$$\dot{h}_{net,r} = \Phi \cdot \varepsilon_m \cdot \varepsilon_f \cdot \sigma \cdot ((\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4), \quad (4.12)$$

де:

Φ – кутовий коефіцієнт, який в більшості випадків дорівнює 1;

ε_f – випромінююча здатність полум'я, що приймається 1;

σ – постійна Больцмана, яка дорівнює $5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/м²K⁴;

θ_m – температура поверхні сталевих конструкцій, °C;

ε_m – ступінь поглинання поверхнею сталевих конструкцій теплового випромінювання (для вуглецевої сталі 0,7);

θ_r – ефективна температура випромінювання пожежі (у випадку, коли конструкція нагрівається з усіх сторін $\theta_r = \theta_g$), °C.

(9) Теплоємність сталі c_a (Дж/кгK) в момент часу t в залежності від температури сталі θ_a визначають 2.4.2.2(1) згідно формул (2.16a – 2.16d).

(10) Після підстановки всіх вищенаведених значень у вираз із визначення приросту температури $\Delta\theta_{a,t}$ незахищеної сталевих конструкції за проміжок часу $\Delta t = 5$ сек були отримані залежності між коефіцієнтом перерізу та температурою сталевих конструкцій у різний період часу (Таблиця 4.3, Рисунок 4.1).

Таблиця 4.3 Температура незахищених сталевих елементів при впливі стандартного температурного режиму протягом 15÷60 хвилин.

Коефіцієнт перерізу $[A_m/V]_{sh}$	Температура сталевих елементів, °C				Коефіцієнт перерізу $[A_m/V]_{sh}$	Температура сталевих елементів, °C			
	15 хвилин	30 хвилин	45 хвилин	60 хвилин		15 хвилин	30 хвилин	45 хвилин	60 хвилин
10	113	255	406	545	130	620	801	894	940
20	193	428	625	735	140	634	809	895	940
30	264	551	727	831	150	645	814	895	941
40	327	634	759	899	160	655	819	896	941
50	382	689	813	922	170	664	822	896	941
60	430	720	850	931	180	671	825	897	942
70	472	734	870	934	190	677	827	897	942
80	508	741	881	936	200	682	828	897	942
90	538	752	886	937	250	700	833	898	943
100	564	766	890	938	300	708	835	899	943
110	586	780	891	939	350	714	836	900	944
120	604	792	893	939	400	717	837	900	944

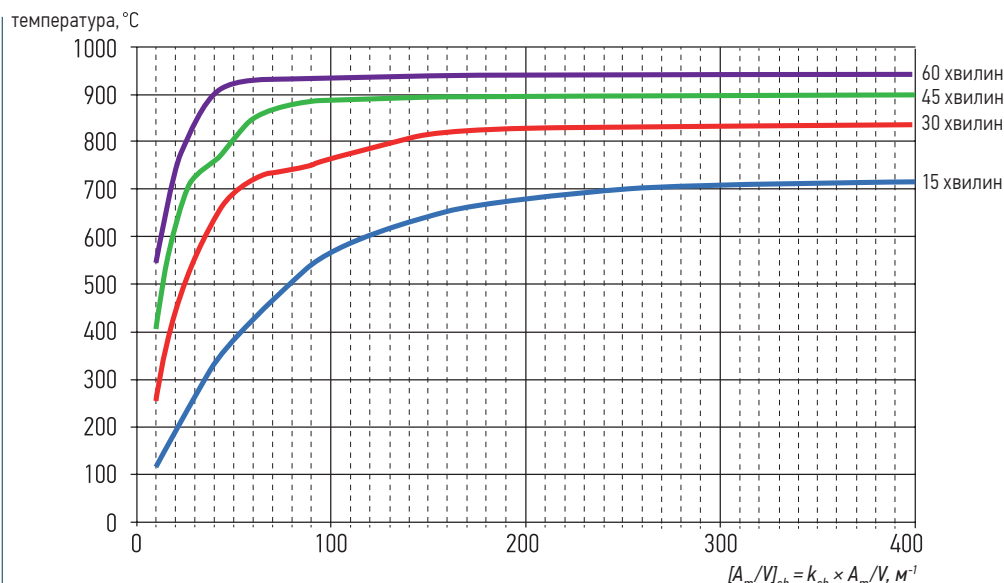


Рисунок 4.1 Номограма залежності температури незахищених сталевих конструкцій від коефіцієнта перерізу $[A_m/V]_{sh}$ при впливі стандартного температурного режиму.

4.3.2 Розрахунок вогнестійкості сталевих конструкцій, захищених вогнезахисними матеріалами

- (1) Частина 1-2 Єврокоду 3 дозволяє розрахувати вогнестійкість сталевих елементів, захищених вогнезахисними матеріалами виходячи з їх теплофізичних характеристик. До вогнезахисних матеріалів відносяться будь-які матеріали або їх поєднання, застосовані до конструктивного елементу з метою підвищення його вогнестійкості.
- (2) Слід зазначити, що вищевказаний стандарт вводить деякі обмеження щодо застосування у розрахунках тих або інших вогнезахисних матеріалів. Зокрема, необхідною умовою використання вогнезахисних матеріалів при проектуванні є те, що вони мають зберігати цілісність, залишатися зчепленими та складати єдине ціле з основою протягом всього відповідного вогневої дії.
- (3) У зв'язку з вищевикладеним та на підставі законодавчих та нормативних документів України, властивості та ефективність вогнезахисних матеріалів, використовуваних при проектуванні, повинні бути оцінені шляхом проведення відповідних випробувань згідно ENV 13381-1, ENV 13381-2 та ENV 13381-4. Таким чином, не кожен матеріал із відомими довідковими теплофізичними характеристиками може бути застосований для проведення розрахунку вогнестійкості будівельних конструкцій.
- (4) Приріст температури $\Delta\theta_{a,t}$ за проміжок часу Δt для рівномірного розподілу температури в поперечному перерізі захищеної сталевий конструкції визначають за формулою:

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_p A_p / V (\theta_{g,t} - \theta_{a,t})}{d_p c_a \rho_a (1 + \phi/3)} \Delta t - (e^{\phi/10} - 1) \Delta\theta_{g,t}, \quad (4.13)$$

при $\Delta\theta_{a,t} \geq 0$, якщо $\Delta\theta_{g,t} > 0$,

де:

$$\phi = \frac{c_p \rho_p}{c_a \rho_a} d_p A_p / V \quad (4.14)$$

A_p/V – коефіцієнт перерізу сталевих конструкцій, вкритих вогнезахисними матеріалами, m^{-1} ;

A_p – площа поверхні вогнезахисного матеріалу на одиницю довжини;

V – об'єм конструкцій на одиницю довжини;

c_a – питома теплоємність сталі, Дж/кгК;

c_p – питома теплоємність вогнезахисного матеріалу, не залежна від температури, Дж/кгК;

d_p – товщина вогнезахисного матеріалу, м;

Δt – проміжок часу, при цьому $\Delta t \leq 30$ сек;

4.2.5.2 (1)
ДСТУ-Н Б
EN 1993-1-2

4.2.5.2 (3)
ДСТУ-Н Б EN 1993-1-2

3.2.2 (1)
ДСТУ-НБ
EN 1993-1-2

SD005a-EN-EU
Nomogram for
protected members

3.4.3
ДСТУ-НБ
EN 1993-1-2

$\theta_{a,t}$ – температура сталі в момент часу t , °C;
 $\theta_{g,t}$ – температура середовища (номінальної пожежі) у момент часу t , °C;
 $\Delta\theta_{g,t}$ – приріст температури середовища (номінальної пожежі) у момент часу Δt , °C;
 ρ_a – густина сталі, що приймається 7850 кг/м³;
 λ_p – коефіцієнт теплопровідності вогнезахисної системи, Вт/мК;
 ρ_p – густина вогнезахисного матеріалу, кг/м³.

- (5) Формула визначення приросту температури $\Delta\theta_{a,t}$ захищеної сталеві конструкції може бути перетворена в наступний вираз:

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{A_p}{V} \cdot \frac{\lambda_p}{d_p} \cdot \frac{1}{1 + \phi/3} \left[\frac{(\theta_{g,t} - \theta_{a,t})}{c_a \cdot \rho_a} \cdot \Delta t \right] - (e^{\phi/10} - 1) \cdot \Delta\theta_{g,t} \quad (4.15)$$

В якості спрощеного підходу коефіцієнт ϕ може бути прийнятий рівним 0, що призводить до модифікації коефіцієнта перерізу:

$$\frac{A_p}{V} \cdot \frac{\lambda_p}{d_p}$$

Даний модифікований коефіцієнт, який є характеристичною величиною вогнезахисної системи, іноді називають термічним (тепловим) коефіцієнтом перерізу.

Вогнезахисна система повинна виконувати свою захисну функцію протягом всього часу вогнестійкості сталеві конструкції, навіть при великих деформаціях (див. ENV 13381-4).

Властивості деяких вогнезахисних матеріалів, які наведені в таблиці 4.4, можуть бути використані в якості першого наближення для розрахунку коефіцієнта теплового перерізу. Ці середні значення є похідними від вогневих випробувань проведених виробниками матеріалів. Більш точні дані можуть бути взяті з результатів випробувань вогнезахисних матеріалів проведених згідно ENV 13381-4.

- (7) Номограма залежності температури сталевих конструкцій з різними термічними коефіцієнтами перерізу $A_p \lambda_p / V d_p$ від часу пожежі при стандартному температурному режимі наведена на Рисунку 4.2.

Таблиця 4.4 Властивості матеріалів з вогнезахисту для попереднього розрахунку

Матеріал	Густина вогнезахисного матеріалу, ρ_p , кг/м³.	Коефіцієнт теплопровідності вогнезахисної системи, λ_p , Вт/мК.	Питома теплоємність вогнезахисного матеріалу, c_p , Дж/кгК;
Напилювальні суміші:			
- мінеральне волокно	350	0,12	1200
- цементно-вермікулітові	350	0,12	1200
- перліт	350	0,12	1200
Напилювальні суміші з високою густиною:			
- вермікулітові (перлітові) з цементом	550	0,12	1100
- вермікулітові (перлітові) з гіпсом	650	0,12	1100
Плити:			
- вермікулітові (перлітові) з цементом	800	0,20	1200
- фібросилікатні	600	0,15	1200
- фіброцементні	800	0,15	1200
- гіпсові	800	0,20	1700
Бетон	2300	1,60	1000
Легкий бетон	1600	0,80	840
Бетонні блоки	2200	1,00	1200
Цегла з отворами	1000	0,40	1200
Цегла повнотіла	2000	1,20	1200

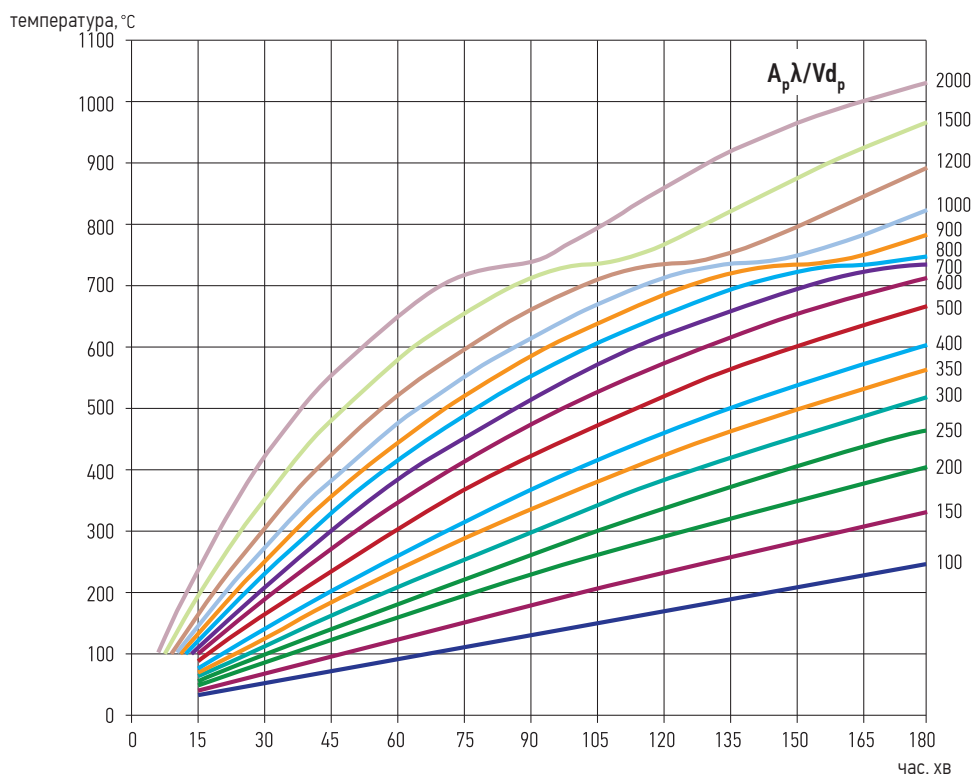


Рисунок 4.2 Номограма залежності температури вогнезахисних сталевих конструкцій з різними коефіцієнтами перерізу $A_p \lambda/Vd_p$ від часу при дії стандартного температурного режиму пожежі

Формула розрахунку приросту температури $\Delta\theta_{a,t}$ вогнезахисних сталевих конструкцій не враховує вплив вологи, що міститься у вогнезахисних матеріалах. Випаровування вологи в результаті впливу дії вогню викликає уповільнення прогріву сталевих конструкцій при досягненні температури сталі 100°C, та є тематикою окремих досліджень.

4.4 Визначення характеристик вогнезахисного покриття за критерієм критичної температури

Якісне проведення вогнезахисту сталевих конструкцій залежить від двох основних складових: правильності обраних технічних рішень при складанні проекту проведення вогнезахисних робіт та правильного вибору вогнезахисного матеріалу. Способи та засоби вогнезахисту сталевих конструкцій визначаються при складанні проекту проведення вогнезахисних робіт на конкретний об'єкт будівництва з урахуванням наступних основних вимог:

- класу вогнестійкості конструкцій, який визначається відповідно ступеню вогнестійкості будівлі, до якого необхідно довести будівельний елемент;
- розрахованим коефіцієнтам конструкцій (профільного або коробчастого перерізу);
- розрахованим критичним температурам сталевих елементів.

При складанні проекту проведення вогнезахисних робіт важливу роль відіграють і супутні фактори – естетичні, економічні, експлуатаційні та інші, які також впливають на вибір способів та засобів вогнезахисту, однак у даному посібнику вони не розглядаються.

Найбільш застосовувані засоби вогнезахисту можна розділити на наступні типи:

Реактивний спосіб – полягає у використанні тонкошарових покриттів, які при дії вогню утворюють щільний теплоізоляційний шар та оберігають конструкцію від дії температури. Ці засоби вогнезахисту називають тонкошаровими інтумесцентними (від англ. intumescent – спучення, розширення внаслідок теплової дії) сумішами. Тонкошарові покриття впевнено забезпечують клас вогнестійкості R60 для зведеної товщини металу $\delta_{np} \geq 4$ мм, R 90 для $\delta_{np} \geq 12$ мм.

Вогнезахисні сухі будівельні суміші (штукатурки) являють собою, як правило, цементно (гипсо) - вермікулитову (перлітову) суміш із комплексом спеціальних добавок, яка утворює покриття з високою адгезійною здатністю до сталевих поверхонь та відносно низькою густиною (400-600 кг/м³). Покриття поставляється у

вигляді сухих будівельних сумішей, які після приготування наносяться на поверхню металоконструкцій товщиною 10-50 мм в залежності від необхідного класу вогнестійкості, який може досягати R 240.

Вогнезахисні плити та листові волокнисті матеріали являють собою конструктивні методи вогнезахисту, дія яких полягає у використанні теплофізичних властивостей захисних матеріалів. Клас вогнестійкості сталевих конструкцій, що досягається при застосуванні вогнезахисних плит, може становити до R 300.

У Таблиці 4.5 наведені порівняльні характеристики найбільш поширених засобів пасивного вогнезахисту, які можуть служити орієнтиром при виборі вогнезахисного матеріалу для забезпечення необхідних класів вогнестійкості з урахуванням конфігурації сталевих конструкцій, що захищаються, екологічних та естетичних вимог, а також умов експлуатації.

Таблиця 4.5. Галузь застосування вогнезахисних матеріалів із урахуванням їх особливостей

Вогнезахисний матеріал	Переваги	Недоліки	Клас вогнестійкості та галузь застосування
Суміші інтумесцентного типу	Мінімальна товщина та вагове навантаження на конструкцію, технологічність робіт із вогнезахисту, ремонтпридатність, вібронестійкість, добрі декоративні властивості	Обмежені умови експлуатації та вогнезахисна ефективність, висока токсичність продуктів горіння	до R 90 Для сталевих конструкцій будь-якої конфігурації (колони, балки, косоури, ригелі, ферми, в'язі)
Вогнезахисні цементно-вермікулитові штукатурки	Висока межа вогнестійкості, низька вартість матеріалу, екологічність при експлуатації та відсутність токсичних продуктів горіння, можливість застосування на відкритому повітрі	Трудомісткість робіт із нанесення, складність відновлення та ремонту, низькі декоративні якості, слабка адгезія до поверхні, знижена вібронестійкість	до R 240 Для сталевих конструкцій нескладної конфігурації (колони, балки)
Вогнезахисні плити та листові волокнисті матеріали	Висока межа вогнестійкості та термін експлуатації, підвищена вібронестійкість за рахунок механічних кріплень до конструкцій, висока ремонтпридатність, відсутність корозійного впливу на метал, добрі декоративні властивості, екологічність при експлуатації та відсутність токсичних продуктів горіння, точний контроль товщини вогнезахисного шару, сухий спосіб монтажу	Необхідність улаштування спеціальних кріпильних систем та елементів, обмежене застосування для вогнезахисту конструкцій складної конфігурації	до R 300 Для сталевих конструкцій нескладної конфігурації (колони, балки)

4.4.1 Робочий приклад

- (1) Наведені нижче приклади не є типовими та оптимальними вогнезахисними рішеннями, а були підібрані з навчальною метою, таким чином, щоб максимально продемонструвати можливі способи та засоби вогнезахисту сталевих конструкцій.
- (2) Згідно з п.3.4.3. ДСТУ-Н Б EN 1993-1-2 властивості та поведінка вогнезахисних матеріалів, що використані для проектування мають бути оцінені з використанням методик випробувань, що наведені в ENV 13381-1, ENV 13381-2 або ENV 13381-4 відповідно.
- (3) На даний час в Україні відсутні вогнезахисні матеріали, які були б випробувані згідно з вищенаведеними європейськими стандартами. У зв'язку з чим, для демонстрації можливостей проектування сталевих конструкцій з системами вогнезахисту згідно Єврокодів, підбір вогнезахисту бути здійснений із ряду матеріалів, сертифікованих в Україні та таких, що пройшли випробування відповідно до ДСТУ Б В.1.1-17 «Захист від пожежі. Вогнезахисні покриття для будівельних несучих металевих конструкцій. Метод визначення вогнезахисної здатності (ENV 13381-4:2002, NEQ)». Дані, отримані при випробуваннях, являють собою ряди залежностей товщини вогнезахисного покриття від різних коефіцієнтів перерізу та критичних температур втрати несучої здатності металоконструкцій при різних класах вогнестійкості.
- (4) Підбір вогнезахисних матеріалів для розрахунків у даному посібнику був проведений випадковим чином із Публікації УЦСБ-008-2015 «Каталог засобів вогнезахисту сталевих конструкцій 2015», яка включає в себе дані, наведені у сертифікатах відповідності різних вогнезахисних матеріалів.
- (5) Для забезпечення цієї послідовності, у даному посібнику робочі приклади із підбору засобу вогнезахисту наведені для сталевих конструкцій із Розділів 3.1.8 та 3.2.3, використовуючи коефіцієнти перерізу, розраховані у Розділі 4.2.6.

4.4.1.1 Підбір вогнезахисного матеріалу та способу вогнезахисту для сталеві колони з метою підвищення класу вогнестійкості до R 60

Відповідно до п.п. 3.1.8.1 та 4.2.6.1, критична температура колони в умовах пожежі при заданому навантаженні становить:

$$\theta_{cr} = 670^{\circ}\text{C},$$

при профільному коефіцієнті перерізу, що дорівнює

$$A_m/V = 183 \text{ (м}^{-1}\text{)},$$

і коробчастому коефіцієнті перерізу

$$A_{mk}/V = 132 \text{ (м}^{-1}\text{)}.$$

- З метою підвищення межі вогнестійкості колони до 60 хвилин можливе використання інтумесцентних вогнезахисних покриттів. Наприклад, склад «POLYLACK A» випробуваний відповідно до методики, викладеної в ДСТУ Б В.1.1-17, та для класу вогнестійкості R 60, має наступні значення товщини (Таблиця 4.6):

Таблиця 4.6 Мінімальні значення товщини вогнезахисного покриття «POLYLACK A», при яких температура нижче проектної для R 60

Проектна температура, °C		400	450	500	550	600	650
Зведена товщина $\delta_{пр}$, мм	Коефіцієнт перерізу, A_m/V , (м ⁻¹)	Клас вогнестійкості R 60					
		Мінімальна товщина покриття, при якій температура нижче проектної, мм					
14,49	69	0,86	0,73	0,60	0,48	0,35	0,26
14,29	70	0,87	0,74	0,61	0,49	0,36	0,26
12,50	80	0,99	0,86	0,72	0,59	0,46	0,34
11,11	90	1,11	0,97	0,83	0,69	0,56	0,43
10,00	100	1,22	1,07	0,93	0,79	0,65	0,52
9,09	110	1,32	1,18	1,03	0,89	0,74	0,60
8,33	120	1,43	1,27	1,12	0,98	0,83	0,69
7,69	130	-	1,37	1,21	1,05	0,91	0,77
7,14	140	-	1,46	1,30	1,15	0,99	0,84
6,67	150	-	-	1,39	1,23	1,07	0,91
6,25	160	-	-	1,47	1,30	1,14	0,98
5,88	170	-	-	-	1,38	1,21	1,05
5,56	180	-	-	-	1,45	1,28	1,12
5,26	190	-	-	-	-	1,35	1,18
5,00	200	-	-	-	-	1,41	1,24
4,76	210	-	-	-	-	-	1,30
4,55	220	-	-	-	-	-	1,36
4,35	230	-	-	-	-	-	1,41
4,17	240	-	-	-	-	-	1,46

Із таблиці можна побачити, що для розглянутого прикладу найближчим значенням профільного коефіцієнта перерізу є **190 м⁻¹** (оскільки обране значення коефіцієнта перерізу сталеві конструкції повинно бути не менше розрахункового), а значенням критичної температури - **650°C** (оскільки обране значення критичної температури повинно бути не більше розрахункового).

Таким чином, для заданих параметрів металоконструкції мінімальна товщина вогнезахисного покриття «POLYLACK A» складає:

$$d_p = 1,18 \text{ мм}.$$

4.4.1.2 Підбір матеріалу та способу вогнезахисту для сталеві балки з метою підвищення класу вогнестійкості до R 45

Відповідно до п.п. 3.1.8.2, 4.2.6.2, критична температура балки в умовах пожежі при заданому навантаженні складає:

$$\theta_{cr} = 487^{\circ}\text{C},$$

при профільному коефіцієнті перерізу, що дорівнює

$$A_m/V = 150 \text{ (м}^{-1}\text{)},$$

і коробчастому коефіцієнті перерізу

$$A_{mk}/V = 106 \text{ (м}^{-1}\text{)}.$$

- З метою підвищення межі вогнестійкості балки до 45 хвилин застосовуються інтумесцентні вогнезахисні покриття. Як приклад, вогнезахисна фарба «AMOTHERM STEEL WB» випробувана відповідно до ДСТУ Б В.1.1-17 та для класу вогнестійкості R 45 має наступні значення товщини (Таблиця 4.7):

Таблиця 4.7. Мінімальні значення товщини вогнезахисного покриття «AMOTHERM STEEL WB», при якій температура нижче проектної для R 45

Проектна температура, °C		400	450	500	550	600	650
Зведена товщина $\delta_{пр}$, мм	Коефіцієнт перерізу, A_m/V , (м ⁻¹)	Клас вогнестійкості R 45					
		Мінімальна товщина покриття, при якій температура нижче проектної, мм					
14,5	69	0,55	0,40	0,29	0,21	0,21	0,21
14,3	70	0,56	0,41	0,30	0,21	0,21	0,21
12,5	80	0,65	0,49	0,37	0,26	0,21	0,21
11,1	90	0,74	0,57	0,43	0,32	0,23	0,21
10,0	100	0,83	0,64	0,49	0,37	0,27	0,21
9,1	110	0,91	0,70	0,55	0,42	0,32	0,23
8,3	120	0,98	0,76	0,60	0,46	0,35	0,26
7,7	130	1,05	0,82	0,64	0,50	0,39	0,29
7,1	140	1,11	0,87	0,69	0,54	0,42	0,32
6,7	150	1,17	0,92	0,73	0,57	0,45	0,35
6,3	160	1,23	0,97	0,76	0,61	0,48	0,38
5,9	170	-	1,01	0,80	0,64	0,51	0,40
5,6	180	-	1,05	0,83	0,67	0,53	0,42
5,3	190	-	1,09	0,87	0,69	0,55	0,44
5,0	200	-	1,12	0,90	0,72	0,57	0,46
4,8	210	-	1,16	0,92	0,74	0,60	0,48
4,5	220	-	1,19	0,95	0,76	0,61	0,49
4,3	230	-	1,22	0,97	0,78	0,63	0,51
4,2	240	-	1,25	1,00	0,80	0,65	0,52
4,0	250	-	-	1,02	0,82	0,67	0,54
3,8	260	-	-	1,04	0,84	0,68	0,55
3,7	270	-	-	1,06	0,86	0,69	0,56
3,6	280	-	-	1,08	0,87	0,71	0,58
3,4	290	-	-	1,10	0,89	0,72	0,59
3,3	300	-	-	1,12	0,91	0,74	0,60
3,2	310	-	-	1,14	0,92	0,75	0,61
3,1	320	-	-	1,16	0,93	0,76	0,62

- Із таблиці можна побачити, що для розглянутого прикладу значення профільного коефіцієнта перерізу дорівнює **150 м⁻¹**, а значення критичної температури - **450°C** (оскільки вибране значення критичної температури повинно бути не більше розрахункового).

Таким чином, для заданих параметрів металоконструкції мінімальна товщина вогнезахисного покриття «AMOTHERM STEEL WB» складає:

$$d_p = 0,92 \text{ мм.}$$

4.4.1.3 Підбір матеріалу та способу вогнезахисту для сталеві колони з метою підвищення класу вогнестійкості до R 150

Відповідно до п.п. 3.1.8.3, 4.2.6.3, критична температура колони в умовах пожежі при заданому навантаженні складає:

$$\theta_{cr} = 414,1^{\circ}\text{C},$$

при профільному коефіцієнті перерізу, рівним

$$A_m/V = 166 \text{ (м}^{-1}\text{)},$$

і коробчастому коефіцієнті перерізу

$$A_{mk}/V = 134 \text{ (м}^{-1}\text{)}.$$

- З метою підвищення межі вогнестійкості колони до 150 хвилин можливе використання конструктивних методів вогнезахисту у вигляді плит. Як приклад, плита «Ендотерм 210104», випробувана відповідно до методики, що викладена у ДСТУ Б В.1.1-17, та для класу вогнестійкості R150 має наступні значення товщини (Таблиця 4.8):

Таблиця 4.8 Мінімальні значення товщини вогнезахисного покриття «Плита «Ендотерм 210104», при якій температура нижче проектної для R 150

Проектна температура, °C		350	400	450	500	550	600	650	700	750
Зведена товщина δ , мм	Коробчастий коефіцієнт перерізу, A_{mk}/V , (м ⁻¹)	Клас вогнестійкості R 150								
		Мінімальна товщина покриття, при якій температура нижче проектної, мм								
20,0	50	29,1	26,8	24,7	22,8	21,0	19,4	17,8	16,4	15,1
16,7	60	32,3	30,0	27,9	25,9	24,1	22,4	20,9	19,4	18,0
14,3	70	35,1	32,8	30,6	28,6	26,8	25,1	23,5	22,0	20,6
12,5	80	37,5	35,1	32,9	30,9	29,1	27,3	25,7	24,2	22,8
11,1	90	39,5	37,2	35,0	33,0	31,1	29,3	27,7	26,2	24,7
10,0	100	41,3	39,0	36,8	34,7	32,9	31,1	29,5	27,9	26,5
9,1	110	42,9	40,6	38,4	36,3	34,4	32,7	31,0	29,5	28,0
8,3	120	44,4	42,0	39,8	37,8	35,9	34,1	32,4	30,9	29,4
7,7	130	45,7	43,3	41,1	39,0	37,1	35,4	33,7	32,1	30,6
7,1	140	46,8	44,4	42,2	40,2	38,3	36,5	34,8	33,3	31,8
6,7	150	47,9	45,5	43,3	41,3	39,3	37,6	35,9	34,3	32,8
6,3	160	48,8	46,5	44,3	42,2	40,3	38,5	36,8	35,3	33,8
5,9	170	49,7	47,3	45,1	43,1	41,2	39,4	37,7	36,1	34,6
5,6	180	50,5	48,1	45,9	43,9	42,0	40,2	38,5	36,9	35,4
5,3	190	51,2	48,9	46,7	44,6	42,7	40,9	39,3	37,7	36,2
5,0	200	51,9	49,6	47,4	45,3	43,4	41,6	40,0	38,4	36,9
4,8	210	52,5	50,2	48,0	46,0	44,1	42,3	40,6	39,0	37,5
4,5	220	53,1	50,8	48,6	46,6	44,7	42,9	41,2	39,6	38,1
4,3	230	53,7	51,3	49,2	47,1	45,2	43,4	41,8	40,2	38,7
4,2	240	54,2	51,9	49,7	47,7	45,8	44,0	42,3	40,7	39,2
4,0	250	54,7	52,3	50,2	48,1	46,2	44,5	42,8	41,2	39,7

- З таблиці бачимо, що для розглянутого прикладу найближчим значенням коефіцієнта перерізу є **140 м⁻¹** (оскільки вибране значення коефіцієнта перерізу сталеві конструкції повинно бути не менше розрахункового), а значення критичної температури – **400°C** (оскільки вибране значення критичної температури повинно бути не більше розрахункового).

Таким чином, для заданих параметрів металоконструкції мінімальна товщина вогнезахисного покриття «Плита «Ендотерм 210104» складає:

$$d_p = 44,4 \text{ мм.}$$

4.4.1.4 Підбір матеріалу та способу вогнезахисту для елемента розкошу сталеві ферми із метою підвищення класу вогнестійкості до R 30

Відповідно до п.п. 3.2.3.1, 4.2.6.4, критична температура розкошу сталеві ферми в умовах пожежі при заданому навантаженні складає:

$$\theta_{cr} = 545,7^{\circ}\text{C},$$

при профільному та коробчастому коефіцієнтах перерізу

$$A_m/V = 308 \text{ (м}^{-1}\text{)}.$$

1. З метою підвищення межі вогнестійкості до 30 хвилин можливе використання інтумесцентних вогнезахисних покриттів. Як приклад, матеріал «Фенікс СТС» випробуваний відповідно до методики, викладеної у ДСТУ Б В.1.1-17, та для класу вогнестійкості R 30 має наступні значення товщини (Таблиця 4.9):

Таблиця 4.9 Мінімальні значення товщини вогнезахисного покриття «Фенікс СТС», при яких температура нижче проектної для R 30

Проектна температура, °C		400	450	500	550	600	650
Зведена товщина δ_{np} , мм	Коефіцієнт перерізу, A_m/V , (м ⁻¹)	Клас вогнестійкості R 30					
		Мінімальна товщина покриття, при якій температура нижче проектної, мм					
14,49	69	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23
14,29	70	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23
12,50	80	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23
11,11	90	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23
10,00	100	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23
9,09	110	0,27	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23
8,33	120	0,34	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23
7,69	130	0,41	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23
7,14	140	0,47	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23
6,67	150	0,53	0,28	0,23	0,23	0,23	0,23
6,25	160	0,58	0,33	0,23	0,23	0,23	0,23
5,88	170	0,63	0,37	0,23	0,23	0,23	0,23
5,56	180	0,68	0,41	0,23	0,23	0,23	0,23
5,26	190	0,73	0,45	0,23	0,23	0,23	0,23
5,00	200	0,77	0,49	0,24	0,23	0,23	0,23
4,76	210	0,81	0,52	0,27	0,23	0,23	0,23
4,55	220	0,85	0,56	0,30	0,23	0,23	0,23
4,35	230	0,88	0,59	0,33	0,23	0,23	0,23
4,17	240	0,92	0,62	0,36	0,23	0,23	0,23
4,00	250	0,95	0,65	0,38	0,23	0,23	0,23
3,85	260	0,98	0,67	0,40	0,23	0,23	0,23
3,70	270	1,01	0,70	0,43	0,23	0,23	0,23
3,57	280	1,04	0,72	0,45	0,23	0,23	0,23
3,45	290	1,06	0,75	0,47	0,23	0,23	0,23
3,33	300	1,09	0,77	0,49	0,24	0,23	0,23
3,23	310	1,11	0,79	0,51	0,25	0,23	0,23
3,13	320	1,13	0,81	0,53	0,27	0,23	0,23

2. Найближчим значенням профільного коефіцієнта перерізу є **310 м⁻¹** (оскільки вибране значення коефіцієнта перерізу сталеві конструкції повинно бути не менше розрахункового), а значення критичної температури - **500°C** (оскільки вибране значення критичної температури повинно бути не більше розрахункового).

Таким образом, для заданных параметров металлоконструкции минимальная толщина огнезащитного покрытия «Феникс СТС» составляет:

$$d_p = 0,51 \text{ мм}.$$

4.4.1.5 Підбір матеріалу та способу вогнезахисту для сталеві балки із метою підвищення класу вогнестійкості до R 60

Відповідно до п.п. 3.2.3.2, 4.2.6.5, критична температура балки в умовах пожежі при заданому навантаженні складає:

$$\theta_{cr} = 584,7^{\circ}\text{C},$$

при профільному коефіцієнті перерізу, рівним

$$A_m/V = 303 \text{ (м}^{-1}\text{)},$$

і коробчастому коефіцієнті перерізу

$$A_{mk}/V = 192 \text{ (м}^{-1}\text{)}.$$

- З метою підвищення межі вогнестійкості балки до 60 хвилин можливе використання інтумесцентних вогнезахисних покриттів. Як приклад, матеріал «Ендотерм 400202», випробуваний відповідно до ДСТУ Б В.1.1-17 та для класу вогнестійкості R 60 має наступні значення товщини (Таблиця 4.10):

Таблиця 4.10 Мінімальні значення товщини вогнезахисного покриття «Ендотерм 400202», при яких температура нижче проектної для R 60

Проектна температура, °C		400	450	500	550	600	650
Зведена товщина $\delta_{пр}$, мм	Коефіцієнт перерізу, A_m/V , (м ⁻¹)	Клас вогнестійкості R 60					
		Мінімальна товщина покриття, при якій температура нижче проектної, мм					
14,3	70	1,42	1,09	0,85	0,67	0,53	0,42
12,5	80	1,59	1,23	0,98	0,78	0,63	0,51
11,1	90	1,73	1,36	1,09	0,89	0,72	0,59
10,0	100	1,86	1,48	1,19	0,98	0,80	0,66
9,1	110	1,97	1,58	1,29	1,06	0,88	0,73
8,3	120	2,07	1,67	1,37	1,13	0,94	0,79
7,7	130	-	1,75	1,44	1,20	1,01	0,85
7,1	140	-	1,82	1,51	1,26	1,06	0,90
6,7	150	-	1,89	1,57	1,32	1,11	0,94
6,3	160	-	1,95	1,63	1,37	1,16	0,99
5,9	170	-	2,01	1,68	1,42	1,21	1,03
5,6	180	-	2,06	1,73	1,46	1,25	1,07
5,3	190	-	-	1,77	1,51	1,29	1,10
5,0	200	-	-	1,82	1,55	1,32	1,13
4,8	210	-	-	1,85	1,58	1,36	1,17
4,5	220	-	-	1,89	1,62	1,39	1,20
4,3	230	-	-	1,92	1,65	1,42	1,22
4,2	240	-	-	1,96	1,68	1,45	1,25
4,0	250	-	-	1,99	1,71	1,47	1,27
3,8	260	-	-	2,01	1,73	1,50	1,30
3,7	270	-	-	2,04	1,76	1,52	1,32
3,6	280	-	-	2,07	1,78	1,54	1,34
3,4	290	-	-	2,09	1,80	1,56	1,36
3,3	300	-	-	-	1,83	1,58	1,38
3,2	310	-	-	-	1,85	1,60	1,40
3,1	320	-	-	-	1,87	1,62	1,41
3,0	330	-	-	-	1,88	1,64	1,43
2,9	340	-	-	-	1,90	1,66	1,45

- Із таблиці бачимо, що для прикладу, що розглядається, найближчим значенням профільного коефіцієнта перерізу є **310 м⁻¹** (оскільки вибране значення коефіцієнта перерізу сталеві конструкції повинно бути не менше розрахункового), а значенням критичної температури - **550°C** (оскільки вибране значення критичної температури повинно бути не більше розрахункового).

Таким чином, для заданих параметрів металоконструкції мінімальна товщина вогнезахисного покриття «Ендотерм 400202» складає:

$$d_p = 1,85 \text{ мм.}$$

ДОДАТОК 1

ТЕРМІНИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ

- (1) У загальному випадку визначення термінів дається там, де вони вперше зустрічаються по тексту. Термінологія Єврокодів у більшості випадків дана таким чином, щоб уникнути неточностей та двозначностей.
- (2) Основні терміни та визначення:

Вогнестійкість – здатність конструктивної системи, частини конструктивної системи або окремої конструкції відповідати обов'язковим вимогам (несуча здатність та/або огорожувальна здатність) для визначеного рівня навантаження, визначеного вогневого впливу та визначеного проміжку часу.

Вогнезахисний матеріал – будь-які матеріали або сполучення матеріалів, застосований до конструкцій для підвищення її вогнестійкості.

Критична температура елемента сталеві конструкції – температура, за якої очікується руйнування сталеві конструкції при рівномірному розподілі температури для заданого рівня навантаження.

Протипожежний відсік – простір всередині будівлі, що займає один або декілька поверхів, оточений огорожувальними елементами, таким чином, щоб запобігти поширенню вогню протягом пожежі відповідної тривалості

Температурний режим пожежі – визначений розвиток пожежі, що прийнятий при проектуванні.

Проектний сценарій пожежі – визначений сценарій пожежі, на основі якого буде виконано розрахунок.

Розрахункова густина потоку – густина потоку, що розглядається для визначення теплових впливів при розрахунку на вогнестійкість; її значення враховує невизначеності.

Густина потоку – пожежне навантаження на одиницю площі, що відноситься до площі поверху q_p , або площі всіх огорожувальних конструкцій q_f , враховуючи прорізи в них.

Пожежне навантаження – вся тепла енергія, що виділяється від згорання всіх горючих матеріалів у просторі (вміст будівлі та окремі конструкції).

Сценарій пожежі – якісний опис розвитку пожежі в часі із встановленням ключових моментів, які характеризують пожежу і відрізняють її від інших можливих пожеж. Він типово визначає загоряння та процес розвитку пожежі, стадію повного розвитку, стадію згасання з урахування оточуючого середовища будинку та систем, які будуть впливати на розвиток пожежі.

Температурні режими – залежність температури середовища, яке оточує поверхні елементів, від часу. Можуть бути:

- **номінальний:** традиційний температурний режим, що приймається для класифікації або перевірки вогнестійкості, наприклад стандартний температурний режим, температурний режим зовнішньої пожежі, режим вуглеводневої пожежі;
- **параметричний:** встановлений ґрунтуючись на моделі пожежі та питомих фізичних параметрах, що визначають умови в протипожежному відсіку.

ДОДАТОК 2

ПОЗНАЧЕННЯ

- (1) У загальному випадку позначення пояснюються в місці, де вони зустрічаються по тексту.
- (2) Система символів в Єврокодах та даному посібнику, як правило, співпадає з загальноприйнятими у практиці проектування. Для поділу близьких за змістом змінних, наприклад, осьового зусилля та несучої здатності на стиск, широко застосовані підрядкові індекси. Якщо необхідно, використовується кілька індексів, наприклад, для поділу опору згину в осях у-у та z-z. Кожен підрядковий індекс при перерахуванні розділяється комою.
- (3) Найбільш поширені позначення:

Параметри протипожежних відсіків

- A_f – площа поверху протипожежного відсіку;
- A_t – загальна площа огорожувальних конструкцій (стіни, стеля і підлога, враховуючи прорізи);
- A_v – загальна площа вертикальних прорізів у всіх стінах;
- O – коефіцієнт врахування прорізів пожежного відсіку;
- b – теплопоглинання всіх огорожувальних конструкцій;
- c – питома теплоємність;
- λ – теплопровідність;
- ρ – густина;
- Γ – коефіцієнт часу, що залежить від коефіцієнту врахування прорізів O_{lim} та теплопоглинання b .

Температурно-часові характеристики

- Θ_{max} – максимальна температура;
- t – час.

Характеристики пожежного навантаження

- $q_{f,d}$ – розрахункова густина потоку, що відноситься до площі поверхні A_f ;
- $q_{t,d}$ – розрахункова густина потоку, що відноситься до площі поверхні A_t ;
- $q_{f,k}$ – характеристична густина потоку, що відноситься до площі поверхні A_f .

Коефіцієнти

- δ_{ni} – коефіцієнт, і-го спеціального протипожежного заходу;
- δ_{q1} – коефіцієнт, що враховує ризик виникнення пожежі залежно від протипожежного відсіку;
- δ_{q2} – коефіцієнт, що враховує ризик виникнення пожежі залежно від призначення приміщення;
- m – маса, коефіцієнт горіння.

Параметри температури

- θ – температура;
- θ_a – температура сталі;
- $\theta_{a,cr}$ – критична температура сталі;
- θ_g – температура газового середовища у протипожежному відсіку або біля конструкції;
- $\theta_{g,t}$ – температура окружающей газовой среды в момент времени t .

Властивості матеріалів

f_y – границя текучості за температури 20°C;

$f_{y,\theta}$ – розрахункова границя текучості для сталі за підвищеної температури θ_a ;

E_a – модуль пружності сталі для розрахунку за нормальної температури;

$E_{a,\theta}$ – тангенс кута нахилу лінійної пружної ділянки діаграми «напруження-деформації» сталі за підвищених температур θ_a ;

$k_{y,\theta}$ – коефіцієнт зниження для границі текучості сталі за температури θ_a що досягається в момент часу t ;

$k_{E,\theta}$ – коефіцієнт зниження для тангенсу кута нахилу лінійної пружної ділянки для температури сталі θ_a , що досягається в момент часу t ;

ρ_a – густина сталі;

$\Delta l/l$ – теплове видовження сталі;

c_a – питома теплоємність сталі;

λ_a – коефіцієнт теплопровідності сталі.

Геометричні характеристики перерізів

A – площа поперечного перерізу;

$W(W_{pl,y}, W_{pl,z}, W_{el,y}, W_{el,z})$ – моменти опору перерізу;

i – радіус інерції відносно відповідної осі, визначений з використанням характеристик поперечного перерізу брутто;

$[A_m/V]$ – коефіцієнт перерізу незахищених сталевих елементів;

$[A_m/V]_b$ – коефіцієнт прямокутного поперечного перерізу;

$[A_m/V]_{sh}$ – коефіцієнт поперечного перерізу з урахуванням тінювого ефекту.

Характеристики елементів

L_{cr} – розрахункова довжина;

χ_{fi} – коефіцієнт зниження для втрати стійкості від згинання для розрахунку на вогнестійкість;

$\bar{\lambda}_{\theta}$ – умовна гнучкість при досягненні сталю температури θ_a ;

$\bar{\lambda}$ – умовна гнучкість;

$\chi_{LT,fi}$ – коефіцієнт зниження для втрати стійкості від кручення для розрахунку на вогнестійкість;

$\bar{\lambda}_{LT,\theta}$ – умовна гнучкість для втрати стійкості плоскої форми згину при досягненні сталю температури θ_a ;

$\bar{\lambda}_{LT}$ – умовна гнучкість для втрати стійкості плоскої форми згину.

Навантаження та впливи

$E_{fi,d,t}(M_{fi,Ed}, N_{fi,Ed}, V_{fi,Ed})$ – розрахунковий результат впливу під час пожежі у момент часу t ;

G_k – нормативне значення постійного впливу;

$Q_{k,l}$ – переважний або головний (перший) змінний вплив;

η_{fi} – коефіцієнт зниження розрахункового рівня навантаження в умовах пожежі.

Несуча здатність перерізів, компонентів та елементів

$R_{fi,d,t}(M_{fi,t,Rd}, N_{fi,t,Rd}, V_{fi,t,Rd})$ – розрахункова несуча здатність елемента під час пожежі у момент часу t ;

μ_0 – ступень використання в момент часу $t=0$.

Частинні коефіцієнти надійності

$\gamma_{M0} = 1.0$ – частковий коефіцієнт для визначення несучої здатності по міцності незалежно від Класу перерізу;

$\gamma_{Mfi} = 1.0$ – частковий коефіцієнт надійності для відповідної властивості матеріалу під час пожежі.

ДОДАТОК 3

ПЕРЕЛІК НОРМАТИВНИХ ДОКУМЕНТІВ ТА ПОСИЛАНЬ

ДСТУ-Н Б EN 1990:2008	Єврокод. Основи проектування конструкцій
ДСТУ-Н Б EN 1991-1-2:2010	Єврокод 1. Вплив на будівельні конструкції. Частина 1-2. Загальні впливи. Впливи на конструкції в умовах пожежі
ДСТУ-Н Б EN 1993-1-1:2010	Єврокод 3. Проектування сталевих конструкцій. Частина 1-1. Загальні правила та правила для споруд
ДСТУ-Н Б EN 1993-1-2:2010	Єврокод 3. Проектування сталевих конструкцій. Частина 1-2. Загальні положення. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість
ДСТУ-Н Б EN 1993-1-3:2012	Єврокод 3. Проектування сталевих конструкцій. Частина 1-3. Загальні правила. Додаткові правила для холодноформованих елементів і профільованих листів
ДСТУ-Н Б EN 1993-1-4:2012	Єврокод 3. Проектування сталевих конструкцій. Частина 1-4. Додаткові правила для нержавіючої сталі
ДСТУ-Н Б EN 1993-1-5:2012	Єврокод 3. Проектування сталевих конструкцій. Частина 1-5. Пластинчасті конструктивні елементи
ДСТУ-Н Б EN 1993-1-6:2011	Єврокод 3. Проектування сталевих конструкцій. Частина 1-6. Міцність та стійкість оболонок
ДСТУ-Н Б EN 1993-1-8:2011	Єврокод 3. Проектування сталевих конструкцій. Частина 1-8. Проектування з'єднань
ДСТУ-Н Б EN 1994-1-2:2012	Єврокод 4. Проектування сталезалізобетонних конструкцій. Частина 1-2. Загальні положення. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість
ДСТУ Б В.1.1-4-98*	Захист від пожежі. Будівельні конструкції. Методи випробувань на вогнестійкість. Загальні вимоги
ДСТУ Б В.1.1-13:2007	Захист від пожежі. Балки. Методи випробування на вогнестійкість
ДСТУ Б В.1.1-14:2007	Захист від пожежі. Колони. Методи випробування на вогнестійкість
ДСТУ Б В.1.1-17:2007	Захист від пожежі. Вогнезахисні покриття для будівельних несучих металевих конструкцій. Методи визначення вогнезахисної здатності
ДСТУ EN 10025:2005	Вироби гарячекатані з нелегованих конструкційних сталей. Технічні умови на поставку
ДСТУ EN 10210-1:2009	Профілі порожнисті, виготовлені гарячим деформуванням з нелегованих і дрібнозернистих конструкційних сталей. Технічні вимоги до постачання
ДСТУ EN 10219-1:2009	Профілі порожнисті зварні конструкційні, відформовані в холодному стані, з нелегованих і дрібнозернистих сталей. Технічні умови постачання
ДБН В.1.1-7-2002	Захист від пожежі. Пожежна безпека об'єктів будівництва
ДБН В.2.2-15-2005	Будинки і споруди. Житлові будинки. Основні положення
ДБН В.2.2-24:2009	Будинки і споруди. Проектування висотних житлових і громадських будівель Fire resistance of steel structures / [Haller Mike, Cajot Louis-Guy]. – Arcelor LCS Research Centre. – 21 p. Nomogram for unprotected members / [Mike Haller]. – SD004a-EN-EU: 2006. – 7 p. Nomogram for protected members / [Mike Haller]. – SD005a-EN-EU: 2006. – 10 p. Розрахунок сталевих конструкцій будівель відповідно до Єврокоду 3 та національних додатків України / [М.Бреттл, Д.Браун, М.А.Беляєв, А.С.Білик]. – УЦСБ-005-14. – Київ: 2014. – 97 с. Приклади розрахунку сталевих конструкцій будівель відповідно до Єврокоду 3 та національних додатків України / [М.Бреттл, Д.Браун, А.С.Білик, Е.А.Ковалевська]. – УЦСБ-006-14. – Київ: 2014. – 81 с. Каталог засобів вогнезахисту сталевих конструкцій / [Л.М.Вахітова, К.В.Калафат]. – УЦСБ-08-15. – Київ: 2015. – 117 с. Regulation (EU) No 305/2011 of the European Parliament and of the Council of 9 March 2011 laying down harmonised conditions for the marketing of construction products and repealing Council Directive 89/106/EEC

РОЗРАХУНОК
СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ
НА ВОГНЕСТІЙКІСТЬ
ВІДПОВІДНО ДО ЄВРОКОДУ 3

ПРАКТИЧНИЙ ПОСІБНИК
ДО ДСТУ-Н EN 1993-1-2:2010

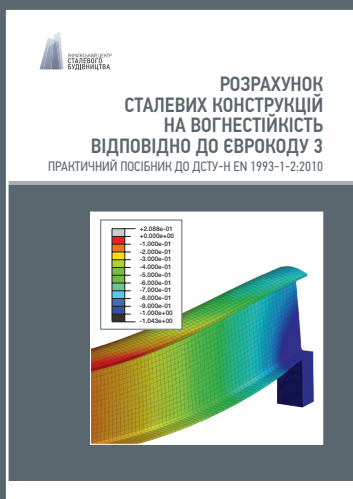
Схвалено рішенням Науково-технічної ради Мінрегіону від 21.04.2016 р. №27

Формат 60х84х8. Умовних друкованих аркушів 9,76. Тираж 300 примірників.

Видавець ТОВ «НВП «Інтерсервіс»

Київ, вул. Бориспільська, 9

Свідоцтво серії ДК № 3534 від 24.07.2009



РОЗРАХУНОК СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ НА ВОГНЕСТІЙКІСТЬ ВІДПОВІДНО ДО ЄВРОКОДУ 3 ПРАКТИЧНИЙ ПОСІБНИК ДО ДСТУ-Н EN 1993-1-2:2010

Цей практичний посібник складається з двох частин, в яких викладено методичні рекомендації, щодо проектування сталевих конструкцій згідно Єврокоду 3 з урахуванням Національних додатків України та вимог з вогнестійкості. Він містить основи проектування та поведінки сталевих конструкцій в умовах пожежі та відповідних аварійних розрахункових ситуацій. Практичний посібник наводить класифікацію та опис методів розрахунку конструкцій в умовах пожежі та випадки в яких вони застосовуються, а також обґрунтування застосування спрощених методів розрахунку, до яких наводяться детальний алгоритм розрахунку з робочими прикладами.

У першій частині викладено теоретичну базу та довідкові матеріали для двох основних спрощених методів розрахунку – за параметром міцності та критичної температури. Друга частина доповнює першу та містить методологію розрахунку на етапах від отримання значень критичної температури до проектування вогнезахисту.