

Київський національний університет будівництва і архітектури

Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

БАШИНСЬКИЙ ОЛЕКСІЙ ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК 624.014+536.21

ДИСЕРТАЦІЯ

**СТВОРЕННЯ ТА КРИТЕРІЇ РОБОТИ КОНСТРУКТИВНИХ МОДЕЛЕЙ
СТАЛЕВИХ БАЛОК ІЗ ВОГНЕЗАХИСТОМ**

Спеціальність 192 – Будівництво та цивільна інженерія

Галузь знань 19 – Архітектура та будівництво

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ О.В. Башинський

Науковий керівник – Білик Сергій Іванович, доктор технічних наук, професор

Київ – 2024

АНОТАЦІЯ

Башинський О.В. Створення та критерії роботи конструктивних моделей сталевих балок із вогнезахистом. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 192 – Будівництво та цивільна інженерія, галузь знань 19 – Архітектура та будівництво. – Київський національний університет будівництва і архітектури. Міністерство освіти і науки України, Київ, 2024 р.

Основний зміст дисертаційної роботи

Дисертаційна робота спрямована на розвиток чисельно-розрахункових методів оцінки межі вогнестійкості сталевих конструкцій, шляхом врахування нерівномірного температурного розподілу по висоті перерізу, нелінійної зміни теплофізичних властивостей матеріалів та вогнезахисних облицювань.

За результатами виконаних аналізів вітчизняних та закордонних наукових джерел та нормативних документів, чисельних скінченно-елементних та експериментальних досліджень:

- з'ясовано, що у вітчизняних та закордонних документах та методичних посібниках описано лише спрощені аналітичні методики оцінки межі вогнестійкості сталевих конструкцій; існують експериментальні методи оцінки межі вогнестійкості, проте вони не є універсальними та не дозволяють швидко та зручно оцінити вогнестійкість будь-якої конструкції;
- адаптовано та використано чисельний метод скінченних елементів для вирішення задачі нестационарної теплопровідності для проведення теплотехнічного розрахунку поперечного перерізу сталеві балки перекриття;
- встановлено закономірності, які призвели до нерівномірного розподілу температури по висоті поперечного перерізу сталеві балки перекриття;
- встановлено достовірність результатів, отриманих за використання чисельного методу скінченних елементів в порівнянні з експериментальним методом;
- встановлено, що теплотехнічний розрахунок сталеві балки перекриття з врахуванням нелінійної зміни теплофізичних характеристик матеріалів відкриває додаткові резерви несучої спроможності сталевих балок при дії високих температур;

– створено методологію та алгоритм розрахунку сталевих балок перекриття з вогнезахистом з реалізацією в програмному комплексі ЛІРА-САПР.

З точки зору філософії, науково-технічних розвиток людства зростає в геометричній прогресії. Новітні технології дозволяють проводити точні, безпечні, зручні та швидкі вишукування, які дозволяють враховувати чисельні фактори та критерії роботи будівельних конструкцій, які неможливо було врахувати раніше. Дане дослідження спрямоване на збільшення конструктивної безпеки, екологічності, енергоефективності, що в свою чергу впливає на безпеку людської життєдіяльності, що наразі є дуже важливим чинником.

В першому розділі проаналізовано сучасний стан пожежної безпеки в країні та методи оцінки межі вогнестійкості будівельних конструкцій. Описано способи вогнезахисту будівельних конструкцій та наведено низку найбільш поширених вогнезахисних матеріалів. Проаналізовано сучасні експериментальні, аналітичні та чисельні методи оцінки межі вогнестійкості сталевих конструкцій, а саме сталевих балок перекриття. Експериментальні методи є найбільш ефективними, проте не є універсальними, а аналітичні методи не враховують ключових критеріїв роботи теплонавантажених конструкцій, тому на базі аналітичних та чисельних методів необхідно побудувати універсальну методику оцінки межі вогнестійкості конструкцій.

В другому розділі детально описано вирішення задачі нестационарної теплопровідності за допомогою чисельного методу скінченних елементів. В програмному комплексі ЛІРА-САПР було проведено чисельний експеримент впливу пожежі на сталеву балку перекриття, на яку спирається залізобетонна плита перекриття. Було виконано два типи розрахунків: теплотехнічний, в якому було визначено розподіл температурних полів в кожній точці перерізу балки в кожну хвилину часу пожежі; та статичний, в якому було попередньо знижено міцнісні характеристики перерізу та пружно-деформаційні характеристики сталі відповідно до середньої температури в поперечному перерізі балки у фіксований момент часу. Результати теплотехнічного розрахунку було порівняно з результатами аналогічного

розрахунку, який було проведено в програмному комплексі ANSYS FLUENT та описано в нормативному документі.

В третьому розділі описано алгоритм визначення нелінійних властивостей матеріалів конструкції та вогнезахисних облицювань. Було проведено теплотехнічний розрахунок сталеві балки перекриття з врахуванням вогнезахисного матеріалу. Результати розрахунку було порівняно з результатами експериментального дослідження. Результати підтвердили достовірність методологічних підходів по визначенню температури в перерізі, розроблених в дисертації. Також було проведено теплотехнічні розрахунки моделей сталевих балок з різними варіантами вогнезахисних матеріалів. Виявлено закономірності розподілу температури по перерізу в залежності від типу та товщини вогнезахисного матеріалу. Було проведено порівняльний теплотехнічний розрахунок моделі сталеві балки перекриття з вогнезахистом з врахуванням та без врахування нелінійної зміни теплофізичних властивостей матеріалів. Встановлено, що теплотехнічний розрахунок сталеві балки перекриття з врахуванням нелінійної зміни теплофізичних характеристик матеріалів відкриває додаткові резерви несучої спроможності сталевих балок при дії високих температур, проте час розрахунку вище в десятки разів.

В четвертому розділі розроблено та представлено методологічний підхід врахування нерівномірного розподілу по висоті перерізу за допомогою удосконалення математичної моделі сталевого перерізу балки перекриття уточненням приведених жорсткісних характеристик перерізу через розділення його на ділянки. Також було запропоновано методику ітераційного зниження жорсткостей. Дана методика дозволяє в одній задачі оцінити деформації конструкції на різних часових відмітках пожежі. Порівняння чисельних результатів дослідження і даних натурного експерименту дало високе співпадіння.

Виконані дослідження дозволили створити удосконалену чисельно-аналітичну методику розрахунку сталевих конструкцій на вогнестійкість з урахуванням нерівномірного розподілу температур по конструкції, вогнезахисних матеріалів та нелінійної зміни теплофізичних властивостей матеріалів. Дана методика була успішно застосована при проведенні розрахунків реальних об'єктів.

Ключові слова: вогнестійкість, нестационарна теплопровідність, чисельне моделювання, теплофізичні характеристики, теплотехнічний розрахунок, статичний розрахунок, високотемпературний вплив, вогнезахист, фізична нелінійність, метод скінченних елементів, нелінійність, сталеві конструкції, сталеві балки, напружено-деформований стан, міцність, жорсткість, деформації.

ABSTRACT

Bashynskiy O. Creation and operation criteria for structural models of steel beams with fire protection. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

The thesis on conferment of a scientific degree of the Doctor of philosophy on a specialty 192 – Building and civil engineering, area of knowledge 19 – Architecture and building. – Kyiv National University of Construction and Architecture. Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2024.

The main content of the thesis.

The thesis is aimed at developing numerical methods for assessing the fire resistance limit of steel structures by taking into account the uneven temperature distribution along the height of the section, nonlinear changes in the thermophysical properties of materials and fireproof coatings.

Based on the results of the analysis of national and foreign scientific sources and regulatory documents, as well as numerous finite element and experimental studies:

- it has been found that national and foreign documents and manuals describe only simplified analytical methods for assessing the fire resistance limit of steel structures; there are experimental methods for assessing the fire resistance limit, but they are not universal and do not allow for quick and convenient assessment of the fire resistance of any structure;
- the numerical finite element method was adapted and used to solve the problem of nonstationary heat conduction for the thermotechnical analysis of the cross-section of a steel floor beam;
- patterns that led to an uneven temperature distribution along the height of the cross-section of a steel floor beam were established;
- the reliability of the results obtained by using the numerical finite element method in comparison with the experimental method was established;
- it was found that the thermotechnical analysis of a steel floor beam, taking into account the nonlinear change in the thermal and physical characteristics of materials, opens up additional reserves of the bearing capacity of steel beams at high temperatures;
- a methodology and algorithm for steel floor beams with fire protection analysis with implementation in the LIRA-FEM software was created.

From the point of view of philosophy, the scientific and technological development of mankind is growing exponentially. The latest technologies allow for accurate, safe, convenient and fast surveys that allow for the consideration of numerous factors and criteria for the operation of building structures that could not be taken into account before. This research is aimed at increasing structural safety, environmental friendliness, and energy efficiency, which in turn affects the safety of human life, which is currently a very important factor.

In the first section, the current state of fire safety in the country and methods for assessing the fire resistance limit of building structures were analyzed. The methods of fire protection of building structures were described and a number of the most common fire protection materials were presented. Modern experimental, analytical and numerical methods for assessing the fire resistance limit of steel structures, namely steel floor beams, were analyzed. Experimental methods are the most effective, but not universal, and analytical methods do not take into account the key criteria for the operation of heat-loaded structures, so it is necessary to build a universal method for assessing the fire resistance limit of structures on the basis of analytical and numerical methods.

In the second section the solution of the problem of nonstationary thermal conductivity using the numerical finite element method was described in detail. A numerical experiment of the effect of a fire on a steel floor beam on which a reinforced concrete floor slab rests was carried out in the LIRA-FEM software. Two types of analyses were performed: thermotechnical, in which the distribution of temperature fields at each point of the beam cross-section at each minute of the fire was determined; and static, in which the strength characteristics of the cross-section and the elastic-deformation characteristics of steel were preliminarily reduced according to the average temperature in the beam cross-section at a fixed time. The results of the thermotechnical analysis were compared with the results of a similar analysis performed in the ANSYS FLUENT software and described in the regulatory document.

In the third section the algorithm for determining the nonlinear properties of structural materials and fireproof coatings was described. A thermotechnical analysis of the steel floor beam was performed with consideration of the fire protection material. The

analysis results were compared with the results of the experimental research. The results confirmed the reliability of the methodological approaches to determining the cross-sectional temperature developed in this thesis. Thermotechnical analyses of steel beam models with different variants of fire protection materials were also carried out. The regularities of temperature distribution across the cross-section depending on the type and thickness of the fireproofing material were revealed. A comparative thermotechnical calculation of the model of a steel floor beam with fire protection was carried out, taking into account and without taking into account the nonlinear change in the thermophysical properties of materials. It has been established that the thermotechnical analysis of a steel floor beam with consideration of nonlinear changes in the thermophysical characteristics of materials opens up additional reserves of the bearing capacity of steel beams under high temperatures, but the time of analysis is ten times higher.

In the fourth section a methodological approach is developed and presented to take into account the uneven distribution along the height of the section by improving the mathematical model of the steel section of a floor beam by refining the reduced stiffness characteristics of the section by dividing it into sections. A method of iterative stiffness reduction was also proposed. This technique makes it possible to estimate the deformations of the structure at different time points of the fire in one problem. Comparison of the numerical results of the study and the data of the full-scale experiment gave a high coincidence.

The research made it possible to create an improved numerical and analytical methodology for calculating steel structures for fire resistance, taking into account the uneven temperature distribution across the structure, fire protection materials, and nonlinear changes in the thermal and physical properties of materials. This methodology has been successfully applied to real-world calculations.

Key words: fire resistance, nonstationary thermal conductivity, numerical modeling, thermophysical characteristics, thermal design, static analysis, high-temperature exposure, fire protection, physical nonlinearity, finite element method, nonlinearity, steel structures, steel beams, stress-strain state, strength, stiffness, deformation.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у науковому виданні, включеному до переліку наукових фахових видань України категорії «А», яке цитується у реферативній базі Web of Science

1. S. Bilyk, O. Bashynska, O. Bashynskiy. Determination of changes in thermal stress state of steel beams in LIRA-SAPR software. Strength of Materials and Theory of Structures. Київ, 2022. Вип.108. С. 182-202. doi: <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2022.108.189-202>. *Особисто автором змодельовано вплив пожежі на поперечний переріз сталеві балки перекриття, проаналізовано напружено-деформований стан конструкції, описано результати дослідження.*

Статті у науковому виданні, включеному до переліку наукових фахових видань України категорії «Б»

2. Башинський О.В., Башинська О.Ю. Аналіз напружено-деформованого стану вогнезахищеної сталеві балки перекриття. Будівельні конструкції. Теорія і практика. Київ, 2023. Вип.12. С. 126-138. doi: <https://doi.org/10.32347/2522-4182.12.2023.126-138>. *Особисто автором змодельовано вплив пожежі на поперечних переріз сталеві балки перекриття з врахуванням вогнезахисного матеріалу, проаналізовано найбільш ефективний спосіб компоновки, виконано порівняння результатів з врахуванням лінійних та нелінійних властивостей матеріалів, описано результати дослідження.*

3. Башинський О.В. Оцінка несучої здатності сталеві балки перекриття в умовах високих температурних впливів. Наука та будівництво. Київ, 2024. Том 39 №1 (2024). С. 72-78. doi: <https://doi.org/10.33644/2313-6679-1-2024-8>.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

4. Башинський О.В. Визначення зміни термонапруженого стану сталевих балок в ПК «ЛІРА-САПР» // Будівлі та споруди спеціального призначення: сучасні матеріали та конструкції: матеріали тез доповідей IV Міжнародної науково-практичної конференції (м. Київ, 26-27 квітня, 2023 р.). С.162-163.

5. Башинський О.В. Аналіз НДС вогнезахищеної сталеві балки перекриття з врахуванням нелінійності // Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2023): матеріали XIII Міжнародної науково-практичної конференції (м. Чернігів, 25-26 травня, 2023 р.). С.125-126.

6. Bashynskiy O. Assessment of thermal effects on the cross-section of a steel floor beam // Science and society: modern trends in a changing world: proceedings of the 4th International scientific and practical conference. MDPC Publishing (Vienna, Austria. 18-20 march, 2024). P. 21-27.

7. Башинський О.В. Оцінка температурного впливу на переріз сталеві балки перекриття // Problems of emergency situations: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції (м. Харків, 16 травня, 2024 р.). С.10-11.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	14
ВСТУП.....	15
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН МЕТОДІВ ОЦІНКИ ТА РОЗРАХУНКУ СТАЛЕВИХ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ НА ТЕМПЕРАТУРНІ ВПЛИВИ.....	20
1.1. Аналіз проблеми та стан питання.....	20
1.2. Способи вогнезахисту несучих металевих конструкцій.....	26
1.3. Експериментальні, аналітичні та чисельні методи оцінки вогнестійкості будівельних конструкцій.....	33
1.3.1. Експериментальні методи.....	33
1.3.2. Аналітичні методи.....	35
1.3.3. Чисельні методи комп'ютерного моделювання.....	43
1.4. Обґрунтування вибору методів оцінки вогнестійкості сталевих конструктивних елементів та задачі дослідження.....	46
1.5. Висновки до розділу 1.....	47
РОЗДІЛ 2. ОЦІНКА СТУПЕНЮ ВОГНЕСТІЙКОСТІ СТАЛЕВИХ БАЛОК ПЕРЕКРИТТЯ НА ОСНОВІ АДАПТАЦІЇ НЕСТАЦІОНАРНОЇ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ. ЧИСЕЛЬНИЙ ЕКСПЕРИМЕНТ ВПЛИВУ ПОЖЕЖІ НА СТАЛЕВІ БАЛКИ ПЕРЕКРИТТЯ БЕЗ ВОГНЕЗАХИСТУ.....	48
2.1. Вирішення задачі теплопровідності методом скінченних елементів для оцінки вогнестійкості сталевих конструкцій.....	48
2.2. Моделювання і розрахунок сталеві балки перекриття на вогнестійкість.....	62
2.2.1. Створення моделі та задання початкових даних для розрахунку нестаціонарної теплопровідності.....	62
2.2.2. Аналіз результатів розрахунку нестаціонарної теплопровідності.....	66
2.2.3. Порівняння результатів чисельного експерименту проведеного в ПК ЛІРА-САПР та ANSYS FLUENT.....	68
2.3. Оцінка пружно-деформаційних властивостей сталеві балки в умовах високих температур.....	70
2.4. Висновки до розділу 2.....	82

РОЗДІЛ 3. УДОСКОНАЛЕННЯ ЧИСЕЛЬНОГО МЕТОДОЛОГІЧНОГО ПІДХОДУ ТА АЛГОРИТМІВ РОЗРАХУНКУ ВОГНЕЗАХИЩЕНИХ СТАЛЕВИХ БАЛОК ЧЕРЕЗ ВРАХУВАННЯ НЕЛІНІЙНИХ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТІ СТАЛІ І ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ПЛИТ ПЕРЕКРИТТЯ.....	83
3.1. Теплофізичні властивості матеріалів в умовах високих температур.....	83
3.1.1. Теплофізичні властивості будівельних конструкцій.....	83
3.1.2. Теплофізичні властивості вогнезахисних матеріалів.....	88
3.2. Оцінка вогнестійкості моделі сталеві балки перекриття з врахуванням вогнезахисту.....	96
3.2.1. Теплотехнічний розрахунок вогнезахисної балки перекриття. Порівняння результатів чисельного розрахунку з результатами натурного експерименту.....	96
3.2.2. Створення та теплотехнічний розрахунок моделей перерізів сталевих балок з різними варіантами вогнезахисту.....	101
3.2.3. Підбір оптимальної товщини вогнезахисту сталеві балки перекриття.....	109
3.2.4. Лінійні та нелінійні теплофізичні властивості матеріалів.....	111
3.3. Висновки до розділу 3.....	117
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА МЕТОДОЛОГІЇ ТА УДОСКОНАЛЕНОГО АЛГОРИТМУ РОЗРАХУНКУ СТАЛЕВИХ БАЛОК ПЕРЕКРИТТЯ З ВОГНЕЗАХИСТОМ ПРИ РЕАЛІЗАЦІЇ В ПРОГРАМНОМУ КОМПЛЕКСІ.....	119
4.1. Розвиток чисельних методів визначення несучої здатності сталевих балок перекриття при впливі високих температур.....	119
4.1.1. Методика визначення характеристик перерізу.....	119
4.1.2. Методика поділених частин перерізу.....	123
4.2. Оцінка методики ітераційного зниження жорсткості під впливом надвисоких температур.....	127
4.3. Порівняння розрахункових деформацій сталевих балок із деформаціями, зарєєстрованими під час випробувань.....	133
4.4. Висновки до розділу 4.....	137

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	138
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	141
ДОДАТОК А. ДОВІДКИ ПРО ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНУ АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ.....	148

ПЕРЕЛІК ПРИЙНЯТИХ СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ

- θ_g – температура газового середовища навколо конструкції, °С;
 θ_a – температура сталі, °С;
 θ – температура бетону, °С;
 t – час температурного впливу, хв;
 α_c – коефіцієнт конвективного теплообміну, Вт/м²·К;
ПК – програмний комплекс;
МСЕ – метод скінчених елементів;
СЕ – скінченний елемент;
 $k_{y,\theta}$ – коефіцієнт зниження для розрахункової границі текучості;
 $k_{p,\theta}$ – коефіцієнт зниження для границі пропорційності;
 $k_{E,\theta}$ – коефіцієнт зниження для нахилу лінійної пружної ділянки;
 c_a – питома теплоємність сталі, Дж/кг·К;
 $c_p(\theta)$ – питома теплоємність бетону, Дж/кг·К;
 a_a – теплопровідність сталі, Вт/м·К;
 λ_c – теплопровідність бетону, Вт/м·К
 E – модуль пружності, т/м².

ВСТУП

Актуальність теми дослідження: В умовах ведення війни інженери та науковці стикнулися з новими та досить складними проблемами: захистом цивільних будівель та об'єктів інфраструктури від ураження ракет, дронів та снарядів. Захищати будівлі від цих видів ураження дуже складно, практично неможливо. Проте в нас є можливість захиститися від наслідків цих пагубних для будівель впливів. Одним із способів захисту – оцінка вибухового впливу та підсилення несучих конструкцій будівлі задля протидії пожежі.

Наразі відомі випадки, коли конструкції витримують падіння ракети, бомби, тощо, але не витримують наслідків – а саме пожежу. При розвитку пожежі у будівлях та спорудах, що складаються із сталевих конструкцій, основні несучі конструкції починають активно деформуватися та втрачати свою несучу здатність вже через 15 хвилин після виникнення пожежі. Будівельні конструкції з несучими елементами із незахищеного металу руйнуються в рази швидше, ніж залізобетонні, завдаючи величезної матеріальної шкоди та підвищуючи ризик людей, які знаходяться усередині будівель. Для запобігання подібним ситуаціям існують певні експериментальні та аналітичні методики оцінки межі вогнестійкості конструкцій, проте вони не є ідеальними та не можуть в повній мірі висвітлити роботу сталевих конструкцій при впливі високих температур. Саме тому необхідно розробити методику математичного моделювання поведінки конструкцій при впливі високих температур з врахуванням ефективної роботи вогнезахисних матеріалів. Така методика створення математичної моделі при розрахунку вогнестійких будівель та споруд та подальшої оцінки НДС конструкцій є критичним етапом проектування, оскільки від нього залежить надійність та безпека при експлуатації конструкції, особливо у воєнний час.

Зв'язок з науковими програмами, планами, темами

Основні дослідження теоретичного і прикладного характеру пов'язані з напрямом наукових досліджень, що виконуються науково-педагогічними працівниками кафедри металевих та дерев'яних конструкцій Київського національного університету будівництва і архітектури (КНУБА) в межах науково-

дослідної теми: «Розвиток теорії вибору раціональних ресурсозберігаючих конструкцій сталевих рам з використанням ефективних двотаврових профілів енергоекономічних будівель» (номер держреєстрації: 0121U111715), що виконується на підставі наказу КНУБА від 03.06.2021 № 243.

Мета наукової роботи полягає в удосконаленні чисельних фізико-математичних моделей напружено-деформованого стану роботи сталевих балок перекриття із врахуванням критеріїв роботи вогнезахисених конструкцій при дії високих температур.

Об'єкт дослідження: сталеві балки перекриття двотаврового перерізу різних розмірів з та без нанесених вогнезахисних матеріалів довжиною 1, 6 та 12 метрів, на які спираються залізобетонні плити перекриття.

Предмет дослідження: робота сталевих балок перекриття з вогнезахисними та без вогнезахисних матеріалів з урахуванням нелінійної зміни теплофізичних характеристик під час впливу високих температур. Вплив високих температур на міцнісно-деформаційні властивості сталевих балок.

Методи дослідження: аналіз, узагальнення, чисельний метод скінченних елементів, експериментальний метод оцінки межі вогнестійкості конструкцій, розрахунково-аналітичні методи оцінки вогнестійкості.

Основні завдання дослідження:

- провести аналіз існуючих аналітичних, експериментальних та чисельних методів оцінки вогнестійкості сталевих балкових конструкцій перекриття.
- адаптація рішень задач нестационарної теплопровідності для оцінки межі вогнестійкості сталевих конструкцій перекриття.
- провести чисельний експеримент впливу пожежі на сталеву балку перекриттів без вогнезахисту за допомогою існуючого вітчизняного програмного комплексу без урахування нелінійних теплофізичних властивостей (приклад для порівняння). Порівняти результати чисельного експерименту з результатами аналогічного чисельного експерименту інших авторів.

- удосконалити чисельний методологічний підхід та алгоритми розрахунку вогнезахищених сталевих балок через врахування нелінійних теплофізичних властивості сталі і залізобетонних плит перекриття (без сумісної їх роботи).
- провести чисельний експеримент впливу пожежі на вогнезахищену сталеву балку перекриття та порівняти результати експерименту з результатами натурального експерименту. Виявити закономірності деформування сталевих балок в залежності від типу та товщини вогнезахисних матеріалів.
- створити методологію та алгоритм розрахунку сталевих балок перекриття з вогнезахистом з реалізацією в програмному комплексі ЛІРА-САПР.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

Вперше:

- встановлено закономірність розподілення температур по перерізу сталевих балок в залежності від різних конструктивних особливостей та вогнезахисних матеріалів.
- встановлено закономірність розподілу температур по висоті перерізу сталевих балок з врахуванням нелінійної зміни теплофізичних характеристик.
- виявлено закономірності деформування сталевих балок в залежності від типу та товщини вогнезахисних матеріалів під час пожежі.
- розроблено методологічний підхід врахування нерівномірного розподілу температур по висоті перерізу за допомогою удосконаленої розрахункової схеми з уточненими характеристиками перерізу через розділення перерізу на ділянки.
- запропоновано методика ітераційного зниження жорсткостей елементів. Дана методика дозволяє в одній задачі оцінити деформації конструкції на різних часових відмітках пожежі.

Удосконалено:

- чисельні та аналітичні методи оцінки вогнестійкості сталевих конструкцій.

Отримали подальший розвиток:

- застосування чисельних методів розрахунку будівельних конструкцій для оцінювання ступеню вогнестійкості сталевих конструкцій.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що методика оцінки межі вогнестійкості, яка запропонована в цьому дисертаційному дослідженні може бути використана у розробці проектів вогнезахисту сталевих конструкцій. Результати дослідження можуть бути використані при розрахунках сталевих конструкцій на міцність, стійкість та гнучкість з врахуванням теплотехнічних критеріїв. Також результати дослідження можуть бути використані у навчальному процесі будівельного факультету Київського національного університету будівництва і архітектури.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 7 робіт. Основні результати викладені в 1-й статті у науковому виданні, включеного до переліку наукових фахових видань України категорії «А», яке цитується у реферативній базі Web of science, 2 статті у наукових виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України категорії «Б». 4 роботи представлені як тези доповідей у національних та міжнародних науково-технічних конференціях.

Особистий внесок здобувача. Основні результати та розробки, які відображають суть дисертації, виконані здобувачем самостійно. Вибір теми та формування основних завдань дослідження виконані спільно з науковим керівником. Особистий внесок здобувача полягає у формуванні задач дослідження, генерування ідей щодо їх виконання, проведення чисельних розрахунків, аналіз їх результатів.

Апробації результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на національних та міжнародних науково-технічних конференціях, а саме:

- IV Міжнародна науково-практична конференція «Будівлі та споруди спеціального призначення: сучасні матеріали та конструкції» (м. Київ, 26-27 квітня, 2023 р.);
- XII Міжнародна науково-практична конференція «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» (м. Чернігів, 25-26 травня, 2023 р.);
- IV International scientific and practical conference «Science and society: modern trends in a changing world» (Vienna, Austria, 18-20 march, 2024);

– Міжнародна науково-практична конференція «Problems of Emergency Situations» (м. Харків, 16 травня, 2024 р.).

Публічна презентація наукових результатів дисертації, а також її обговорення відбувались на засіданнях кафедри металевих та дерев'яних конструкцій КНУБА (м. Київ, 2024 рік).

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із переліку скорочень та позначень, вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел. Загальний обсяг роботи становить 149 сторінок, у тому числі основна частина складає 140 сторінок, список використаних джерел – 7 сторінок, додатки – 2 сторінки. Основна частина, крім тексту, включає таблиці, рисунки та формули.

Подяка. Висловлюю глибоку подяку науковому керівнику – доктору технічних наук, професору Білику Сергію Івановичу. Також дякую керівництву та колективу ТОВ «ЛІРА-САПР» за моральну підтримку під час написання дисертаційної роботи. Особливу подяку висловлюю колективу кафедри металевих та дерев'яних конструкцій Київського національного університету будівництва і архітектури.

РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН МЕТОДІВ ОЦІНКИ ТА РОЗРАХУНКУ СТАЛЕВИХ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ НА ТЕМПЕРАТУРНІ ВПЛИВИ

1.1. Аналіз проблеми та стан питання

Стан питання по вогнестійкості сталевих конструкцій неможливо визначити без статистичних даних по пожежам, які виникли в будівлях, що були побудовані з використанням незахищених конструкцій. Існують приклади, які показують, що будівля витримує вплив вибухової хвилі від влучання снаряда, ракети, тощо, але руйнується від подальшого впливу пожежі. Нехтування протипожежними нормами та рекомендаціями може призвести, і, на жаль, призводить до чисельних людських жертв та матеріальних збитків.

За даними статистики ДСНС України [1], в 2023 році статистичні показники стану з пожежами в країні наступні:

- зареєстровано 67934 випадків пожежі;
- загинуло 1472 особи, з них 40 дітей та підлітків до 18 років;
- отримали травми 1551 особа, з них 145 дітей та підлітків до 18 років;
- знищено та пошкоджено 28520 будівель та споруд різного призначення (переважно житлового та виробничого призначення);
- задано прямих матеріальних збитків на 23.1 мільярди гривень.

Також слід зазначити, що велика кількість пожеж виникала внаслідок вибухів та обстрілів, в тому числі об'єктів критичної інфраструктури: електростанцій, електропідстанцій, газорозподільчих станцій, станцій тепло та водопостачання.

Дуже великих прямих та непрямих збитків завдавали пожежі саме на електростанціях. Після влучання дрону, бомби або снаряду через пошкодження трансформаторів або силових ліній електропередач відбувалося загоряння поблизу металевих конструкцій довкола зони ураження. Головна проблема полягає в тому, що пожежу, спричинену загорянням мастила трансформатора практично неможливо загасити, що призводить до тривалого теплового ураження конструкцій

і дуже складного та коштовного ремонту. В якості прикладу на рис. 1.1 показано зовнішній вигляд трансформатору на електропідстанції після пожежі.



Рис. 1.1. Вид трансформатору після пожежі

Звичайно при будівництві об'єктів такого типу враховуються різноманітні протипожежні міри: огороження протипожежними екранами, врахування безпечної відстані між трансформаторами, щоб пожежа не перекинулася на сусідні об'єкти.

За статистику, наведеною вище, в 2023 році від пожежі було повністю або частково знищено 25564 будинків та споруд житлового призначення та 718 будівель виробничого призначення. Тепловий вплив на несучі конструкції будівель призводить до значного зниження їх несучої здатності, що в свою чергу нерідко призводить до прогресуючого обвалення як будівель із залізобетонним каркасом (рис. 1.2) так і будівель зі сталевим каркасом (рис.1.3).



Рис. 1.2. Обвалення з/б конструкцій заводу в результаті пожежі, Ржищів



Рис. 1.3. Обвалення сталевих конструкцій складу внаслідок пожежі, Вінниця

Загоряння в обох випадках були спричинені не бойовими діями. Пожежі виникли з побутових причин. Проте є приклади, коли пожежа виникає саме через влучання ракети або снаряду. Одним з таких прикладів – торговельний центр

«Ретровіль» в Києві. На рис. 1.4 видно, як влучання ракети викликало пожежу, проте пожежа не викликала прогресуючого обвалення.



Рис. 1.4. Торгівельний центр «Ретровіль» після влучання ракети, Київ

Приклади вище показують, наскільки важливо та актуально дотримуватися протипожежних вимог та враховувати тепловий вплив на несучі конструкції будівель та споруд.

У звичайних умовах (при кімнатній температурі) втрата несучої спроможності згинальних металевих елементів відбувається при збільшенні навантаження до критичної величини. Причому збільшення прогину балок при зростанні навантаження до критичного моменту відбувається поступово, відносно непомітно. Різке збільшення прогину відбувається при досягненні навантаження критичної величини.

Розвиток пожежі характеризується інтенсивним зростанням температури з сильним задимленням. Дані фактори призводять до швидкого нагрівання будівельних конструкцій, і, як правило, великим деформаціям та подальшим обваленням.

В умовах пожежі незахищені навантажені сталеві балки втрачають свою несучу здатність на відмітці часу до 15-ти хвилин пожежі без зміни діючого на них

навантаження. Це викликано тим, що високі температурні навантаження негативно впливають на металеві конструкції, зменшуючи границю текучості σ_u та модуль пружності E , що призводить до стрімкого зниження несучої спроможності несучих конструкцій і виникнення надлишкових деформацій.

В якості прикладу катастрофічних наслідків впливу пожежі в будівлях з несучими сталевими конструкціями можна привести руйнування башт Центру міжнародної торгівлі “World trade center” (Башти-близнюки) в США в результаті терористичного акту 11 вересня 2001 року.

З інженерної точки зору хмарочоси було спроектовано як великі вертикальні колони. Кожна башта представляла собою квадрат зі стороною шириною 64 метри. Висота башт була 411 метри, глибина підземної частини перевищувала 21 метр. Вага кожної вежі оцінювалася приблизно в 500000 тон. Ця будівля була спроектована таким чином, щоб витримувати вплив урагану швидкість 225 км/год, або бокове навантаження в 5000 тон. Вага кожної вежі більше ніж в 1000 разів перевищувала вагу літаків, що стикнулися з ними.

Міжповерхові перекриття веж були виконані зі сталезалізобетону: залізобетон по профнастилу. В якості несучих конструкцій перекриття були облаштовані сталеві ферми з вузлами кріплення до колон зовнішнього і внутрішнього периметрів. Така схема зі сталевими несучими згинальними конструкціями в сполученні з залізобетонним перекриттям часто застосовується в сучасному будівництві.

Всі несучі сталеві конструкції були спроектовані з врахуванням вогнезахисту таким чином, щоб витримати високотемпературний вплив пожежі без увімкнення автоматичних систем пожежогасіння протягом 3-х годин.

Башти-близнюки перенесли удар двох літаків, втративши при цьому частину несучих колон зовнішнього периметру. Далі відбувся розлив і загоряння палива і почалася пожежа. Розвиток пожежі в обох вежах оцінюються за єдиним сценарієм.

Спочатку відбулося обвалення прольотів монолітних залізобетонних перекриттів, і, як наслідок, збільшення обігрівної висоти зовнішніх та центральних

несучих сталевих колон. Далі, з огляду на великий коефіцієнт теплового розширення сталі та температурну деформацію, у балках виникли великі перепади напружень. Це спричинило перекошування конструкцій каркаса, яке призвело до втрати стійкості несучих колон. Таким чином, втрата несучої здатності сталевих конструкцій відбувалася через два фактори: втрата міцності під навантаженням, через вплив високої температури, і втрата стійкості через деформацію сталі внаслідок різниці температур під час пожежі.

Тривалість пожежі до обвалення будівель не перевищила 2-х годин. Оскільки балки одного або двох найбільш пошкоджених поверхів втратили міцність, і зовнішні колони почали деформуватися назовні, на них впали верхні поверхи. Це спричинило ефект доміно, який зруйнував будівлю протягом десяти секунд.

Руйнування будівель всесвітнього торгового центру в Нью-Йорку ще раз вказує на проблему прогнозування вогнестійкості несучих сталевих конструкцій із вогнезахистом в умовах техногенних катастроф, а також наголошує на актуальності теми розвитку протипожежного проектування об'єктів будівництва на основі розроблення наукових методів оцінки вогнестійкості будівельних конструкцій.

Наразі в основу проектування будівель та споруд покладені прогнозні розрахунки пожежної небезпеки будівель. Заходи по протипожежному захисту, які включають в себе обробку несучих конструкцій вогнезахисними матеріалами, можуть суттєво знизити ризики виникнення небезпечних факторів пожежі. Ризик обвалення сталевих конструкцій при високотемпературному впливі можна знизити до мінімуму, якщо розробити належний регламент, який містить в собі проект вогнезахисту будівлі.

Вибір вогнезахисного матеріалу відбувається на основі ступеню вогнестійкості матеріалу, вартості та конструктивних особливостей нанесення. Ступень вогнестійкості матеріалу виявляється виключно за допомогою експериментальних досліджень.

При позитивному рішенні на користь одного виду вогнезахисту, розробляється проект вогнезахисту будівлі. Проект вогнезахисту включає в себе:

- пояснювальну записку, яка має включати в себе загальні положення вогнезахисту, ступеню вогнестійкості будинку, прийняті класи вогнестійкості будівельних конструкцій, обґрунтування застосування обраного вогнезахисного матеріалу із включенням технічної документації виробника, основні фізико-хімічні характеристики вогнезахисного матеріалу, умови та терміни його експлуатації та розрахункову частину, в якій наводиться розрахунок площі поверхні конструкцій, що підлягає нанесенню вогнезахисного облицювання та розрахунок витрат вогнезахисного матеріалу;
- креслення конструкцій та об'єктів вогнезахисту;
- та додатки: технічне завдання на вогнезахисні роботи, креслення об'єкту будівництва сертифікати фахівця та обраного вогнезахисного матеріалу.

Принцип розрахунково-аналітичного підходу в проектуванні вогнезахисту металоконструкцій має ґрунтуватися на сучасних розрахункових методах, що враховують специфіку роботи несучих сталевих елементів під час пожежі. З огляду на викладене вище, зростає актуальність розроблення та вдосконалення нових методів розрахунку вогнестійкості сталевих конструкцій із вогнезахистом.

1.2. Способи вогнезахисту несучих металевих конструкцій

Для підвищення ступеню вогнестійкості сталевих конструкцій до нормованих значень сьогодні застосовуються наступні способи вогнезахисту: тепловідведення та теплоізоляція (рис. 1.5).

Спосіб тепловідведення полягає в охолодженні пустотних сталевих конструкцій циркулюючою рідиною або заповнення пустотних колон бетоном [2].

Водою заповнюють трубчаті або інші пустотні конструкції, які мають герметичні властивості і розраховані на додаткові напруження від гідравлічного тиску води.

Теплоізоляція забезпечується нанесенням теплоізолюючого матеріалу на конструкцію. Це може бути вогнезахисна штукатурка, реактивна вогнезахисна фарба або мінеральні плити [3].



Рис. 1.5. Способи вогнезахисту сталевих несучих конструкцій

Матеріали, які використовуються в якості протипожежної ізоляції будівельних конструкцій повинні мати гарні теплоізолюючі властивості, які оцінюються коефіцієнтом температуропровідності:

$$\alpha = \frac{\lambda_t}{c_t \rho_0} \quad (1.1)$$

де α – коефіцієнт температуропровідності $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$;

λ_t – теплопровідність;

c_t – питома теплоємність;

ρ_0 – густина.

Теплоізоляція виконується двома способами: вологим та сухим.

Вологий спосіб включає в себе протипожежну ізоляцію, яка використовує напилувальні мінеральні матеріали з неорганічними в'язучими, вогнезахисні штукатурки, вогнезахисні реактивні фарби та покриття.

Вогнезахисні напилувальні мінеральні матеріали з неорганічними в'язучими частіше всього застосовують у вигляді цементно-перлітових, цементно-вермикулітових, гіпсоперлітових та гіпсовермикулітових складів, які мають високу адгезійну властивість до металевих та бетонних поверхонь. Густина таких матеріалів складає 240-400 кг/м³.

Такі склади наносять на поверхню конструкцій механізованим способом. Товщина вихідного покриття складає 10-60 мм, в залежності від необхідного ступеня вогнезахисту конструкції.

Вогнезахисні штукатурки призначені для підвищення межі вогнестійкості різних будівельних конструкцій, таких як колони, балки, в'язі, стики і вузли, які використовуються на цивільних і промислових об'єктах різного призначення, в тому числі на об'єктах енергетики (теплові та атомні електростанції), об'єктах газової та нафтової промисловості, а також металургійних виробництвах під час їх будівництва, реконструкції або ремонту. Цей вогнезахисний матеріал здатний підвищити межу вогнестійкості несучих сталевих конструкцій до 240 хвилин.

Вогнезахисні штукатурки складаються з цементно-піщаного розчину. Склад розчину наступний: пісок та цемент марки не нижче 400 із співвідношенням 1 :4.5. Штукатурки поставляються у вигляді сухої суміші, яку необхідно змішати з водою безпосередньо перед застосуванням, та наноситься на поверхню конструкції, яку необхідно захистити, для утворення вогнезахисного шару. Такий шар (покрив) відносять до пасивних товстошарових вогнезахисних засобів, які захищають будівельні конструкції від дії високих температур під час пожежі за рахунок теплоізоляційних властивостей.

Товщина шару покриву визначається в залежності від приведеної товщини металу та необхідного класу вогнестійкості окремої конструкції. Штукатурка не є одночасно антикорозійним захистом, тому перед нанесенням штукатурки металеві конструкції необхідно обробити захистом від корозії. Також для підвищення

стійкості до вологи та до дії агресивних середовищ та інших можливих зовнішніх чинників рекомендується після повного висихання штукатурки нанести захисні лакофарбові матеріали з попередньою обробкою поверхонь ґрунтовими засобами глибокого проникнення.

Вогнезахисна обробка штукатуркою полягає в нанесенні на підготовлену поверхню сталевих конструкцій антикорозійної ґрунтовки, адгезійної ґрунтовки та захисного лакофарбового покриття.

Одним із вологих способів вогнезахисту є оббетонування металевих конструкцій. Цей спосіб рекомендується у випадку, якщо процес оббетонування необхідних також для підсилення металевих конструкцій. Використовується в основному для вогнезахисту колон (рис. 1.5).

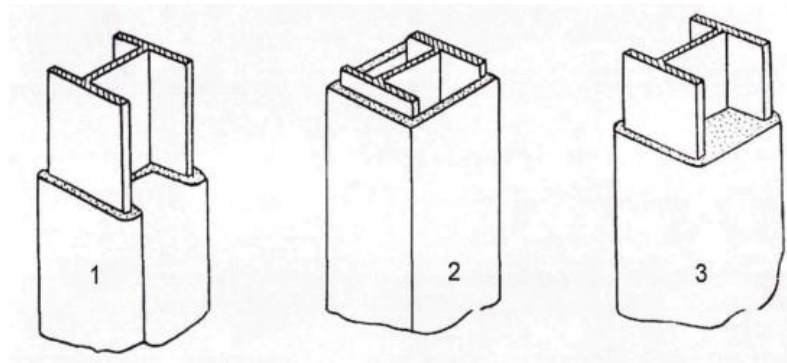


Рис. 1.6. Вогнезахист сталевих двотаврових колон оббетонуванням:

- 1 – захист по контуру перерізу колони;
- 2 – захист у вигляді коробчастого перерізу;
- 3 – захист у вигляді заливки перерізу бетоном

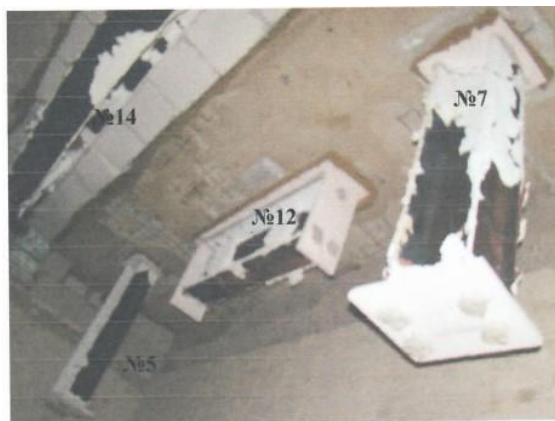
Вогнезахисні фарби призначені для підвищення вогнестійкості різних будівельних конструкцій, що використовуються на цивільних і промислових об'єктах різного призначення, включаючи об'єкти енергетики (теплові та атомні електростанції), об'єкти газової та нафтової промисловості, а також металургійні об'єкти під час їх будівництва, реконструкції або ремонту. Цей вогнезахисний матеріал здатний підвищити межу вогнестійкості несучих сталевих конструкцій до 120 хвилин.

Вогнезахисні реактивні фарби та покриття складаються з антипіренів, коксо- та газоутворювачів, наповнювачів у розчині полімеру в органічному розчиннику. Під впливом високих температур від пожежі вогнезахисний покрив створює теплоізоляційний спінений коксовий шар, який захищає конструкції від дії вогню. Вогнезахисна фарба відноситься до реактивних тонкошарових вогнезахисних виробів. Товщина шару покриву визначається в залежності від необхідного класу вогнестійкості сталевих конструкцій, зведеної товщини та проектної критичної температури конструкцій.

Вогнезахисні фарби після нанесення утворюють на поверхні захищеної конструкції тонкий непрозорий шар, ефективність якого заснована на ефекті спучування при досягненні відповідного рівня температури. При досягненні цього рівня товщина шару збільшується в 10-40 разів. Цей тип вогнезахисту наносять на поверхню сталевих конструкцій тонким шаром товщиною до 2 мм. При температурі 170-200°C фарба спучується (рис. 1.6), утворюючи пористий теплоізоляційний шар (рис. 1.6). Завдяки низькій теплопровідності пористий шар запобігає швидкому нагріванню елементів. Застосування реактивних фарб забезпечує збільшення ступеню вогнестійкості конструкцій до 120 хв [4].



а



б

Рис. 1.7. Сталеві конструкції, покриті реактивною фарбою: а – до нагрівання; б – після нагрівання

Сухий спосіб нанесення вогнезахисту включає в себе укладання протипожежної ізоляції у вигляді вогнезахисних плит: мінераловатних, базальтових, перліто-вермикулітних плит. Також можливе використання вогнезахисту у вигляді шкарлуп з армованих бетонних плит, які було виготовлено заздалегідь.

Дані плити призначені для підвищення межі вогнестійкості конструкцій різного призначення, в тому числі цивільних (склади, офіси, торговельні центри), промислові та енергетичних споруд, а також споруд нафтогазової промисловості. Цей вогнезахисний матеріал здатний підвищити межу вогнестійкості несучих сталевих конструкцій до 180 хвилин.

Найбільш розповсюдженим є варіант перліто-вермикулітних плит. Ці плити виготовляють методом пресування перліту, вермикуліту та силікатного в'язучого. Плити закріплюються до поверхні захищеної конструкції за допомогою спеціального термоклею та скріпляються між собою металевими скобами. Для забезпечення максимального ступеню вогнезахисту та зменшення теплового впливу на конструкцію, рекомендується залишати між вогнезахисною плитою та конструкцією повітряний прошарок, як показано на рис. 1.7.

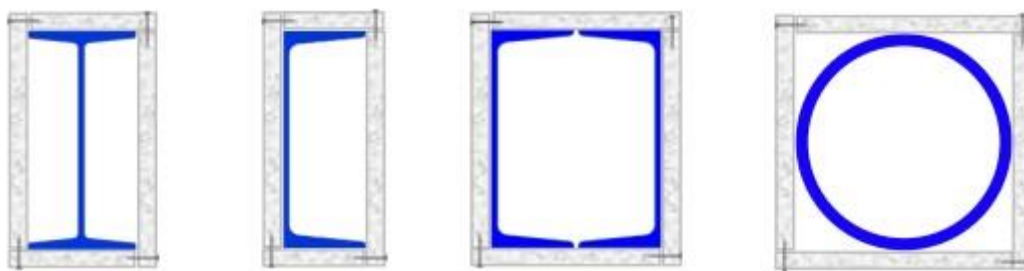


Рис. 1.8. Схема вогнезахисту сталевих конструкцій за допомогою плит

Вогнезахисні плити відносяться до того ж самого класу, що і вогнезахисні штукатурки – пасивні товстошарові вогнезахисні засоби, які захищаються будівельні конструкції від високотемпературних впливів за рахунок теплоізоляційних властивостей.

Для закріплення таких плит на конструкції використовують металеві скоби або саморізи, а для герметизації щілин використовуються спеціальний термостійкий клей.

Товщина шару вогнезахисних плит визначається в залежності від необхідного класу вогнестійкості сталевих конструкцій, зведеної товщини та проектної критичної температури конструкцій.

Область застосування того чи іншого варіанту вогнезахисту визначається з урахуванням:

- необхідного ступеню вогнезахисту конструкції;
- типу конструкції, що необхідно захистити (колони, балки, ригелі, в'язі);
- виду та величини навантаження, яке діє на конструкцію;
- температурно-вологих умов експлуатації та проведення робіт по влаштуванню вогнезахисту;
- ступеню агресивності оточуючого середовища до вогнезахисного матеріалу а також ступеню агресивності матеріалу вогнезахисту по відношенню до матеріалу конструкції;
- збільшене навантаження на конструкцію від вогнезахисту;
- умов монтажу вогнезахисту (під час зведення будівлі або її реконструкції);
- експлуатаційних умов будівлі (токсичності вогнезахисних матеріалів);
- естетичних вимог до конструкцій.

Проаналізувавши існуючі типи вогнезахисту сталевих конструкцій можна зробити висновок, що для підвищення межі вогнестійкості сталевих балок перекриття або покриття найбільш доцільно використовувати теплоізоляційний спосіб вогнезахисту, використовуючи теплоізоляційні матеріали різного способу нанесення. Вибір теплоізоляційного матеріалу залежить від проектної межі вогнестійкості конструкції, вартості матеріалу, конструктивних особливостей елемента та способу нанесення.

1.3. Експериментальні, аналітичні та чисельні методи оцінки вогнестійкості будівельних конструкцій

1.3.1. Експериментальні методи

Випробування на вогнестійкість сталевих конструкцій з вогнезахистом виконуються відповідно до ДСТУ Б В.1.1-4-98 «Захист від пожежі. Будівельні конструкції. Методи випробувань на вогнестійкість. Загальні вимоги» та ДСТУ EN 1363-1:2023 «Випробування на вогнестійкість. Частина 1. Загальні вимоги (EN 1363-1:2020, IDT)» [5, 6].

У відповідності до цих нормативних документів, несучі будівельні конструкції мають випробовувати під навантаженням. Розподіл навантаження і умови спирання повинні відповідати розрахунковим схемам, які були прийняті в технічній документації. Навантаження для випробування встановлюють з умов створення в розрахункових перерізах зразків конструкції напружень, які відповідають їх проектним значенням або технічній документації. При визначенні проектних значень напружень необхідно враховувати лише постійні та тимчасово тривалі навантаження в їх розрахункових значеннях з коефіцієнтом надійності рівним 1 [7].

Випробування на вогнестійкість сталевих балок з вогнезахистом під впливом навантаження проводять в спеціальних горизонтальних печах.

Футерування печі виконано з вогнетривкої цегли з шамотним наповнювачем, укладеного на суміш цементного розчину з шамотною глиною. Конструкція кладки печі забезпечує стабільність температурного режиму, задану теплову інерцію, можливість установа зразків, кріплення устаткування і пристосувань. Установа обладнана пристроєм для вимірювання прогинів. Навантаження здійснюється вантажами за допомогою кран-балки, згідно з розрахунковою схемою. Регульований пристрій системи димових газів із вогневого простору печі повинен забезпечувати надлишковий тиск.

Основні технічні характеристики установки:

1. Розміри вогневої камери:

Довжина – 5800 мм;

Ширина – 2800 мм;

Висота – 800 мм;

Загальний об'єм вогневої камери – 13.0 м³;

2. Кількість форсунок – 8 шт.;
3. Температурний режим визначається за ДСТУ Б В.1.1-4-98 [5];
4. Надлішковий тиск у вогневій камері – 10 ± 2 Па.

Контроль температурного режиму а також температури конструкції здійснюється за допомогою реєструючих приладів та розміщених по периметру та довжині зразка термопар (рис. 1.9). Замір прогинів в балці виконується спеціальним приладом.

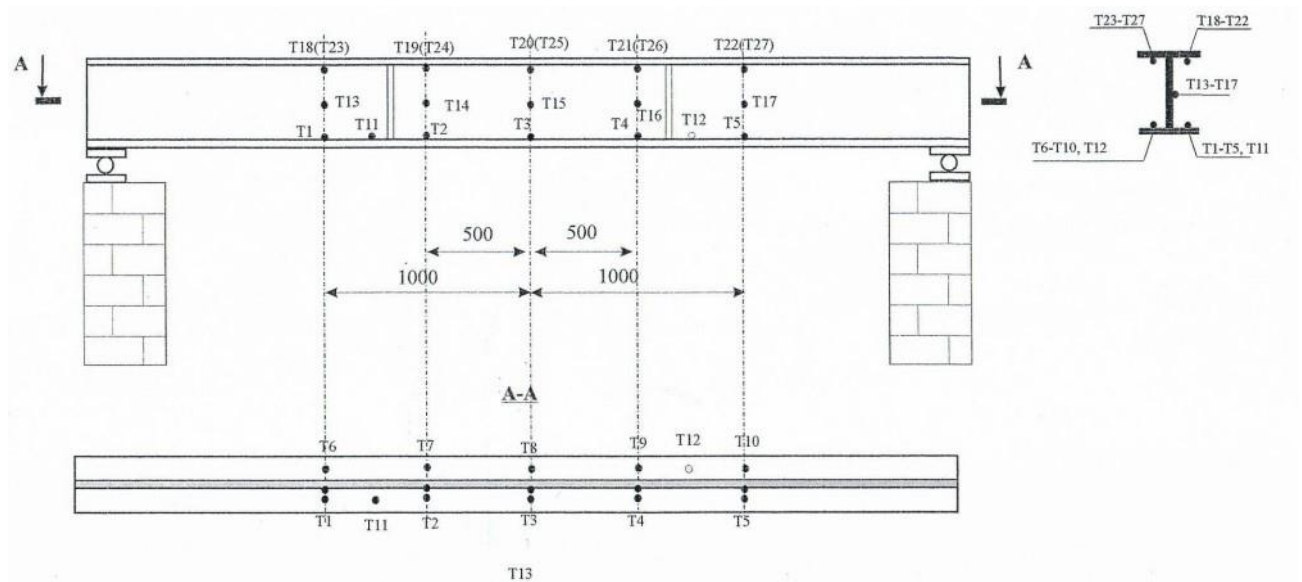


Рис. 1.9. Приклад схеми розміщення термопар на навантаженій балці

Принцип роботи установки полягає в створенні температурного режиму, яке відповідає стандарту пожежі. Температурний режим встановлюється відповідно ДСТУ Б В.1.1-4-98. Температура в печі визначається по залежності:

$$t_{a,t} = 345 \lg(8\tau + 1) + t_n [^{\circ}\text{C}] \quad (1.2)$$

де

$t_{a,t}$ - температура середовища, що нагрівається, $^{\circ}\text{C}$;

τ – час, хв,

t_n – початкова температура середовища, що нагрівається, °C.

Температурний вплив на піддослідний зразок, навантажений нормативним навантаженням (N_n), призводить до прогину зразка і втраті його несучої спроможності. Суть експериментального методу полягає у визначенні часу втрати несучої спроможності (R) в результаті обвалення або досягнення граничних деформацій в балці, що випробується. Час, за який зразок вичерпує свою несучу спроможність називається ступенем вогнестійкості.

Експериментальний метод оцінки вогнестійкості сталевих конструкцій є дуже точним, тому що дозволяє змоделювати умови прогрівання будівельних конструкцій максимально наближені до реальної пожежі. Також даний метод дозволяє визначити теплоізоляційні властивості вогнезахисних матеріалів. Проте експериментальні дослідження мають низку недоліків:

- розмір зразків, на яких проводиться випробування, обмежений габаритом випробувальних установок;
- нестабільність температурного режиму;
- вплив на вогнестійкість сторонніх факторів, які присутні при випробуваннях (вологість, тиск, рух повітря тощо);
- при випробуваннях отримуються дані лише про поведінку даного зразку. Дуже складно, а іноді неможливо використовувати результати випробувань в інших випадках;
- велика трудомісткість і вартість досліджень.

1.3.2. Аналітичні методи

За останні роки аналітичні методи оцінки вогнестійкості будівельних конструкцій а також їх розрахунків під впливом високих температур значно розвинулись. Дані методи отримали стрімкий розвиток завдяки накопиченню великої кількості інформації, досвіду та проведенню низки досліджень в нашій країні та за кордоном. Тому разом з експериментальними методами актуальними стають аналітичні методи оцінки вогнестійкості сталевих конструкцій.

Великий внесок в створення та розвиток основ теоретичного дослідження вогнестійкості, а також в дослідження роботи елементів будівельних конструкцій при високотемпературному впливі внесли вітчизняні вчені Отрош Ю.А., Ковальов А.І., Голоднов О.І., Демчина Б.Г., Сур'янінов М.Г., Фомін С.Л., та багато інших.

Отрош Ю.А. та Ковальов А.І. в свої працях розвивають існуючі аналітичні та розрахункові методи оцінки вогнестійкості залізобетонних та сталевих конструкцій з врахуванням вогнезахисних матеріалів [8, 9, 10]. Голоднов О.І. досліджував вплив високих температурних впливів на сталеві каркаси і запропонував методику оцінки технічного стану будівлі після впливу пожежі [11]. Демчина Б.Г. в своїх наукових працях досліджував питання вогнестійкості залізобетонних конструкцій, зокрема монолітних композитних плит де запропонував підвищувати межу вогнестійкості сталобетонних конструкцій за допомогою раціонального розміщення додаткової арматури [12]. Сур'янінов М.Г. розвинув та адаптував аналітичні методи оцінки вогнестійкості залізобетонних конструкцій, зокрема колон [13], а Фомін С.Л. в свою чергу зробив великий вклад в розвиток вітчизняних нормативних документів по роботі залізобетонних конструкцій під час високотемпературних впливів [14].

Також необхідно відмітити внесок в розвиток вогнестійкості будівельних конструкцій наступних іноземних вчених: S. Dzidic, B. Kukfisz, B. Bartelemi, De Silva D., T. Harmathy, K.N. Huebner, J. Jiang, K. Kodrina, Li G.-Q., O. Pettersson, Q. Xu, L.J. Segerlind, Y.C. Wang, O.C. Zeinkiewicz.

В чинних нормативних документах детально описані спрощені методи розрахунку сталевих конструкцій на вогнестійкість, а уточнені методи не розглядаються. Вітчизняні та європейські нормативні документи [15, 16] описують лише принципи проектування, що лежать в основі уточнених методів. У відповідності до цих методів вогнестійкість несучих сталевих конструкцій оцінюється за ознакою втрати несучої спроможності в нагрітому стані, тобто оцінюється критична температура, при якій конструкція втрачає стійкість або несучу здатність.

Розрахунок складається з двох частин: статичний та теплотехнічний. Статична частина полягає в обчисленні величини критичної температури конструкції, при якій настає її межа (границя) вогнестійкості.

Теплотехнічна частина розрахунку полягає у встановленні безпосередньої величини ступеню вогнестійкості конструкції, тобто часу її прогрівання до критичної температури.

Розрахунок вогнестійкості конструкції має враховувати наступні етапи [16]:

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

Важливим етапом розрахунку вогнестійкості конструкції є визначення температурного режиму пожежі, який визначає температурно-часову залежність розвитку пожежі. Серед температурних режимів розрізняють номінальні та параметричні.

Для номінальних температурних режимів характерний усталений режим розвитку пожежі. Серед номінальних режимів пожежі розрізняють:

- стандартний температурний режим;
- температурний режим зовнішньої пожежі;
- температурний режим вуглеводневої пожежі.

Стандартний температурний режим пожежі характеризується залежністю температури від часу, яка відображає сценарій пожежі, що відбувається в пожежному відсіку.

Стандартний температурний режим визначається за формулою:

$$\theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1) [^{\circ}\text{C}] \quad (1.3)$$

де

θ_g – температура газового середовища навколо конструкції, $^{\circ}\text{C}$;

t – час, хв.

Коефіцієнт конвективного теплообміну становить $\alpha_c = 25$, Вт/м²*К.

Графічне зображення температурно-часової залежності стандартного режиму пожежі показано на рис. 1.10.

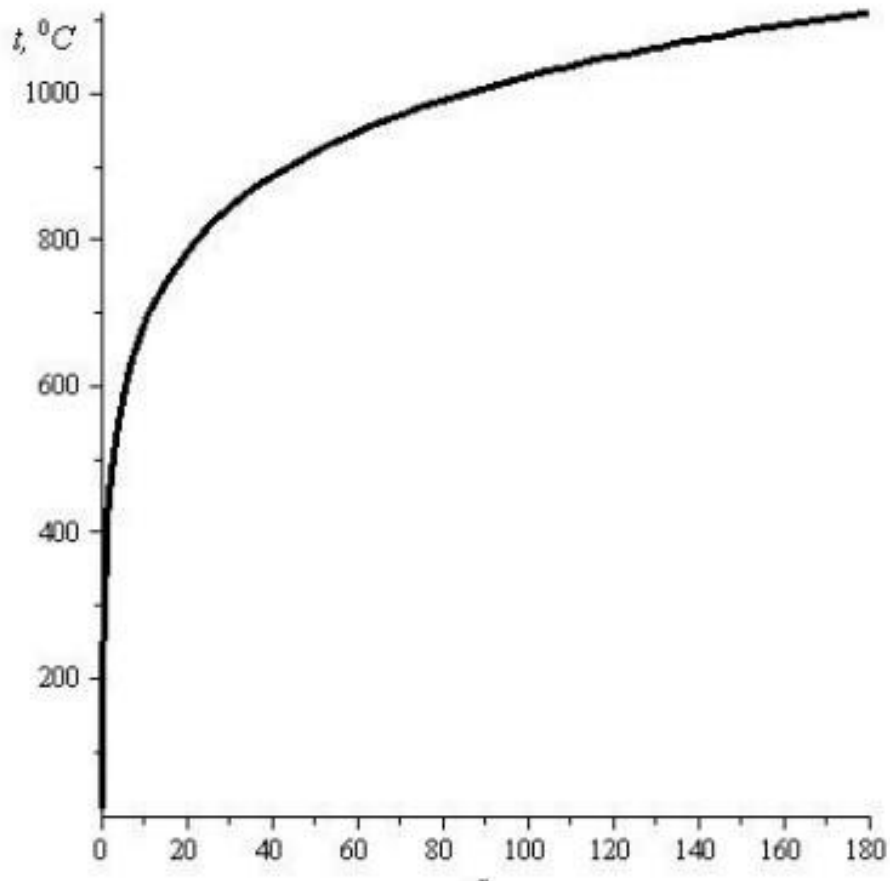


Рис. 1.10. Графік стандартного режиму пожежі

Температурний режим зовнішньої пожежі створює більш жорсткі умови, ніж випробування за стандартних температурних умов. Ця температурно-часова залежність використовується для визначення межі вогнестійкості огорожувальних конструкцій.

Температурний режим зовнішньої пожежі визначають за формулою:

$$\theta_g = 660(1 - 0.687e^{-0.32t} - 0.313e^{-2.5t}) + 20[^\circ\text{C}] \quad (1.4)$$

θ_g – температура газового середовища навколо конструкції, $^\circ\text{C}$;

t – час, хв.

Коефіцієнт конвективного теплообміну становить $\alpha_c = 25$, $\text{Вт/м}^2\cdot\text{К}$.

Графічне зображення температурно-часової залежності температурного режиму зовнішньої пожежі показано на рис. 1.11.

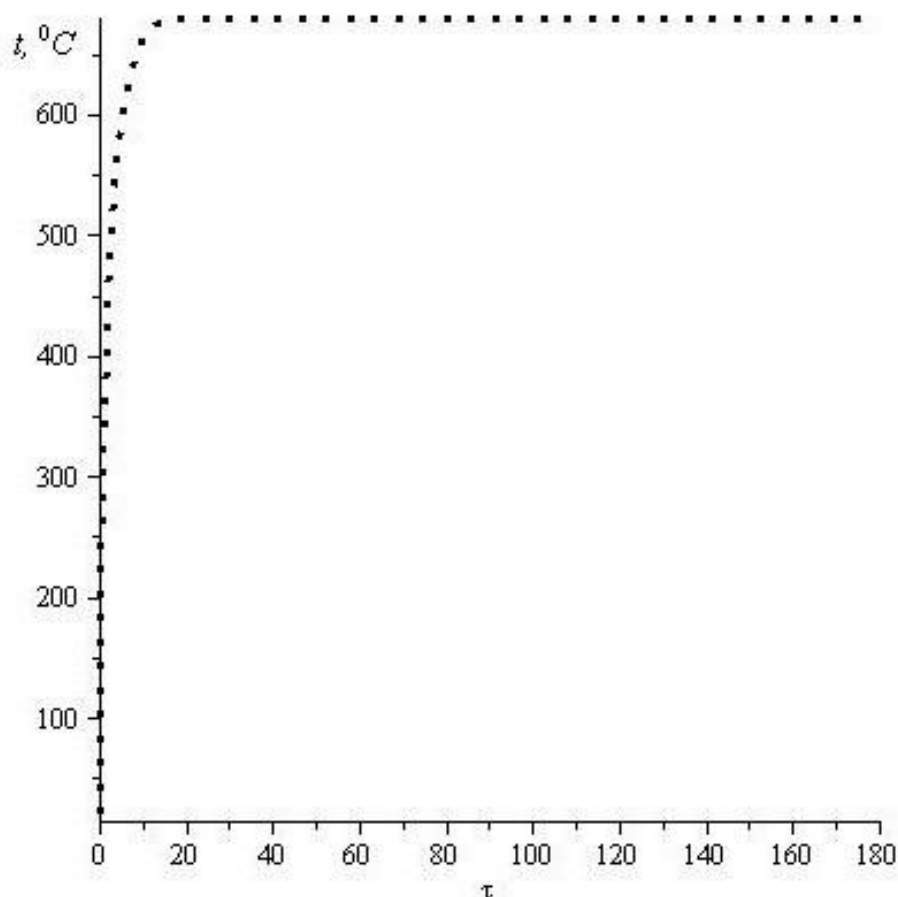


Рис. 1.11. Графік температурного режиму зовнішньої пожежі

Температурний режим вуглеводневої пожежі вважається більш жорстким режимом, ніж стандартний температурний режим. Цей температурний режим використовується для визначення меж вогнестійкості будівельних конструкцій на об'єктах нафтогазової промисловості, де температура горіння продукту (газу або нафтопродуктів) підвищується з більшою швидкістю і має вищі значення, ніж при горінні інших будівельних і облицювальних матеріалів.

Вуглеводневий режим визначають за формулою:

$$\theta_g = 1080(1 - 0.325e^{-0.167t} - 0.675e^{-2.5t}) + 20[^\circ\text{C}] \quad (1.5)$$

θ_g – температура газового середовища навколо конструкції, $^\circ\text{C}$;

t – час, хв.

Коефіцієнт конвективного теплообміну становить $\alpha_c = 50, \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$.

Графічне зображення температурно-часової залежності стандартного режиму пожежі показано на рис. 1.12.

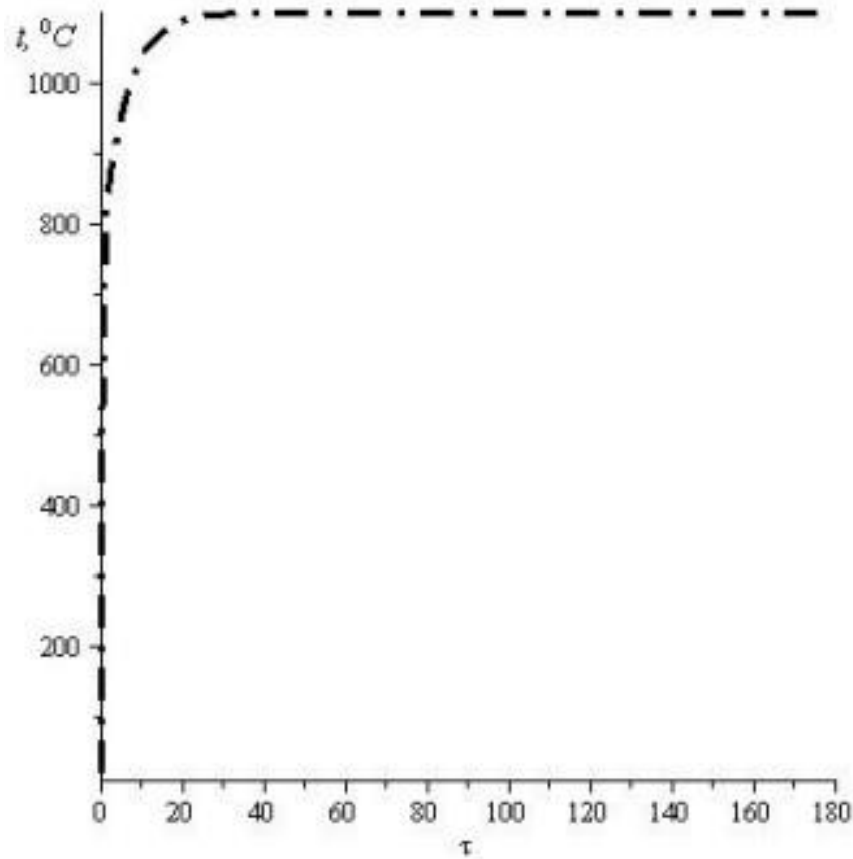


Рис. 1.12. Графік вуглеводневого режиму пожежі

Параметричні температурні умови пожежі - це ще одна група температурних умов, які пов'язані з принципами розгляду реальних сценаріїв пожежі. Параметричні температурні умови відрізняються від номінальних температурних умов врахуванням низки параметрів, які впливають на результати визначення вогнестійкості. До таких параметрів належать: фізичні параметри приміщення (пожежного відсіку), температура навколишнього середовища, час розвитку пожежі, пожежне навантаження (тип, кількість матеріалів та швидкість їх горіння).

Розрізняють параметричні температурні режими для великих і локальних пожеж, які відрізняються рівномірністю розподілу температури в часі (для великих пожеж - рівномірний, для локальних - нерівномірний).

Першим видом параметричного режиму є об'ємний режим, який використовується для пожежних відсіків з максимальною площею до 500 м² і висотою до 4 м. При розрахунку цього режиму обов'язково передбачається, що пожежне навантаження повністю вигоріло. Тепловий режим локальних пожеж на практиці використовується рідко, але є прийнятним. Його основними параметрами є довжина полум'я і висота приміщення, відповідно до яких розглядаються два варіанти розвитку локалізованої пожежі.

Моделі локалізованих пожеж із заданими параметрами найчастіше використовуються для розрахунку теплових впливів на горизонтальні елементи сталевих конструкцій при розрахунку їх вогнестійкості.

Після вибору температурного режиму необхідно вибрати підхід, який залежить від прийнятої розрахункової моделі:

- аналіз окремої конструкції;
- аналіз частини конструктивної системи;
- аналіз всієї конструктивної системи.

Поділ конструктивної системи на підсистеми базується на аналізі можливих температурних розширень і деформацій, щоб їхню взаємодію можна було оцінити за допомогою незалежних від часу граничних умов і схеми підтримки протягом пожежі. Під час проектування частини конструктивної системи важливо враховувати характер вогневого руйнування, властивості матеріалів при підвищених температурах, жорсткість конструкції, а також результати теплового розширення і деформації (непрямий вплив пожежі). Умови на опорах і сили, що діють на межі частини конструктивної системи, можуть залишатися незмінними під час пожежі.

Аналіз всієї конструктивної системи в умовах пожежі повинен включати обґрунтування прийнятої схеми руйнування, властивостей матеріалів в залежності

від температури нагріву, жорсткості конструкції і наслідків теплового розширення і деформації (непрямий вплив вогню).

Розрахунок окремої конструкції є найбільш універсальним методом аналітичної оцінки вогнестійкості. Цей метод розрахунку розглядає кожну конструкцію окремо, враховуючи відповідні впливи та граничні умови на опорах.

У випадку використання спрощеної розрахункової моделі для металевих конструкцій, що піддаються розтягу, стиску, згину та стиску зі згином, розрахункова несуча здатність конструкції з нерівномірно розподіленою температурою по ширині поперечного перерізу приймається спрощено, як конструкцій з рівномірним розподілом температури, що дорівнює максимальній температурі сталі на момент пожежі. Важливим фактором при розрахунку за спрощеною розрахунковою моделлю є тип захисту, який впливає на величину підвищення температури, що є різною для незахищених несучих металевих конструкцій та захищених ізоляційними вогнезахисними матеріалами та тепловими екранами. У спрощеній розрахунковій моделі максимальні значення температури є завищеними, тому щоб забезпечити створення запасу несучої здатності будівельних конструкцій в умовах пожежі.

Використання уточнених методів розрахунку передбачає врахування реалістичних умов при розрахунку конструкцій, що зазнають впливу вогню. Особливістю такої моделі є те, що вона може бути використана при будь-якому режимі нагріву, якщо відомі властивості матеріалів для даної температурної стадії. Методологія такої моделі передбачає розрахунок розвитку та поширення температури в конструкціях (модель температурного відгуку), механічної роботи будівлі або будь-якої її частини (модель механічного відгуку).

В посібнику Українського центру сталевих будівництва (УЦСБ) [17] детально описані спрощені методики розрахунку сталевих конструкцій на вогнестійкість за Єврокодом 3.

Дані методики дозволяють швидко проаналізувати вплив високих температур на конструкцію або елемент конструкції, проте не дають врахувати

важливі аспекти, такі як тепловіддачу та нерівномірних розподіл температури по конструкції.

Хоча по методикам, які описані в вищезазначених нормативних документах неможливо детально проаналізувати поведінку конструктивних систем під час впливу пожежі, проте на їх основі можна побудувати більш точні та універсальні чисельні методики оцінки конструкцій.

Саме тому існує нагальна необхідність в розробці чисельно-аналітичного підходу оцінки вогнезахисту металевих конструкцій. Принцип аналітичного підходу в проектуванні вогнезахисту металевих конструкцій має бути заснованим на сучасних розрахункових методах, які враховують специфіку роботи несучих сталевих елементів при пожежі. Враховуючи вищезазначене, зростає актуальність розробки та удосконалення нових методів розрахунку вогнестійкості сталевих конструкцій з врахуванням вогнезахисту.

1.3.3. Чисельні методи комп'ютерного моделювання

Сучасні розрахункові методи розв'язання статичних і теплотехнічних задач вогнестійкості засновані на чисельному моделюванні параметрів та умов роботи конструкції та вогнезахисту при нагріві. Для обчислення стаціонарних та нестаціонарних процесів теплопровідності та розвитку деформацій, зусиль і напружень в конструкціях використовуються чисельні методи: метод скінченних елементів (МСЕ) та метод скінченних різниць (МСР), особливості яких описані в роботах Городецького О.С., Клованича С.Ф., Зенкевича О.С., Павленко І.В., Перельмутера А.В., Стренга Г., Сегерлінда Л. [18...24].

Засоби МСЕ дозволяють проводити розрахунки статичного та динамічного напружено-деформованого стану конструкцій (в тому числі геометрично та фізично нелінійних задач механіки твердого деформованого тіла), форм і частот коливань, аналізу стійкості конструкцій, нелінійних перехідних процесів, тощо.

Роботи Городецького О.С, призвели до створення вітчизняного програмного комплексу ЛІРА-САПР, який в своїх розрахунках використовує МСЕ. Метод скінченних елементів, який реалізовано в ПК ЛІРА-САПР було використано

для вирішення задач стаціонарної та нестаціонарної теплопровідності такими вченими як Барабаш М.С., Колякова В.М., Фесенко О.А. [25, 26]. Роботи Отроша Ю.А. та Ковальова А.І. призвели до розробки додаткового модуля в ПК ЛІРА-САПР для розрахунку вогнестійкості залізобетонних конструкцій [9, 10], а робота Башинської О.Ю. принесли можливість враховувати термоповзучість бетону [27].

Вітчизняний комплекс ПК ЛІРА-САПР дозволяє вирішувати задачі стаціонарної та нестаціонарної теплопровідності. Задача нестаціонарної теплопровідності вирішується за аналогією до вирішення задачі нелінійної динаміки. Про вирішення задачі теплопровідності в ПК ЛІРА-САПР буде більш детально описано в розділі 2, п. 2.1.

Аналогічні можливості для вирішення задач теплопровідності є і у програмному комплексі ЛІРА 10. Також слід зазначити, що у вітчизняному програмному комплексі SCAD Office реалізовано автоматичний розрахунок сталевих конструкцій на вогнестійкість за спрощеною аналітичною методикою. Перевірка сталевих елементів виконується методом критичної температури. В цьому методі припускається, що при нагріванні від пожежі температура сталі рівномірно розподілена по конструкції та її критичне значення визначається запасом міцності, який має елемент, що розглядається. Вказаний запас міцності характеризується коефіцієнтом використання несучої спроможності конструкції. Програма визначає значення коефіцієнту використання несучої спроможності від комбінації навантажень, які включають в себе лише значення постійних та тривалих навантажень на момент температурного впливу 0. Результатом такого розрахунку є критична температура, час досягнення цієї температури а також графіки зміни температури повітря та температури сталі. Крім того виводиться приведена товщина і власна межа вогнестійкості елемента без врахування вогнезахисту. Розрахунок виконується по одному з чотирьох варіантів нагріву конструкції (режиму пожежі, див. пункт 1.3.2 цього розділу). Крім того при розрахунку підвищення температури сталі береться до уваги нелінійна зміна теплофізичних характеристик сталі.

В світовій практиці також існує велика кількість успішно застосованих систем для моделювання процесів теплопровідності та визначення напружено-деформованого стану конструкцій. Найбільш відомі з цих програмних комплексів це ANSYS, ABAQUS, Midas та інші [28...31].

ANSYS дає можливість моделювати всі основні процеси теплообміну, серед яких теплопровідність в рідкому середовищі та твердих тілах, вільну та вимушену конвекцію а також променевий теплообмін. Отримані результати розрахунку можна передати в ANSYS Mechanical для подальшого аналізу напружено-деформованого стану. Модулі ANSYS дозволяють виконувати розрахунки стаціонарної та нестаціонарної теплопровідності за методом скінченних елементів. В середовищі ANSYS також входить окремий модуль LS-DYNA, які вирішує різноманітні задачі, включаючи задачі теплопровідності, за допомогою методу Лагранжа-Ейлера, методу згладжених частинок, одно- і багатокомпонентний метод Ейлера, безсіточний метод Галеркіна та інші.

Програмний комплекс ABAQUS, а саме його основний компонент ABAQUS/CAE дозволяє вирішувати задачі теплопровідності твердих тіл методом скінченних елементів. За допомогою цього програмного комплексу можливо вирішувати задачі стаціонарної та нестаціонарної теплопровідності в 2D та 3D середовищах.

Midas FEA NX, компонент програмного середовища Midas також успішно використовується для вирішення задач теплопровідності. В даному програмному комплексі окрім вирішення задач стаціонарної та нестаціонарної теплопровідності також є можливість враховувати при міцнісному розрахунку вплив термоповзучості на матеріали елементів.

Вищеописані програмні продукти дозволяють, з деякими похибками та припущеннями, виконувати розрахунок будівельних конструкцій з врахуванням впливу пожежі.

Запропоновані чисельні методи обчислення напруженого стану та критичної температури з використанням програмних комплексів полегшують, пришвидшують та дозволяють більш точно провести оцінку вогнезахисту

конструкції в порівнянні з аналітичними методами. Використання чисельних методів оцінки ступеню вогнестійкості сталевих конструкцій дозволяють врахувати недоліки аналітичних методів. Незважаючи на це чисельні методи потребують обов'язкового підтвердження експериментом.

1.4. Обґрунтування вибору методів оцінки вогнестійкості сталевих конструктивних елементів

Аналіз аналітичних методів оцінки сталевих конструкцій на вогнестійкість, які полягають в спрощених методиках розрахунку за Єврокодом (п. 1.3.2), показав, що розрахунковий метод дає задовільні результати при певних припущеннях, які полягають в наступному:

- конструкція має стержневу форму з постійним перерізом по довжині;
- не враховується тепловіддача;
- не враховується нерівномірна зміна температури по перерізу конструкції;
- вибір вогнезахисного матеріалу заснований на результатах експериментальних досліджень.

Експериментальні методи оцінки вогнестійкості дозволяють отримати реальну вогнестійкість елемента, яка дорівнює або перевищує необхідний час збереження несучої або теплоізолюючої здатності.

Враховуючи вищезазначені фактори автором було прийнято рішення в цій роботі використовувати чисельні методи комп'ютерного моделювання для розробки аналітично-розрахункової методики. Чисельні методи комп'ютерного моделювання, які використані в цьому дослідженні та описані в дисертаційній роботі, базуються на раніше проведених експериментальних дослідженнях. Методики, які розроблені та описані в цій дисертаційній роботі засновані на основних принципах аналітичних методів оцінки вогнестійкості, зазначені в п. 1.3.2 цього розділу. Слід зазначити, що порівняння результатів чисельних досліджень з результатами експериментального дослідження є невід'ємною частиною цієї роботи.

1.5. Висновки до розділу 1.

В результаті аналітичного огляду актуальності проблеми, методів оцінки вогнестійкості та способів вогнезахисту сталевих будівельних конструкцій зроблено наступні висновки:

1. Сталеві несучі конструкції схильні до значного ураження та швидкої втрати несучої здатності внаслідок високих температурних впливів;

2. Традиційні способи проектування вогнезахисту є дієвими проте базуються на експериментальних методах оцінки ступеню вогнестійкості;

3. Сучасні експериментальні методи оцінки ступеню вогнестійкості дозволяють точно оцінити вогнестійкість конструкції, проте мають певні недоліки. Сучасні аналітичні методи оцінки ступеню вогнестійкості дозволяють швидко оцінити вогнестійкість конструкції, проте не враховують суттєві аспекти роботи конструкції під час впливу пожежі. Сучасні чисельні методи оцінки ступеню вогнестійкості дозволяють перекрити недоліки попередніх методів, проте потребують адаптації для вирішення задач цього дослідження та експериментального підтвердження.

4. Сформовано основні задачі дослідження, які полягають в удосконаленні чисельних методів за допомогою адаптації вирішення задачі нестационарної теплопровідності, врахуванні нерівномірного розподілу температури по висоті перерізу, врахуванні нелінійної зміни теплофізичних характеристик матеріалів конструкції та вогнезахисту та створенні методик та алгоритму розрахунку сталевих балок перекриття з реалізацією запропонованих методик у вітчизняному програмному комплексі ЛІРА-САПР.

РОЗДІЛ 2. ОЦІНКА СТУПЕНЮ ВОГНЕСТІЙКОСТІ СТАЛЕВИХ БАЛОК ПЕРЕКРИТТЯ НА ОСНОВІ АДАПТАЦІЇ НЕСТАЦІОНАРНОЇ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ. ЧИСЕЛЬНИЙ ЕКСПЕРИМЕНТ ВПЛИВУ ПОЖЕЖІ НА СТАЛІ БАЛКИ ПЕРЕКРИТТЯ БЕЗ ВОГНЕЗАХИСТУ

2.1. Вирішення задачі теплопровідності методом скінченних елементів для оцінки вогнестійкості сталевих конструкцій

Розглянемо ідею методу скінченних елементів (МСЕ) на прикладі невеликої одновимірної стаціонарної лінійної задачі. Приклад простої одновимірної задачі дозволяє крок за кроком прослідкувати процедуру розв'язання МСЕ за допомогою простих математичних задач.

Розв'язок такої одновимірної задачі можна отримати за допомогою якісного аналітичного рівняння. Більшість інженерних задач неможливо розв'язати аналітично. Більше того, навряд чи розумно вимагати точного розв'язку інженерної задачі, оскільки зазвичай вирішення таких задач неможливо гарантувати.

Для інженерних задач зазвичай використовують наближені методи чисельного аналізу, щоб отримати результати, які є достатньо точними для практичних цілей і в межах точності вхідних даних.

Область визначення функції розбивається на декілька простих областей. Шукана функція в кожній підобласті апроксимується поліномом, так що коефіцієнти апроксимуючого полінома виражаються як значення шуканої функції у скінченній кількості так званих вузлів у підобласті. Підобласті з вибраними вузлами називаються скінченними елементами. Силові взаємодії між скінченними елементами відбуваються тільки у вузлах. Визначення шуканої функції у вузлах скінченно-елементної сітки на практиці є проблемою, яку необхідно вирішити. Проблема визначення вузлових значень зазвичай вирішується шляхом застосування відповідного варіаційного принципу. Апроксимація, що використовується для шуканої функції, зводить задачу знаходження умов стаціонарності відповідної функції до задачі знаходження екстремальних значень багатовимірної функції. Умовами стаціонарності такої функції є система лінійних

алгебраїчних рівнянь для значення шуканої функції у вузлах, яка теоретично є основною системою рівнянь методу скінченних елементів.

При використанні методу скінченних елементів для дослідження напружено-деформованого стану деформованих тіл задачу зазвичай розв'язують у термінах переміщень. У цьому випадку переміщення скінченних елементів апроксимуються функціями, які формують кінематично допустимі поля переміщень по всій області, що цікавить. Переміщення вузлів визначаються відповідно до варіаційного принципу Лагранжа, згідно з яким істинне поле переміщень, тобто поле переміщень, що задовольняє рівнянню рівноваги, визначається з множини всіх кінематично допустимих переміщень.

$$\delta\Pi = 0 \quad (2.1)$$

де Π – повна потенційна енергія пружної системи, що дорівнює комбінації потенційної енергії зовнішніх сил та деформації.

Варіаційне рівняння Лагранжа приводить до системи лінійних алгебраїчних рівнянь для вузлових переміщень, які з фізичної точки зору є рівняннями вузлової рівноваги.

Це також гарантує, що умови рівноваги виконуються лише в певних межах. Справжня рівновага матиме місце лише тоді, коли робота всіх внутрішніх і зовнішніх сил, що діють на можливі переміщення, буде однаковою для всіх змін переміщень. Як відомо, однією з основних ідей методу скінченних елементів є ідея апроксимації неперервної функції переміщення, або в нашому випадку температури, дискретною моделлю, що складається з кусково-неперервних функцій, кожна з яких визначена в скінченному елементі.

Для апроксимації зазвичай використовуються повні або часткові поліноміальні функції різних порядків. Кількість коефіцієнтів полінома, що апроксимує може бути визначено кількістю незалежних параметрів або ступенів свободи скінченного елемента, за якими однозначно інтерполюється шукана функція в елементі.

Порядок полінома, що інтерполюється, не може бути меншим за одиницю. Це означає, що найпростіше наближення шуканих функцій в елементі виконується

лінійним поліномом. Таке наближення називається симплекс-апроксимацією. Скінченні елементи в цьому випадку називаються симплекс-елементами.

Теплопровідність – це процес передачі теплової енергії між частинами тіла, що торкаються одне одного, і мають різні температури. При вирішенні задачі теплопровідності, аналогом вектору можливих переміщень v (у міцнісній задачі) виступають значення температур у вузлах дискретної моделі.

Розглянемо процес теплопровідності в однорідному твердому тілі, що займає тривимірну область Ω . Рівняння крайової задачі теплопровідності для такого тіла в прямокутній декартовій системі координат x, y, z має вигляд [24, 32]:

$$K_{xx} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + K_{yy} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + K_{zz} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + w = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.2)$$

де $T = T(x, y, z, t)$ – поле температур в області Ω ; K_{xx}, K_{yy}, K_{zz} – коефіцієнти теплопровідності в напрямку x, y, z відповідно; $w = w(x, y, z, t)$ – потужність теплогерел всередині тіла; ρ – щільність матеріалу тіла; c – питома теплоємність матеріалу тіла.

Для розв'язання задачі (2.1) мають бути задані початкові і граничні умови. Розрізняють три основні різновиди граничних умов подібної задачі:

1. Граничні умови першого роду – в певній області тіла задана початкову температуру T :

$$T = T(x, y, z, t) \quad (2.3)$$

2. Граничні умови другого роду – в певній області тіла задано тепловий потік q :

$$K_{xx} \frac{\partial T}{\partial x} l_x + K_{yy} \frac{\partial T}{\partial y} l_y + K_{zz} \frac{\partial T}{\partial z} l_z = -q \quad (2.4)$$

де l_x, l_y, l_z – направляючі косинуси зовнішньої нормалі до поверхні, тепловий потік позитивний, якщо тепло відводиться від тіла. Якщо поверхня ізольована, то $q = 0$.

3. Граничні умови третього роду – в певній області тіла відбувається конвективний теплообмін:

$$K_{xx} \frac{\partial T}{\partial x} l_x + K_{yy} \frac{\partial T}{\partial y} l_y + K_{zz} \frac{\partial T}{\partial z} l_z = -h(T_s - T_b) \quad (2.5)$$

де T_s – температура поверхні; T_b – температура зовнішньої середовища; h – коефіцієнт тепловіддачі; $q_h = h(T_s - T_b)$ – щільність теплового потоку, що відводиться від поверхні тіла внаслідок конвекції.

Розв'язання цієї задачі еквівалентне знаходженню мінімуму функціоналу в заданий момент часу. Таким чином, використовуючи варіаційні принципи, область тіла, що досліджується, необхідно розбити на скінченну кількість скінченних елементів і створити скінченну кількість вузлів [20]. Ступенями свободи будуть температури у вузлах схеми. Температури вузлів утворюють вектор невідомих.

Розглянемо детальніше граничні умови задачі теплопровідності. Теплопровідність - це процес передачі тепла між частинками об'єкта або між об'єктами з різною температурою, що перебувають у безпосередньому контакті. Під час теплопровідності температура в тілі відрізняється між сусідніми частинками і є постійною. Миттєві значення температури в усіх точках об'єкта в будь-який момент часу визначаються як температурне поле цього об'єкта.

Температурне поле може бути нестационарним (тим, що змінюється у часі) або стаціонарним (постійним, незмінним), і може мати різні значення температури у трьох, двох або одному просторовому вимірах. Відповідно до цього, температурне поле класифікується як тривимірне, двовимірне або одновимірне. Його можна зображувати за допомогою ізотермічних поверхонь та ліній, які з'єднують точки тіла з однаковою температурою.

Найбільш різкі зміни в розподілі температури всередині тіла об'єкта відбуваються в напрямку, перпендикулярному до ізотермічної площини: якщо $\Delta t = t_1 - t_2$ – мала зміна температури між ізотермами (або лініями) в цьому напрямку, а Δx – мала відстань між ними, то межа відносної зміни температури Δt на відстані Δx називається градієнтом температури.

Градієнт температури є векторною величиною і визначає ступінь зміни температури на одиницю довжини в напрямку її зростання.

Тепловий потік також є векторною величиною, його напрямок протилежний вектору температурного градієнта і збігається з напрямком тепловіддачі, а абсолютна величина показує інтенсивність тепловіддачі. Простими словами тепловий потік – це теплове навантаження, що діє на тіло (конструкцію).

Тепловий потік, який показує інтенсивність передачі тепла через теплопровідні матеріали, пропорційний градієнту температури відповідно до закону Фур'є. Згідно з цим законом і законом збереження енергії, процес теплопровідності можна математично виразити у вигляді диференціального рівняння, що представляє залежність температури від часу і просторових координат тіла.

Розв'язавши диференціальне рівняння теплопровідності, можна визначити температурне поле і тепловий потік в об'єкті в заданий момент часу і розрахувати кількість тепла, що передається від однієї частини об'єкта до іншої за заданий інтервал часу.

Самим простим прикладом теплопередачі за допомогою явища теплопровідності можна назвати стаціонарний (постійний) процес передачі тепла через плоску однорідну стінку товщиною δ з коефіцієнтом теплопровідності матеріалу λ , яка має постійні значення температури t_1 і t_2 на своїй поверхні.

Конвективна передача тепла відбувається у рідинах або газах і полягає в перенесенні тепла за допомогою рухливих мас рідини або газу.

У загальному розумінні, конвективна теплопередача є процесом передачі тепла між поверхнею твердого тіла, що безпосередньо контактує з рухомою рідиною або газоподібним середовищем. Існують два види конвекції: природна і примусова.

Природна конвекція виникає через наявність різниці температур у середовищі, що викликає зміну щільності цього середовища. Температурна різниця в середовищі може бути зумовлена наявністю джерела, що виділяє тепло в цьому середовищі або поглинає тепло з нього.

У газоподібному середовищі, наприклад повітрі джерелом тепловиділення можуть бути гарячі поверхні опалювальних приладів або електромеханізми, що

через свою роботу виділяють зайве тепло, тоді як процес поглинання тепла з зовнішнього середовища може відбуватися через поверхні огорожувальних конструкцій, які взимку мають нижчу температуру, ніж внутрішнє повітря.

Коли повітря контактує з цими поверхнями, воно нагрівається або охолоджується і рухається вгору або вниз. На зміну йому приходять нові повітряні маси, які, в свою чергу, також нагріваються або охолоджуються. Таким чином повітряні маси циркулюють з однієї частини приміщення в іншу, викликаючи конвективний теплообмін між повітрям, що контактує з внутрішньою поверхнею огорожувальних конструкцій.

Вирішення задачі теплопровідності включає різноманітні види зовнішніх навантажень, серед яких є і теплопередача через випромінювання.

Передача тепла тепловим випромінюванням відбувається від матеріального об'єкта до повітря або безповітряного простору, незалежно від температури цього простору. Цей процес полягає в перетворенні теплової енергії в пограничному шарі об'єкта в променисту енергію, яка поширюється в просторі у вигляді електромагнітних хвиль зі швидкістю світла.

При зіткненні з поверхнею інших тіл частина променевої енергії поглинається тілом і стає тепловою енергією, а інша частина відбивається назад у простір.

Променева енергія, яка відбивається від поверхні тіла, приєднується до вже випромінюваної цим тілом енергії, формуючи разом з нею ефективно випромінювання. Це ефективно випромінювання, у свою чергу, може бути поглинуте або відбите іншими поверхнями тіл.

Тіло, яке має температуру вище абсолютного нуля, безперервно випромінює, поглинає і відбиває променеву енергію, незалежно від температури навколишнього середовища.

Взаємне випромінювання та багаторазове відбиття і поглинання променевої енергії між об'єктами призводить до теплопередачі. Залежно від різниці між випромінюваною та поглинутою променевою енергією об'єкти можуть нагріватися

або охолоджуватися. Якщо випромінювана і поглинута променева енергія рівні, об'єкт перебуває в тепловій рівновазі і його температура лишається стабільною.

Відповідно до закону Стефана-Больцмана, кількість тепла, що випромінюється з одиниці поверхні об'єкта за одиницю часу, пропорційна четвертому степеню абсолютної температури.

Вирішення задачі нестационарної теплопровідності в цьому розділі дослідження було виконано в програмному комплексі ЛІРА-САПР. Для розрахунку використовувалися наступні скінченні елементи (рис. 2.1):

- трьохвузловий СЕ №1508 теплопровідності;
- чотирьохвузловий СЕ №1509 теплопровідності;
- двохвузловий СЕ №1555 конвективного теплообміну.

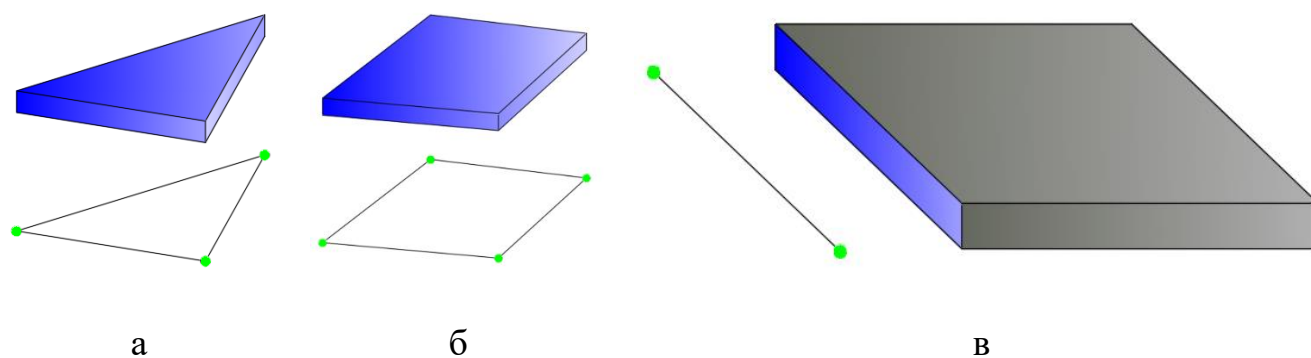


Рис. 2.1. Типи скінченних елементів: а – СЕ №1508; б – СЕ №1509; в – СЕ №1555

Також для вирішення задач дослідження було використано наступні різновиди теплового навантаження (рис. 2.2):

- задана температура у вузлі;
- нестационарний тепловий потік на ребро пластини;
- конвективний теплообмін.

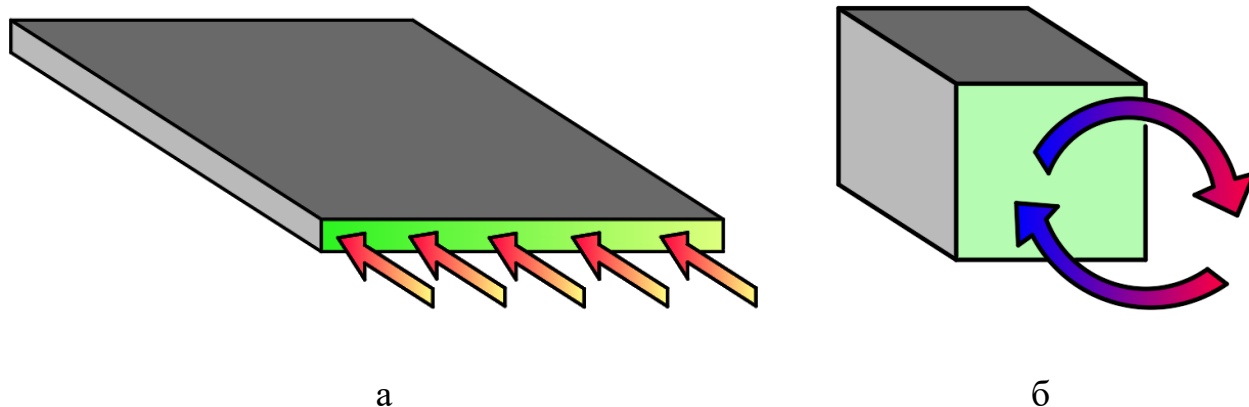


Рис. 2.2. Види теплового навантаження: а – тепловий потік на ребро пластини; б – конвективний теплообмін

Для вирішення рівняння (2.1) тверде тіло, що розглядається - розбивається на скінченні елементи, в яких ступенями вільності є температура у вузлах. При цьому температуру всередині кожного елемента апроксимують лінійними поліномами.

Наведемо приклад деяких апроксимуючих поліномів скінченних елементів теплопровідності:

- трьохвузловий плоский СЕ:

$$T(x, y) = a_1 + a_2x + a_3y \quad (2.6)$$

- чотирьохвузловий ізопараметричний плоский СЕ:

$$T(x, y) = a_1 + a_2x + a_3y + a_4xy \quad (2.7)$$

Оскільки для апроксимації функції температури дискретної моделі використовуються лінійні поліноми, то скінченні елементи теплопровідності називають також симплекс-елементами [9].

Підставивши у відповідні поліноми величини вузлових температур та координати вузлів, можна отримати вирази для коефіцієнтів a_1, a_2, a_3, a_4 . Якщо повернути ці коефіцієнти до рівнянь 2.5 та 2.6, можливо отримати вираз:

$$[T(x, y, z)] = [N(x, y, z)]_e \{T\}_e \quad (2.8)$$

де $[N(x, y, z)]_e$ – матриця функцій форм.

Введемо в розгляд матрицю коефіцієнтів теплопровідності:

$$K \begin{pmatrix} K_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & K_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & K_{zz} \end{pmatrix} \quad (2.9)$$

та матрицю-стовпець градієнтів температур, яка є аналогом матриці напружень:

$$gradT = \begin{bmatrix} \frac{\partial T}{\partial x} \\ \frac{\partial T}{\partial y} \\ \frac{\partial T}{\partial z} \end{bmatrix} = DT \quad (2.10)$$

Тоді внесок кожного окремого скінченного елемента у розв'язання задач нестационарної теплопровідності можливо записати у вигляді матричного диференціального співвідношення:

$$\{Q\}_e = [C]_e \frac{\delta}{\delta t} \{T\}_e + [K]_e \{T\}_e - \{Q\}_e^q - \{Q\}_e^s - \{Q\}_e^h \quad (2.11)$$

де $[K]_e$ – матриця теплопровідності елемента (аналог матриці жорсткості).

Матриця жорсткості елементів теплопровідності записується у вигляді:

$$[K]_e = \int [B]^T [D] [B] dV + \int h [N]^T [N] dS \quad (2.12)$$

B – матриця градієнтів, яка для трикутного (трьохвузлового) СЕ можна записати, як:

$$B = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_i & N_j & N_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_i & B_j & B_k \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Для чотирикутного (чотирьохвузлового) СЕ матриця градієнтів має наступний вигляд:

$$B = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} N_a & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} N_a \\ \frac{\partial}{\partial y} N_a & \frac{\partial}{\partial x} N_a \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

У випадку виведення скінчених елементів з чотирма вузлами, необхідно здійснити перехід від декартової до ізопараметричної системи координат (локальної системи координат). Ці перетворення аналогічні тим, які використовуються для перетворення одновимірного елемента в L-координати, і потрібні для встановлення зв'язку між похідними функцій форм за глобальними координатами та похідними тими ж функціями за локальними координатами [33].

Перетворення локальних похідних в глобальні відбувається за допомогою співвідношення:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} N_a \\ \frac{\partial}{\partial y} N_a \end{bmatrix} = J^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial \xi} N_a \\ \frac{\partial}{\partial \eta} N_a \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

де J – матриця Якобі,

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial \xi} x & \frac{\partial}{\partial \xi} y \\ \frac{\partial}{\partial \eta} x & \frac{\partial}{\partial \eta} y \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Також для вирішення задачі нестационарної теплопровідності необхідно враховувати матрицю теплоємності (аналог матриці демпфування) $[C]_e$, яка має наступний вигляд

$$[C]_e = \int \rho c [N]^T [N] dV \quad (2.17)$$

$\{Q\}_e^q, \{Q\}_e^g, \{Q\}_e^h$ – вектори вузлових теплових потоків.

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

$$I(u) = \Pi(u) + W(u) \quad (2.18)$$

де $\Pi(u)$ – потенційна енергія розподілу температури;

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

$$W(u) = \int_{\Omega} f u d\Omega \quad (2.19)$$

де f – вектор зовнішніх впливів;

u – вектор розподілу температури.

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

Необхідною умовою рівноваги будь-якої термодинамічної системи є існування екстремумів функціонала повної потенціальної енергії $I(u)$, і тому основною задачею класичного варіаційного інтегрування є знаходження екстремумів функціонала.

Для розв'язання подібних задач у контексті термодинамічних систем буде використано варіаційний принцип, що розглядається в методах механіки. Згідно з принципом Лагранжа, мінімальною умовою для функціоналу є принцип можливих переміщень. Згідно з цим принципом, у системі, що перебуває в рівновазі, сума робіт зовнішніх сил і робіт внутрішніх сил на можливі зміни відповідних переміщень дорівнює нулю:

$$a(u, v) + l(v) = 0 \quad (2.20)$$

де $l(v)$ – можлива робота зовнішніх сил;

$a(u, v)$ – можлива робота внутрішніх сил;

v – вектор можливих переміщень.

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

Відповідно до методу скінченних елементів, система дискретизується для того, щоб описати розподіл температури всередині системи, яка нас цікавить. Відповідно до методу скінченних елементів, система дискретизується для того, щоб описати розподіл температури всередині системи, яка нас цікавить. Це

дозволяє виразити можливу роботу зовнішніх і внутрішніх сил у вигляді суми окремих компонентів (скінченних елементів). Вузлова невідома t – це шукане значення температури у вузлах скінченного елемента u . В отриману дискретну модель також вводиться система неперервних функцій $\phi(x)$. Тоді вектор невідомих температур можна записати у вигляді

$$u = t \cdot \phi(x) \quad (2.21)$$

Якщо ввести позначення:

$$k_{i,j} = \int_{\Omega} (B\phi)^T DB\phi d\Omega \quad (2.22)$$

$$P_i = - \int_{\Omega} \phi^T f d\Omega \quad (2.23)$$

де $k_{i,j}$ – елементи матриці теплопровідності $[K]$;

p_i – елементи вектору зовнішніх впливів $\{P\}$.

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

$$[K]\{t\} - \{P\} = 0 \quad (2.24)$$

У реальному житті усі матеріали мають нелінійну залежність коефіцієнту тепло-провідності, коефіцієнту теплоємності та конвекційного теплообміну від температури. Тому у нелінійних задачах характеристики матеріалів, що визначаються матрицею $[D]$ (аналог матриці пружності у задачах механіки) являються функціями компонентів вузлових температур:

$$[D] = [D(\{t\})] \quad (2.25)$$

В такому випадку, рівняння рівноваги набирає вигляду:

$$[K(\{T\})] \cdot \{t\} - \{P\} = 0 \quad (2.25)$$

Для вирішення подібних нелінійних рівнянь у програмному комплексі ЛІРА-САПР використовують метод Ньютона-Рафсона, який зображено на рисунку 2.3.

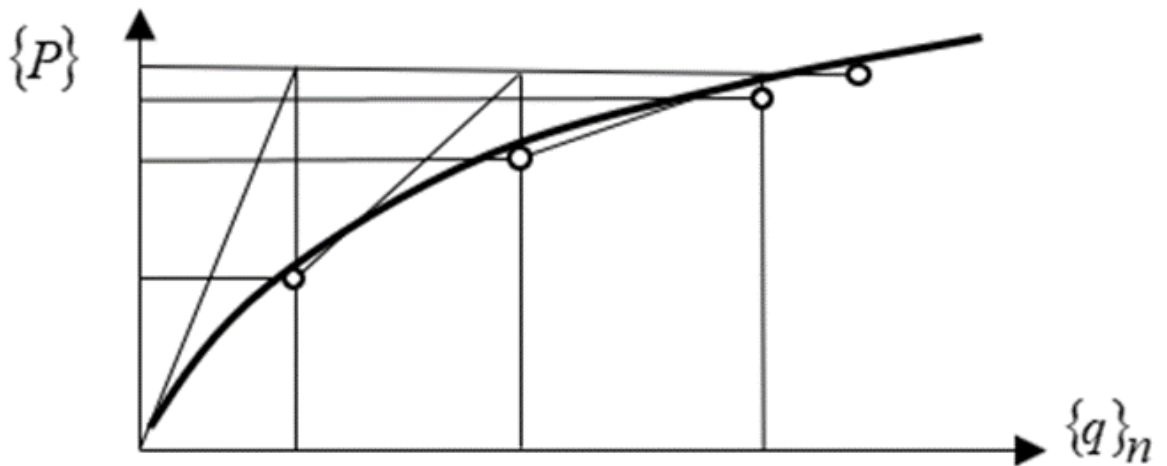


Рис. 2.3. Метод Ньютона-Рафсона для вирішення нелінійних задач

Іншими словами, щоб розв'язати задачу за допомогою методу скінченних елементів, розв'язується система алгебраїчних рівнянь. У лінійних задачах створюються лінійні системи рівнянь. Кількість таких систем лінійних рівнянь може досягати тисяч, тому вибір методу організації розв'язання лінійних систем рівнянь методом скінченних елементів є дуже важливим для ефективності практичних розрахунків будівельних конструкцій [34, 35, 36].

Матриці розглянутої системи лінійних рівнянь характеризуються симетрією, регулярністю та розрідженістю. Високий порядок і розрідженість матриць у системах скінченно-елементних рівнянь ускладнюють ефективне використання стандартних методів розв'язування повних матриць [24, 37].

Розвиток методу скінченних елементів спричинив появу та вдосконалення нових класичних методів розв'язування лінійних алгебраїчних задач з урахуванням процедури дискретизації методу скінченних елементів. Основною тенденцією розвитку методів розв'язування великих лінійних рівнянь з розрідженими матрицями є використання властивості розрідженого заповнення для зменшення кількості арифметичних операцій і часу, необхідного для обміну даними між різними типами пам'яті комп'ютера.

Проблема організації зберігання даних у пам'яті тісно пов'язана зі зменшенням часу обміну даними. У літературі існує низка різних пропозицій щодо вирішення цієї проблеми [38. .42]. Організація зберігання даних та стратегії

програмування залежать, головним чином, від вибору методу розв'язування одночасних рівнянь.

Аналіз прямих та ітераційних методів розв'язання одночасних лінійних рівнянь у методах скінченних елементів показує, що вони демонструють різні можливості та потенційні властивості у великих скінченно-елементних структурах.

Перевага прямих методів полягає в тому, що кількість операцій, необхідних для отримання розв'язку, завжди скінченна і може бути оцінена. Однак їхнім недоліком є те, що вони обмежують використання розрідженості матриці. Цей недолік особливо помітний при аналізі тривимірних векторних полів.

Ітераційні методи можуть бути використані для повного використання розрідженості та щільності матриць. Це пов'язано з тим, що ітераційний алгоритм не генерує нових ненульових елементів і зберігає структуру матриці. Однією з головних переваг ітераційних методів, що використовуються спільно з методами скінченних елементів, є те, що алгоритм розв'язання можна побудувати так, щоб уникнути формування глобальної матриці системи скінченно-елементних рівнянь [43]. Ця обставина дуже важлива при використанні скінченних елементів з великими ступенями свободи і є однією з причин появи градієнтних методів в скінченно-елементному аналізі. До недоліків ітераційних методів можна віднести низьку збіжність і повільність для задач з низькими дозами [44, 45].

Існує багато можливих причин того, що матричне представлення одночасних рівнянь в методі скінченних елементів в тій чи іншій мірі не спрацьовує. Однією з таких причин є велика різниця в жорсткості елементів конструкцій в неоднорідних структурах. Іншим недоліком ітераційних методів є те, що великі задачі вимагають великих обсягів доступу до периферійної пам'яті комп'ютера.

2.2. Моделювання і розрахунок сталеві балки перекриття на вогнестійкість

2.2.1. Створення моделі та задання початкових даних для розрахунку нестационарної теплопровідності

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

Спираючись на теоретично-аналітичні відомості, описані в розділі 1 та пункті 2.1 цього розділу, можна сформулювати чітку задачу чисельного дослідження: розробити і запропонувати чисельну методику оцінки вогнестійкості сталевих конструкцій на прикладі сталеві балки перекриття. Запропонована методика має спиратися на аналітичні основи, зазначені в чинних нормативних документах, а саме ДСТУ EN [6, 46, 47].

За дослідну конструкцію було прийнято шарнірно оперту балку двотаврового перерізу №35Б1 за ГОСТ 26020-83 [48]. Довжина балки становить 6м. На балку зверху спирається залізобетонна плита перекриття товщиною 120мм.

Для виконання теплотехнічного розрахунку було створено плоску пластинчасту скінченно-елементну модель поперечного перерізу сталеві балки та залізобетонної плити, що на неї спирається [49]. В даному випадку залізобетонна плита перекриття моделюється моделюванні тепловіддачі від балки до плити при виконанні теплотехнічного розрахунку. Схема поперечного перерізу конструкції перекриття показана на рисунку 2.4.

Теплотехнічний розрахунок нестационарної теплопровідності Було вирішено виконувати в плоскій моделі. Спосіб моделювання для вирішення задачі нестационарної теплопровідності за допомогою плоскої моделі поперечного перерізу балки простіше та швидше, ніж моделювання повноцінної просторової моделі, а похибка результатів складає менше 3% (див. розділ 3, п.3.2.1). Також важливим фактором є те, що при трьохсторонньому обігріві поверхні балки знизу при експериментальному дослідженні зміна температури по довжині балки є не такою значною, ніж зміна температури по висоті поперечного перерізу балки. Тому

було вирішено прийняти наступне спрощення: для вирішення задач дослідження тут і надалі будуть представлені плоскі моделі поперечних перерізів балок.

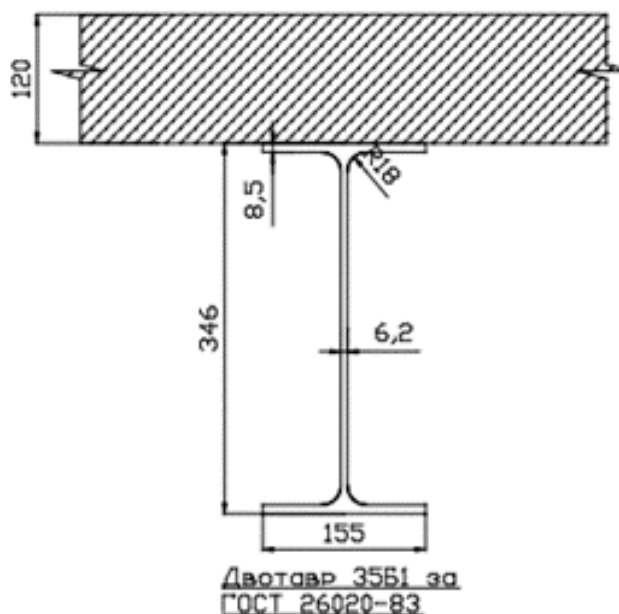


Рис. 2.4. Схема перерізу балки, що досліджується

Скінчено-елементну модель конструкції було створено в програмному комплексі ЛІРА-САПР. Модель складається з 11840 вузлів та 35166 елементів: 3-х вузловий СЕ№1508 4-х вузловий СЕ №1509 теплопровідності та 2-х вузловий СЕ№1555 конвективного теплообміну. Переважна кількість елементів теплопровідності – 4-х вузловий СЕ №1509. Це обумовлено тим, що 4-х вузлові СЕ в розрахунках за методом скінченних елементів дають більшу точність, ніж 3-х вузлові СЕ [50]. Крок триангуляції становить 2.5 мм. Така густа сітка триангуляції дозволить детально проаналізувати тепловий розподіл температурних полів по моделі. МСЕ модель поперечного перерізу конструкції показано на рис. 2.5.

Для виконання теплотехнічного розрахунку було прийнято наступні лінійні теплофізичні властивості матеріалів:

- для сталі: питома вага сталі (ρ_s) – 76490 Н/м³, коефіцієнт теплопровідності (K_s) – 53 Вт/м*К, питома теплоємність (C_s) – 440 Дж/кг*К;

- для бетону: питома вага бетону (ρ_c) – 22550 Н/м³, коефіцієнт теплопровідності (K_c) – 1.6 Вт/м*К, питома теплоємність (C_c) – 900 Дж/кг*К.

Коефіцієнт конвективного теплообміну було прийнято (α) 25 Вт/(м²*с).

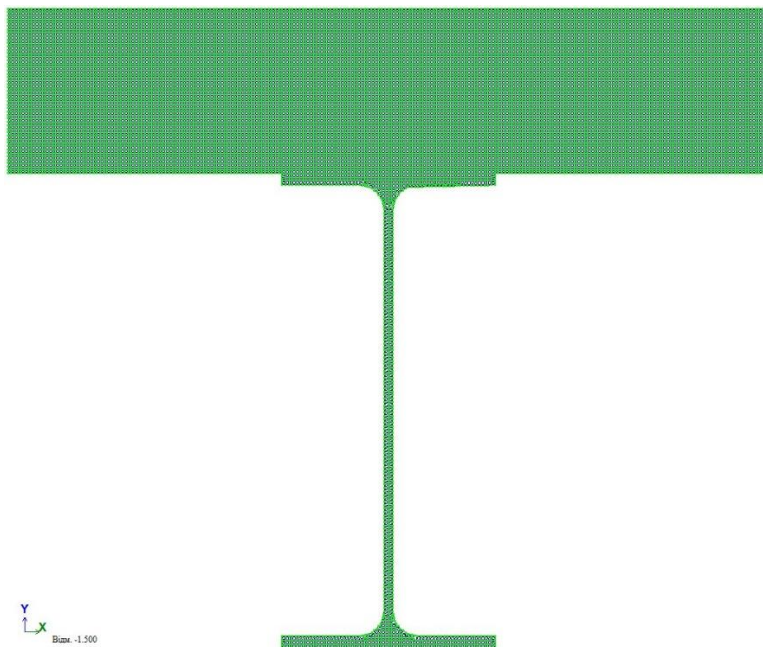


Рис. 2.5. МСЕ модель балки, що досліджується

Гранична умова першого роду (формула 2.3), тобто початкова температура по всім точкам конструкції і навколишнього середовища, дорівнює 20°C і була задана як навантаження у вузли.

Гранична умова другого роду (формула 2.4), тобто теплове навантаження на поперечний переріз конструкції було задано на скінченні елементи, які знаходяться на грані поперечного перерізу в місцях температурного впливу по периметру (з трьох сторін перерізу). Величина навантаження від теплового потоку дорівнює 1 Дж/(с*м).

Гранична умова третього роду (формула 2.5), тобто конвективний теплообмін на частині тіла дозволяє змоделювати процес передачі тепла від навколишнього середовища до скінченного елемента поперечного перерізу конструкції сталевий балки та плити перекриття, і навпаки. Задана температура на скінченні елементи конвекції дорівнює 1°C.

Величини теплового навантаження та заданої температури конвекції були задані по 1 через те, що при розрахунку нестационарної теплопровідності програма керується тими самими принципами, що і при розрахунку будівель на динамічний вплив прямим динамічним методом. Тобто в кожен задану одиницю часу теплове навантаження та задана температура в елементі конвекції буде множитися на значення температури в цю одиницю часу, коефіцієнт випромінювання, поглинання та коефіцієнт конвекції.

В цьому чисельному експерименті час інтегрування, тобто час пожежі, було задано 3600 секунд (60 хвилин). Крок інтегрування, тобто відмітки часу, на яких теплове навантаження та задана температура конвекції множитья на значення температури – 60 секунд (рисунок 2.5). Значення температури в кожен одиницю часу задано згідно з графіком стандартного температурного режиму (рисунок 2.6).

Динаміка у часі

Виконувати розрахунок зміни температури в часі

Номери завантажень:

- з динамічними навантаженнями: 3
- з вагами мас: 2
- з демпфуючими характеристиками: 4

Параметри інтегрування

- Крок інтегрування: 60 c
- Час інтегрування: 3600 c
- Кількість дроблень кроку: 60

Коефіцієнти інтегрування

- Автоматичний вибір: Beta 0.5, Alpha 0.25

Для нелінійних ітераційних елементів

- Мінімальна кількість ітерацій: 50
- Точність ітерацій: 1 %
- Ітераційний метод: Автоматичний вибір

Результати розрахунку

- Тільки переміщення
- Переміщення, зусилля та РСЗ
- Переміщення та зусилля
- Реакції

Стан перерізу на кроках інтегрування

- Не виводити

Параметри розрахунків при конструюванні

- Коефіцієнт відповідальності: 1
- Формувати групи РСЗ для передісторії
- Середній коеф. надійності за навантаженням: 1.15
- Середня частка тривалості: 1
- Група РСЗ для динамічного завантаження: B1
- Враховувати динамічне завантаження для II ГС
- Середній коеф. надійності за навантаженням: 1

Динаміка у часі із статичних завантажень

Зведена таблиця:

№ дин....	№ стат...
3	5
3	6

Стат.завантаження № зава: 6

Динам.завантаження № зава: 3

Закон перетворювання

- 1-Ламана з довільним кроком
- 2-Синусоїдальний
- 4-Ламана з рівн. кроком
- 15-Теплове випромінювання

Параметри закону

Початкові параметри

- Кіл-ть точок: 10
- Коеф. поглинання: 0.75
- Коеф. випромінювання: 1
- Кутівий коеф.: 1

t (i) [c]	T (i) [°C]
0	20
300	576
600	679
900	738
1200	781
1500	810
1800	841
2400	885
3000	915

Рис. 2.6. Параметри розрахунку нестационарної теплопровідності

2.2.2. Аналіз результатів розрахунку нестационарної теплопровідності

Після виконання скінчено-елементного теплотехнічного розрахунку нестационарної теплопровідності отримуємо результати розподілення температурних полів по поперечному перерізу конструкції сталевий балки та плити перекриття на різних часових відмітках (від 0 до 60 хвилин, як задано в початкових даних задачі). На рисунку 2.6 зображено результати теплотехнічного розрахунку в ПК ЛІРА-САПР на часових відмітках 15, 30 та 60 хвилин.

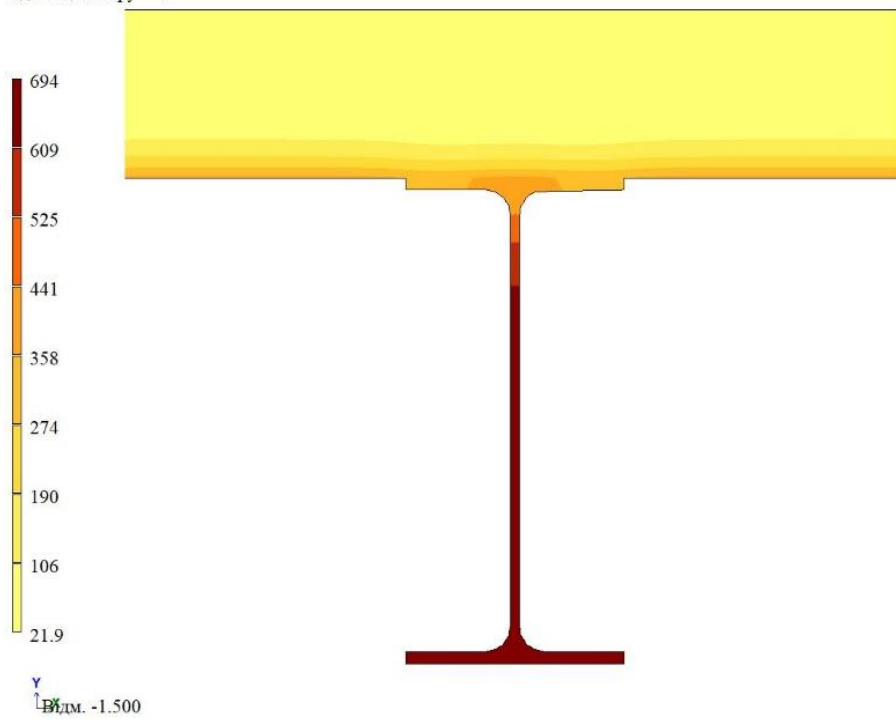
Аналізуючи результати теплотехнічного розрахунку у вигляді розподілення температурних полів по поперечному перерізу конструкції, виконаного за допомогою методу скінчених елементів можна зробити декілька висновків:

1. Вже на 15-й хвилині температура в сталевому двотаврі без вогнезахисних матеріалів досягає 694°C . Цей факт знову підтверджує необхідність у застосуванні вогнезахисних матеріалів для підвищення межі вогнестійкості сталевих конструкцій.

2. Залізобетонна плита перекриття, що спирається на сталеву балку, забирає на себе значну кількість тепла, що призводить до нерівномірного розподілу температури по висоті перерізу сталевий балки. Це обумовлено низькими показниками теплопровідності та високими показниками теплоємності бетону. Нерівномірний розподіл температури по висоті поперечного перерізу призводить до нерівномірної зміни міцнісних характеристик перерізу та пружно-деформаційних характеристик матеріалу. Цей аспект буде частково враховано в пункті 4.1 четвертого розділу.

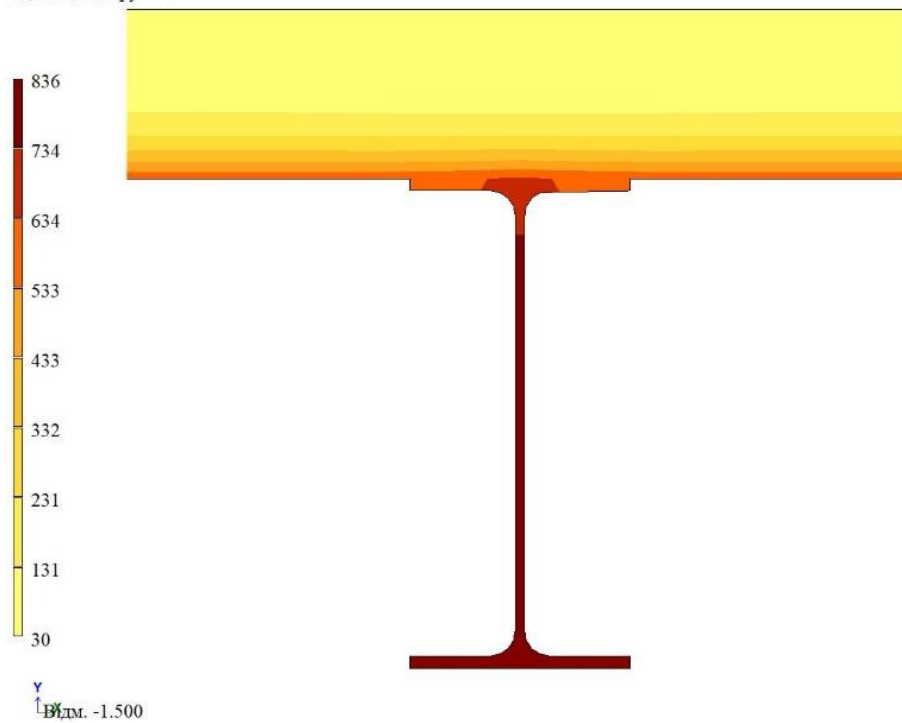
Дана методика теплотехнічного розрахунку не враховує нелінійну зміну теплофізичних властивостей матеріалів конструкції. Фізична нелінійність матеріалів конструкції та вогнезахисних облицювань в контексті теплотехнічного розрахунку буде врахована та описана в пункті 3.1 третього розділу.

Зміни t° в часі 15 (900.000 сек)
Ізополя температур
Одиниці виміру - $^\circ\text{C}$

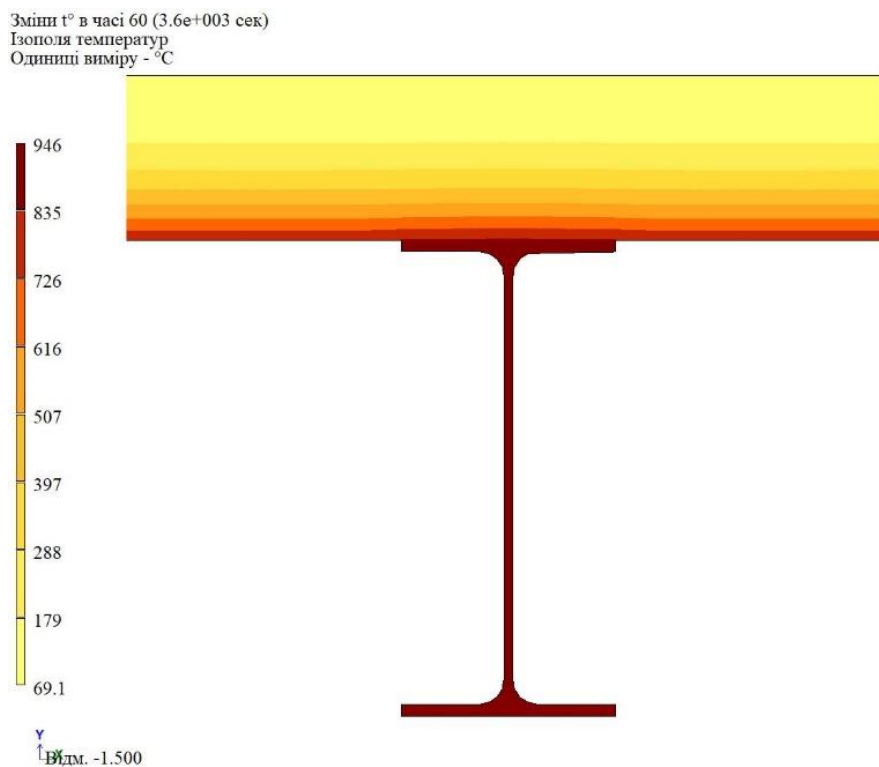


а

Зміни t° в часі 30 (1.8e+003 сек)
Ізополя температур
Одиниці виміру - $^\circ\text{C}$



б



В

Рис. 2.6. Розподілення температурних полів в перерізі плити перекриття та балки: а – на 15-й хвилині впливу; б – на 30-й хвилині впливу; в – на 60-й хвилині впливу

2.2.3. Порівняння результатів чисельного експерименту проведеного в ПК ЛІРА-САПР та ANSYS FLUENT

Чисельний експеримент, описаний в цьому розділі, було проведено з вихідних даних, наведених в додатку П ДСТУ-Н Б В.2.6-211:2016 [47]. В цьому нормативному документі описано чисельний експеримент, який був взятий за основу експерименту, описаного в п. 2.2.1 цього розділу.

Для розрахунків розподілу температурних полів в поперечному перерізі сталевій балки під час 60-хвилинного впливу вогню за стандартним режимом використовувалася чисельна скінченно-елементна модель конструкції для вирішення задачі нестационарної теплопровідності. Ця модель враховує теплообмін радіацією та конвекцією від газового середовища до обігрівних поверхонь балки та плити перекриття, а також конвекційний теплообмін у цих

конструкціях. Крім того, враховується радіаційно- конвекційний теплообмін від плити перекриття до навколишнього середовища з боку її поверхні, яка не піддана обігріву.

Для аналізу нерівномірних розподілів температури в поперечному перерізі сталевий балки використовувалася комп'ютерна програма ANSYS FLUENT. Розрахункова сітка моделі включала приблизно 40 тисяч розрахункових елементів.

Розрахункові розподіли температурних полів в поперечному перерізі конструкції сталевий балки та плити перекриття на 60-й хвилині температурного впливу, отримані в ANSYS FLUENT [47] показані на рис. 2.7.

В свою чергу на рисунку 2.8 зображено графік зміни середньої температури по перерізу сталевий балки перекриття в часі від 0 до 60 хвилин впливу пожежі за результати теплотехнічного розрахунку, виконаного в ПК ЛІРА-САПР та ANSYS FLUENT. Розподіл температурних полів практично ідентичний, а найбільша похибка в результатах склала приблизно 3%.

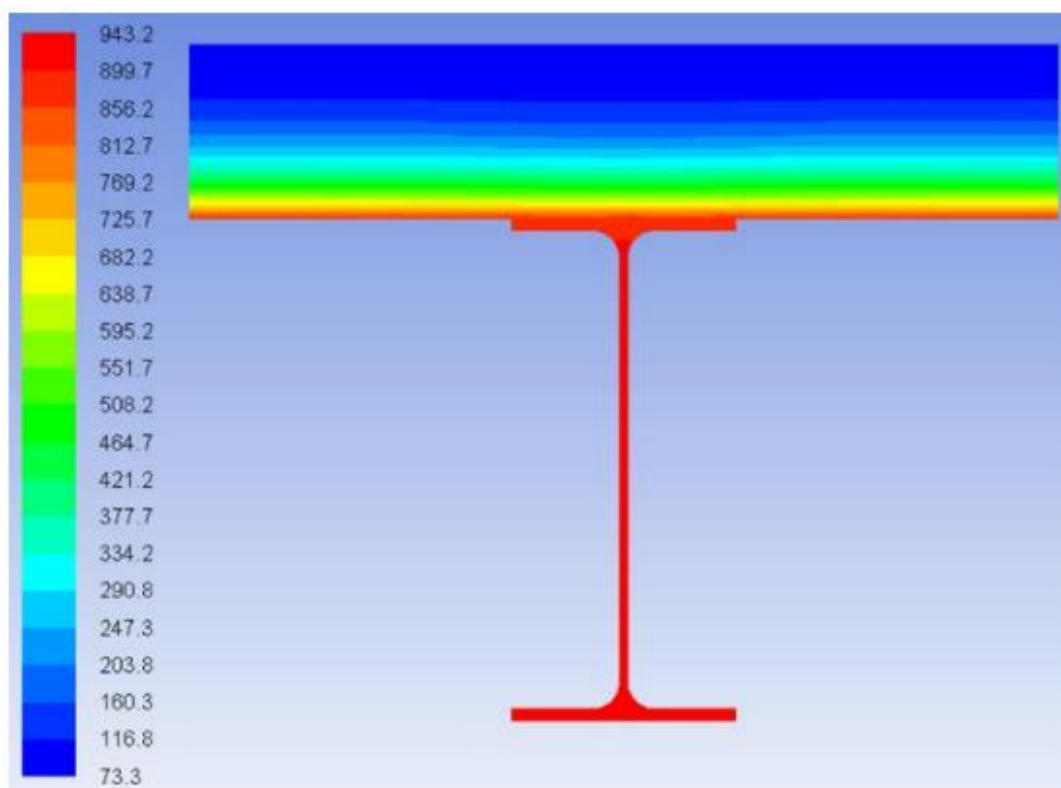


Рис. 2.7. Розподілення температурних полів в перерізі плити перекриття та балки на 60-й хвилині впливу

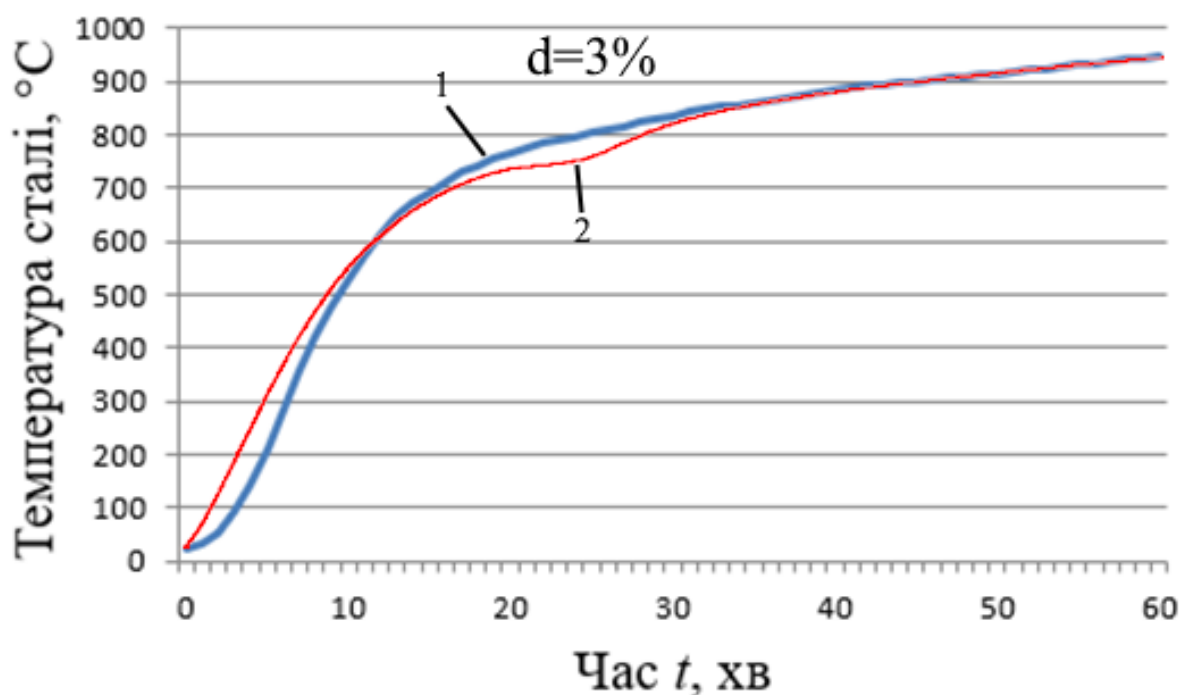


Рис. 2.8. Графік зміни середньої температури в перерізі балки перекриття в часі: 1 – ПК ЛІРА-САПР; 2 – ANSYS FLUENT [47]

Отже за вище наведеними даними можна зробити висновок, що вітчизняний продукт ПК ЛІРА-САПР дозволяє виконувати інженерні задачі з виконання теплотехнічних розрахунків конструкцій на рівні з закордонними аналогами.

2.3. Оцінка пружно-деформаційних властивостей сталеві балки в умовах високих температур.

Основними пружно-деформаційними характеристиками сталі, які відповідають за міцність та стійкість конструкції в нормальних умовах та при нагріві є границя текучості σ_y та модуль пружності E сталі. Дані параметри визначаються з діаграм розтягу сталі $\sigma - \epsilon$ при нормальних та підвищених температурах на спеціальних зразках сталі за допомогою спеціальних печей та розривних машин.

При нормальній температурі втрата несучої спроможності сталевих стержней відбувається в результаті збільшення навантаження до його критичного значення P_{cr} . В умовах нагрівання втрата несучої спроможності конструкції

відбувається при постійному незмінному навантаженні. Підвищення температури стержнів до певного значення (критична температура t_{cr}) призводить до зміниосновних механічних характеристик металу (модуля пружності E та границі текучості σ_y), що є причиною, що викликає нові стани стиснутого стержня, в результаті яких робоче навантаження через певний проміжок часу стає для нього критичним. Тому виникає необхідність у встановленні, при яких умовах і яким чином кожна із зазначених характеристик впливає на втрату несучої спроможності стержнів, що мають різні конструктивні показники.

При дії постійних за величиною зусиль при високотемпературному нагріванні в навантажених елементах виникає безперервно зростаюча у часі деформація металу – деформація температурної повзучості. Деформацію повзучості, яка виникає в металевих конструкціях при пожежах протягом декількох годин або хвилин називають короткотривалою, на відміну від довготривалої повзучості, яка відбувається протягом кількох місяців або років.

Короткочасна повзучість при пожежі в сталевих елементах конструкції відбувається при постійному навантаженні, але швидкість нагрівання може змінюватися в залежності від інтенсивності пожежі, а також від типу або товщини вогнезахисного матеріалу. При розрахунку на вогнестійкість сталевих конструкцій необхідно мати дані про розвиток деформацій повзучості сталі, проте в цьому дисертаційному дослідженні дане питання не піднімається, оскільки розвиток теорії повзучості для сталі потребує підтвердження низкою експериментів, що є окремою темою для дослідження і не входить в задачі цього дослідження. По цій причині фізично-нелінійна зміна матеріалів сталі в цьому дослідженні не розглядається а зниження пружно-деформаційних властивостей сталі відбувається лінійно.

В чинному нормативному документі ДСТУ-Н Б EN 1993-1-2:2010 [16] описано вказівки, щодо пониження пружно-деформаційних властивостей сталі за підвищених температур.

Для швидкостей нагрівання від 2 до 50 К на хвилину пружно-деформаційних властивості сталі за підвищених температур визначають з діаграми «напруження-деформації», що наведено на рисунку 2.9.

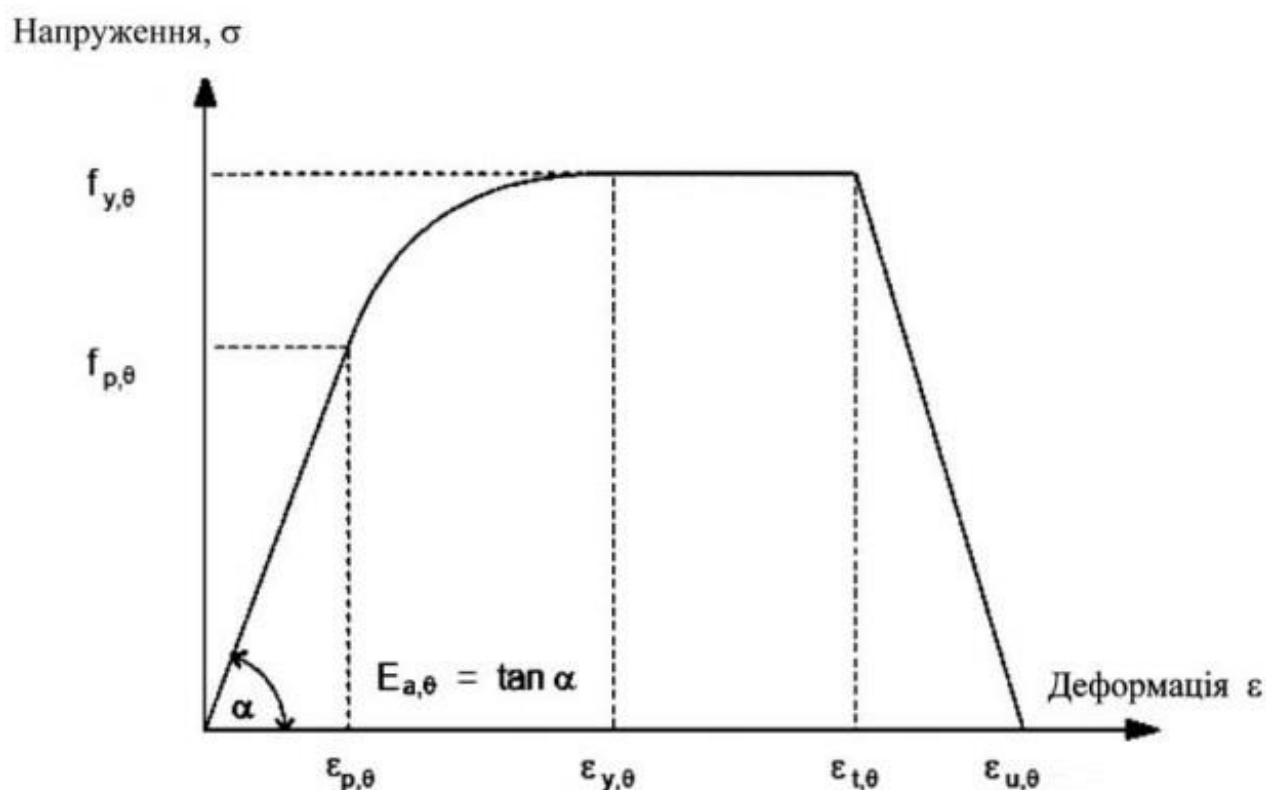


Рис. 2.9. Діаграма «напруження-деформація» для вуглецевої сталі за підвищеної температури: $f_{y,\theta}$ – розрахункова границя текучості; $f_{p,\theta}$ – границя пропорційності; $E_{a,\theta}$ – нахил лінійної пружної ділянки; $\epsilon_{p,\theta}$ – деформація на границі пропорційності; $\epsilon_{y,\theta}$ – гранична деформація на границі текучості; $\epsilon_{u,\theta}$ – критична деформація

В свою чергу в таблиці 2.1 наведено коефіцієнти зниження для діаграми «напруження-деформації» сталі за підвищеної температури. Ці коефіцієнти зниження визначають наступним чином:

- Розрахункова границя текучості відносно границі текучості за температури 20°C:

$$k_{y,\theta} = f_{y,\theta} / f_y \quad (2.26)$$

- Границя пропорційності відносно границі текучості за температури 20°C:

$$k_{p,\theta} = f_{p,\theta} / f_y \quad (2.27)$$

- Нахил лінійної пружної ділянки відносно нахилу за температури 20°C:

$$k_{E,\theta} = E_{a,\theta} / E_a \quad (2.28)$$

Зміна коефіцієнтів зниження залежно від температури зображено графічно на рисунку 2.10.

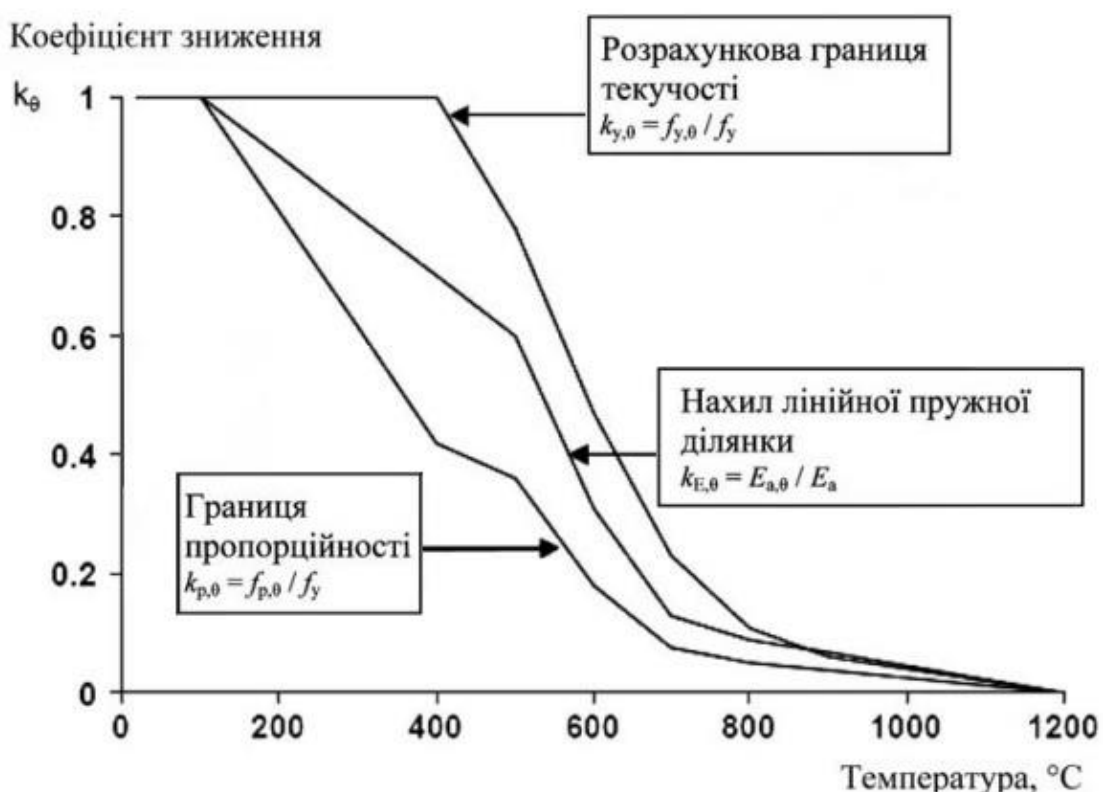


Рис. 2.10. Коефіцієнти зниження для вуглецевої сталі за підвищеної температури

Користуючись таблицею 2.1 та методом лінійної інтерполяції визначаємо коефіцієнти зниження границі текучості сталі $k_{y,\theta}$ та жорсткості перерізу $k_{E,\theta}$ за формулою 2.20 на часових відмітках до 60-ти хвилин пожежі. Графік зміни модулю пружності в продовж 60-ти хвилин пожежі показано на рисунку 2.11.

$$f(x) = f(x_0) + \frac{f(x_1) - f(x_0)}{x_1 - x_0} \cdot (x - x_0) \quad (2.29)$$

Таблиця 2.1. Коефіцієнти зниження для вуглецевої сталі за підвищеної температури [47]

Температура сталі θ_a	Коефіцієнти зниження за температури θ_a відносно значення f_y або E_a для 20 °С		
	Коефіцієнт зниження (відносно f_y) для розрахункової границі текучості $k_{y,\theta} = f_{y,\theta} / f_y$	Коефіцієнт зниження (відносно f_y) для границі пропорційності $k_{p,\theta} = f_{p,\theta} / f_y$	Коефіцієнт зниження (відносно E_a) для нахилу лінійної пружної ділянки $k_{E,\theta} = E_{a,\theta} / E_a$
20°С	1,000	1,000	1,000
100°С	1,000	1,000	1,000
200°С	1,000	0,807	0,900
300°С	1,000	0,613	0,800
400°С	1,000	0,420	0,700
500°С	0,780	0,360	0,600
600°С	0,470	0,180	0,310
700°С	0,230	0,075	0,130
800°С	0,110	0,050	0,090
900°С	0,060	0,0375	0,0675
1000°С	0,040	0,0250	0,0450
1100°С	0,020	0,0125	0,0225
1200°С	0,000	0,0000	0,0000

Примітка. Для проміжних значень температури сталі може бути застосована лінійна інтерполяція.

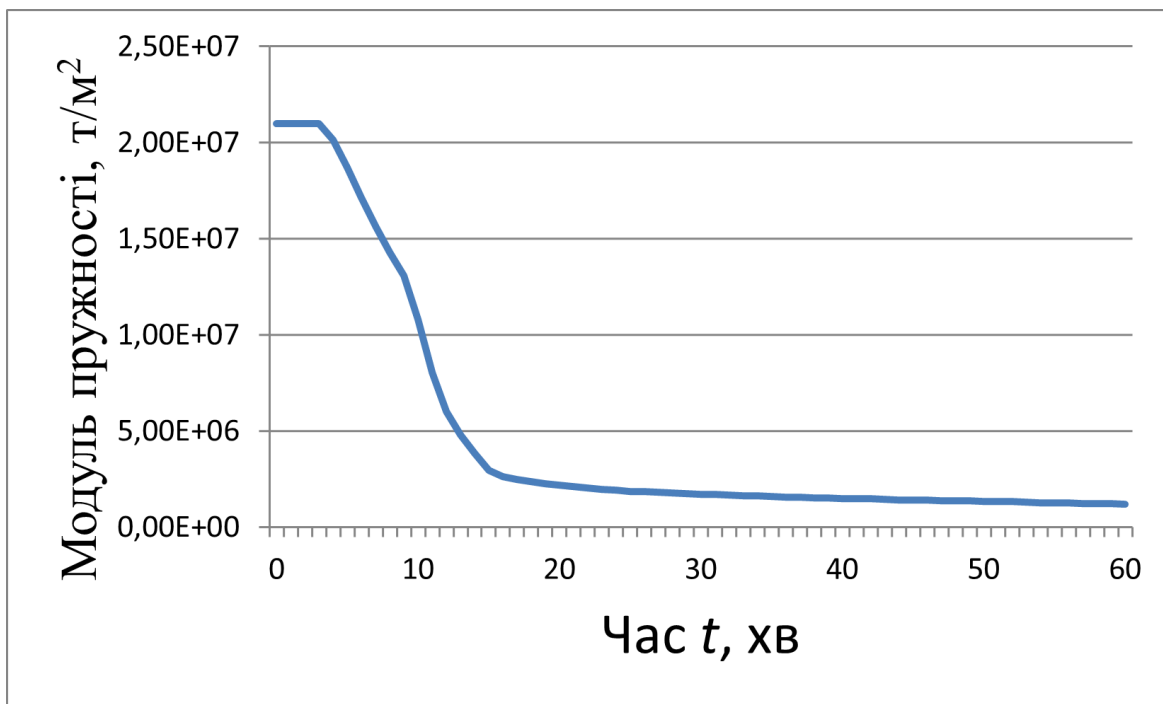


Рис. 2.11. Графік зміни модуля пружності відносно часу температурного впливу

Для порівняння напружено-деформовано стану сталеві балки перекриття до та після впливу високих температур на 15-й та 60-й було вирішено виконати порівняльний статичний скінченно-елементний розрахунок тестової моделі. За результатами теплотехнічного розрахунку для 15-ти та 60-ти хвилин впливу приймаємо середню температуру в перерізі балки 694°C та 946°C відповідно.

В ПК ЛІРА-САПР було створено три ідентичні стержневі скінченно-елементні моделі просторової рами, вигляд якої показана на рисунку 2.12. В одній моделі жорсткісні характеристики перерізу та пружно-деформаційні характеристики сталі балки перекриття не змінювалися, в другій моделі – знижувалися відповідно 15-ти хвилинному тепловому впливу, в третій – відповідно 60-хвилинному впливу від пожежі.

Просторова рама складається зі сталевих колон, основних та другорядних сталевих балок. Колони висотою 3 метри жорстко закріплені знизу. Поперечний переріз сталевих колон – коробка зі швелерів розміром 200x100x6 міліметрів.

Другорядні сталеві балки спираються на головні балки перекриття мають поперечний переріз швелер 20 за ДСТУ 3436-96 [51]. Довжина кожної другорядної балки – 4 метри.

Головні сталеві балки перекриття мають проліт 6 метрів і шарнірно спираються на колони. Переріз головних балок було прийнято таким самим як і в пункті 2.2 цього розділу – двотавр 35Б1 за ГОСТ 26020-83 [48].

Дослідна конструкція, а саме головна балка перекриття, виконана з матеріалу сталі С255 ($R_{yn} = 245$ МПа, $R_{un} = 370$ МПа).

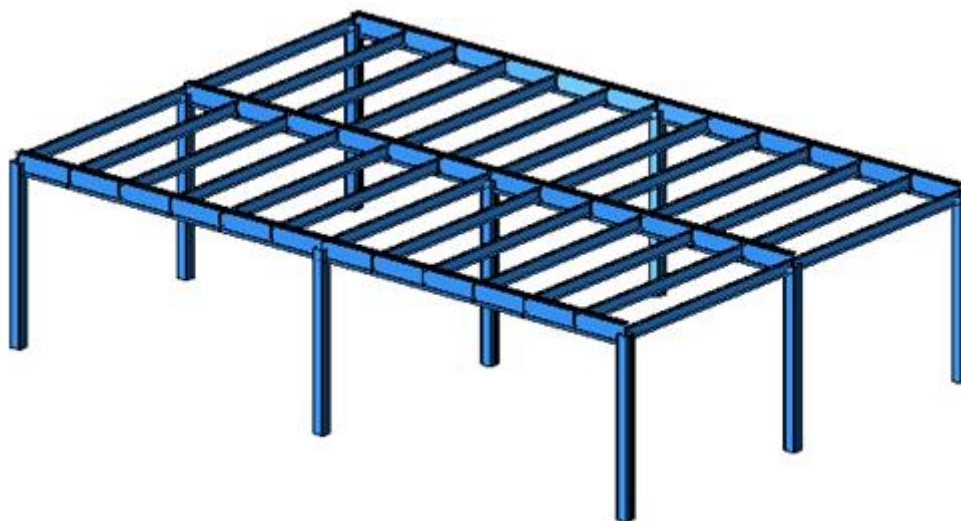


Рис. 2.12. Розрахункова схема моделі просторової рами

На просторову раму, яка описана вище, було прикладено 2 типи навантаження: навантаження від власної ваги та навантаження від залізобетонної плити перекриття товщиною 120 міліметрів (власна вага плити перекриття). Коефіцієнти надійності за навантаженням γ_{fm} дорівнюють 1.05 та 1.1 відповідно.

Сумісна робота залізобетонної плити перекриття та сталеві балки перекриття не враховувалась, так як в цьому дослідженні не ставилась задача впливу пожежі на сталезалізобетонні конструкції. Проте дана тематика також є актуальною та потребує окремого дослідження.

Міцнісні та жорсткісні характеристики сталеві балки перекриття були знижені за допомогою коефіцієнтів зниження відповідно до таблиці 2.1, які в свою чергу були обчислені за допомогою лінійної інтерполяції. Для відмітки часу впливу пожежі на 15-ти хвилинах коефіцієнт зниження модуля пружності дорівнює $E_{a,\theta}=0.141$, а для 60-ти хвилин пожежі – $E_{a,\theta}=0.05715$. Також було вираховано коефіцієнт зниження границі текучості $k_{y,\theta}$ для 15-ти та 60-ти хвилин пожежі. Він дорівнює $k_{y,\theta}=0,241$; $k_{y,\theta}=0.0508$ відповідно. Знижені приведені жорсткісні характеристики перерізу вказані в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2. Приведені жорсткісні характеристики перерізу після температурного впливу

	15 хв	60 хв
EA	14742 тс	5959.7 тс
EI _u	299.84 тс*м ²	121.21 тс*м ²
EI _v	15.701 тс*м ²	6.3471 тс*м ²
EI _{uv}	0.00 тс*м ²	0.00 тс*м ²
EI _y	299.84 тс*м ²	121.21 тс*м ²
EI _z	15.701 тс*м ²	6.3471 тс*м ²
ES _y	978.85 тс*м	395.71 тс*м
ES _z	159.15 тс*м	64.339 тс*м
GJ _t	0.27575 тс*м	0.11148 тс*м
EI _w	0.437537 тс*м ⁴	0.176877 тс*м ⁴
GF _y	2898.5 тс	1171.7 тс
GF _z	2417.9 тс	977.44 тс

Після виконання скінченно-елементного розрахунку на міцність отримуємо наступні результати вертикальних деформацій конструкції та міцності перерізу балки за 1-м граничним станом:

1. Максимальний прогин в головних сталевих балках перекриття до впливу пожежі дорівнює 4.37 міліметри, після 15 хвилин пожежі – 19.4 міліметри, після 60 хвилин пожежі – 39 міліметрів. Графічне зображення прогинів в головних сталевих балках показано на рисунку 2.13.

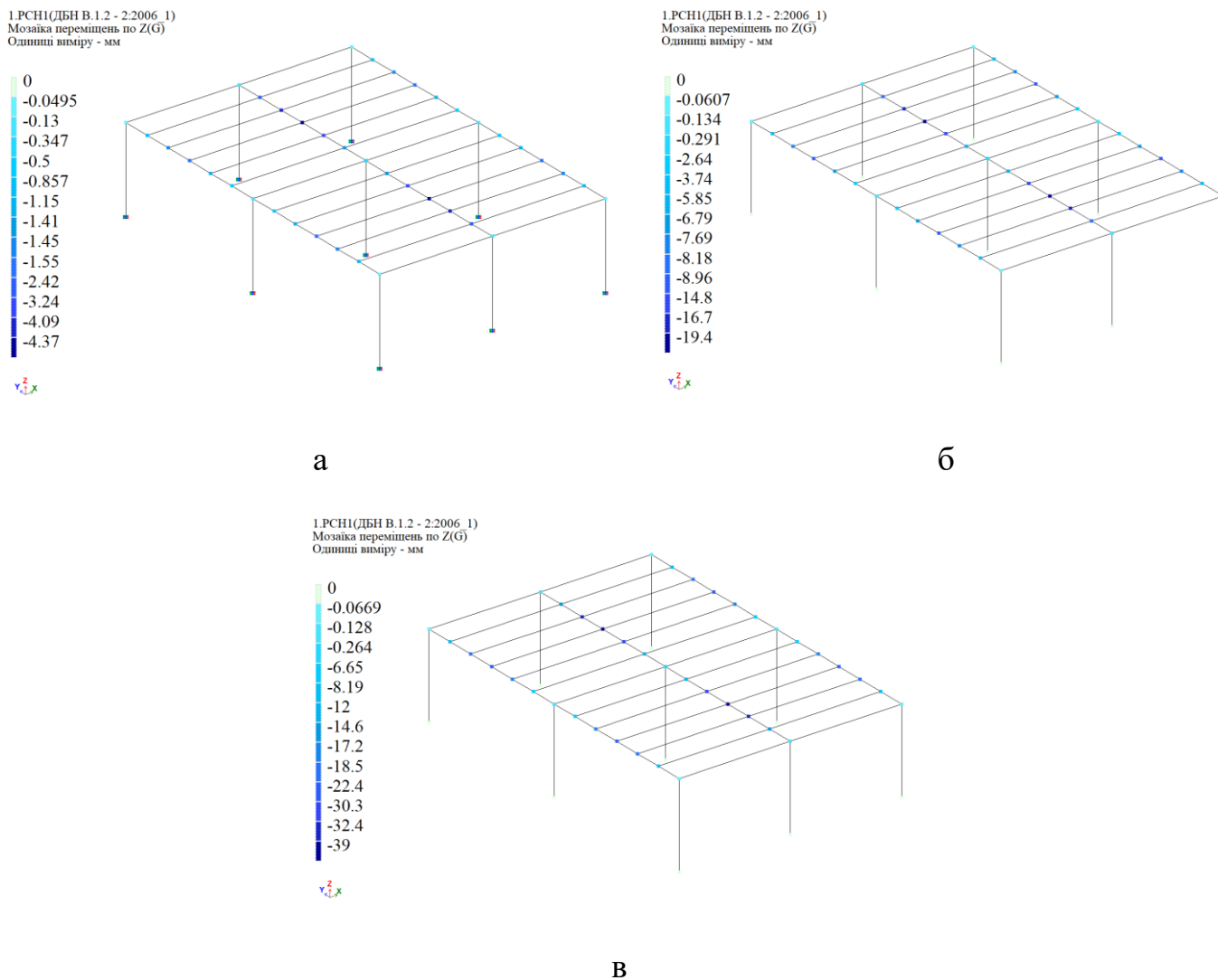


Рис. 2.13. Мозаїка вертикальних переміщень в головних сталевих балках перекриття: а – до впливу пожежі; б – після 15-ти хвилин пожежі; в – після 60-ти хвилин пожежі

2. Максимальний відсоток використання перерізу головних сталевих балок перекриття до впливу пожежі за 1-м граничним станом становить 42.8%, після 15-ти хвилин пожежі – 230%, після 60-ти хвилин пожежі – 551%. Графічне зображення

використання перерізу головної балки за 1-м граничним станом наведено на рисунку 2.14.

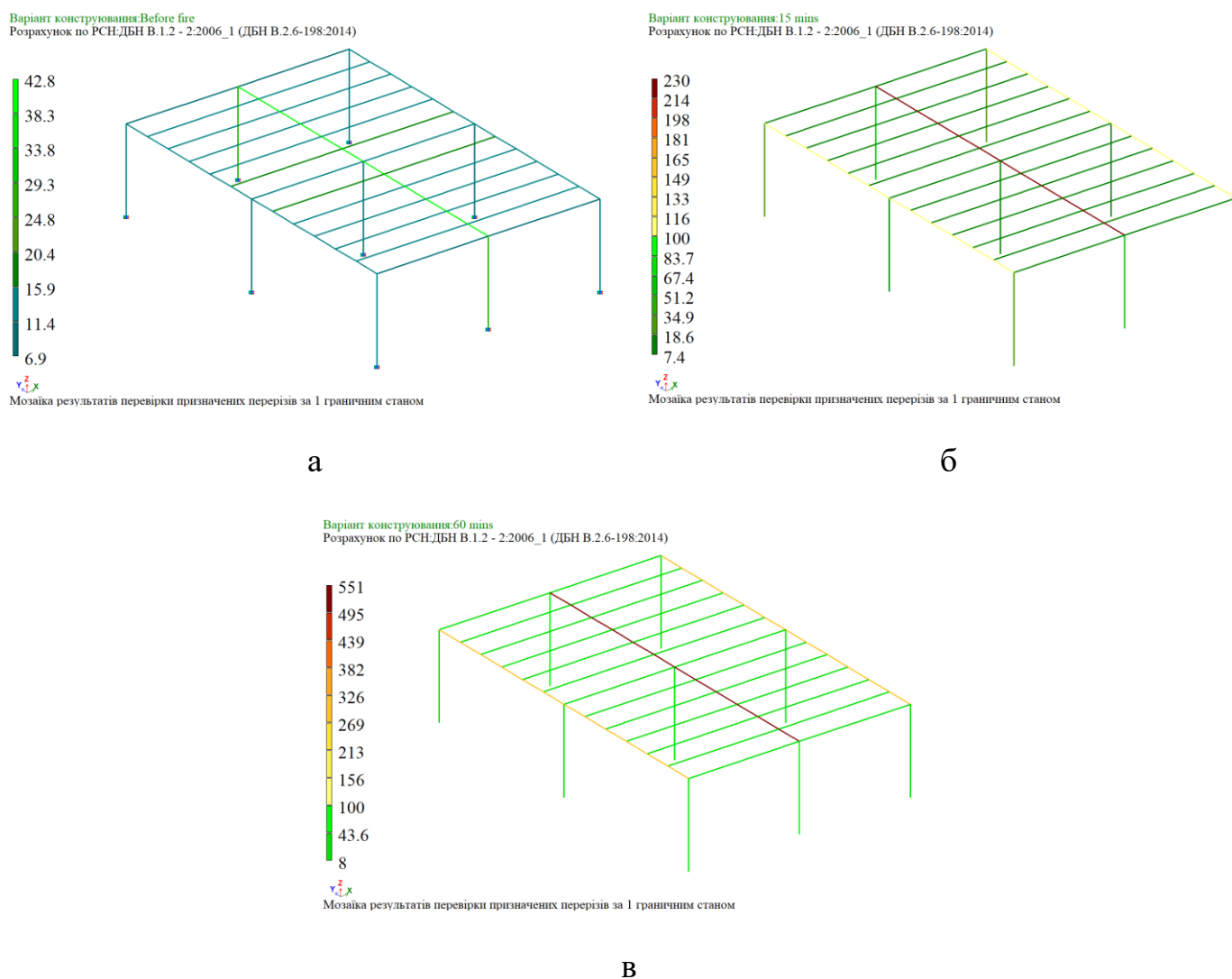


Рис. 2.14. Мозаїка результатів перевірки сталевих балках перекриття за 1-м граничним станом: а – до впливу пожежі; б – після 15-ти хвилин пожежі; в – після 60-ти хвилин пожежі

Аналізуючи результати скінченно-елементного міцнісного розрахунку, проведеного в ПК ЛІРА-САПР для 3-х розрахункових ситуацій (до температурного впливу, на 15-ти та 60-ти хвилинах пожежі) можна зробити висновок, що сталева балка перекриття двотаврового перерізу без вогнезахисту має межу вогнестійкості до 15-ти хвилин.

В цьому розділі наведено алгоритм розрахунку для визначення ступеню вогнестійкості сталеві балки перекриття. Розрахунок ділиться на дві частини, відповідно до Єврокоду [16, 46]: теплотехнічний та статичний (міцнісний). Теплотехнічний та статичний розрахунки було виконано за допомогою методу скінченних елементів в ПК ЛІРА-САПР. В цій дисертаційній роботі алгоритм, показаний на рисунку 2.15 буде удосконалюватися відповідно до подальшого врахування додаткових критеріїв в розділах 3 та 4. Наразі, даний алгоритм можна зобразити наступним чином:

1. Виконання теплотехнічного розрахунку

1.1. Створення моделі поперечного перерізу сталеві балки за допомогою скінченних елементів теплопровідності.

1.2. Вибір температурного режиму пожежі

1.3. Вибір тривалості високотемпературного впливу.

1.4. Призначення лінійних теплофізичних властивостей матеріалам конструкції.

1.5. Отримання результатів теплотехнічного розрахунку у вигляді розподілення температури по перерізу сталеві балки на заданих часових відмітках пожежі.

2. Виконання статичного розрахунку.

2.1. Побудова тестові стержневої скінченно-елементної моделі сталеві балки.

2.2. Зниження жорсткісних характеристик перерізу за середнім значенням температури на обраній часовій відмітці.

2.3. Отримання результатів статичного скінченно-елементного розрахунку у вигляді вертикальних деформацій (прогину) балки на обраній часовій відмітці пожежі.

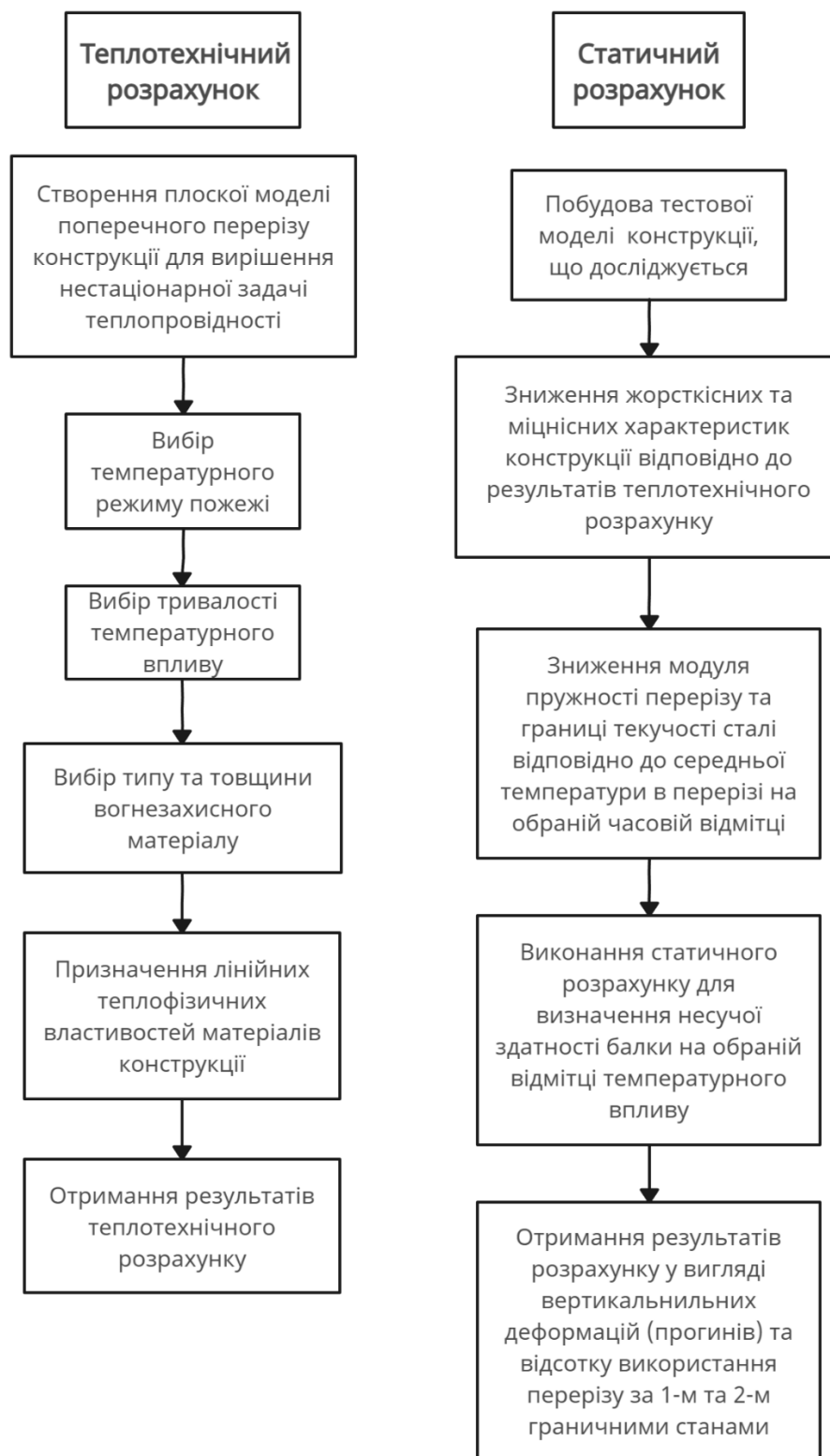


Рис. 2.15. Алгоритм визначення межі вогнестійкості сталеві балки перекриття

2.4. Висновки до розділу 2.

За результатами проведеної в розділі 2 роботи можна зробити наступні висновки:

1. Адаптовано метод нестационарної теплопровідності та використано його при чисельному експерименті для оцінки високих розрахункових температурних впливів на сталеву балку перекриття.

2. Підтверджено закономірності розподілення температур в сталевих балках перекриття без вогнезахисту під час пожежі з урахуванням тепловіддачі при вирішенні задачі нестационарної теплопровідності використовуючи метод скінченних елементів.

3. Встановлено закономірність розподілення температур по перерізу сталевих балок з обпертими на них монолітних залізобетонних плит. Виявлено характер відбору та передачі тепла від окремої сталеві балки до залізобетонних плит, що показало нерівномірне розподілення температурних полів по висоті перерізу балок. Тепловіддача від сталеві балки до залізобетонної плити призвела до виникнення різниці температур в нижній і верхній полицках двотаврових сталевих балок до 200 °С.

4. Порівняно результати чисельного розрахунку, проведеного у вітчизняному програмному комплексі ЛІРА-САПР з результатами аналогічного розрахунку в ANSYS FLUENT [47]. Різниця результатів розрахунку нестационарної теплопровідності складає менше 3%.

5. Виявлені закономірності розподілення температур по висоті балки та врахування зміни модуля пружності-деформації сталі під час пожежі підтвердило втрату несучої спроможності сталеві балки. Встановлено часовий критерій роботи сталевих балок після впливу високих температур до 15 хвилин пожежі за 1-м граничним станом експлуатаційних навантажень. Прогини балки на тестовій моделі досягають нормативних значень при недонапруженні конструкцій. Встановлено часові критерії роботи незахищених сталевих балок під час пожежі за критеріями несучої здатності (рисунок. 2.13 та 2.14).

РОЗДІЛ 3. УДОСКОНАЛЕННЯ ЧИСЕЛЬНОГО МЕТОДОЛОГІЧНОГО ПІДХОДУ ТА АЛГОРИТМІВ РОЗРАХУНКУ ВОГНЕЗАХИЩЕНИХ СТАЛЕВИХ БАЛОК ЧЕРЕЗ ВРАХУВАННЯ НЕЛІНІЙНИХ

ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СТАЛІ І ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ПЛИТ ПЕРЕКРИТТЯ

3.1. Теплофізичні властивості матеріалів в умовах високих температур

3.1.1. Теплофізичні властивості будівельних конструкцій

Розподіл температурних полів у перерізі конструкції в кожен момент часу під час розрахунків на вогнестійкість є перехідною ланкою від теплофізичної задачі до статичної. У зв'язку з цим точність теплофізичного розрахунку конструкції та вогнезахистних матеріалів облицювання є запорукою правильної оцінки несучої здатності конструкції в процесі нагрівання, і відповідно визначення часу досягнення граничного стану.

Під час оцінки вогнестійкості будівельних конструкцій необхідно враховувати їх теплофізичні характеристики, такі як теплопровідність, теплоємність та щільність. В розділі 2 цього дослідження теплофізичні характеристики сталі були задані лінійними, тобто незмінними. Такий підхід можна вважати задовільним і він має певні плюси, а саме швидкий час скінчено-елементного розрахунку. Проте варто зазначити, що з підвищенням температури змінюються не лише пружно-деформаційні характеристики матеріалів конструкції, але й теплофізичні.

В європейських а також українських адаптованих нормативних документах по розрахунку будівельних конструкцій на вогнестійкість наведено методику обчислення зміни теплофізичних характеристик (теплопровідності та теплоємності) з підвищенням температури [16, 52].

Теплофізичні характеристики для різних проміжків значень температури для вуглецевої сталі визначаються за формулами 3.1 та 3.2:

Питома теплоємність:

- Для температури від 20°C до 600°C

$$c_a = 425 + 7.73 \times 10^{-1} \theta_a - 1.69 \times 10^{-3} \theta_a^2 + 2.22 \times 10^{-6} \theta_a^3 \quad (3.1a)$$

- Для температури від 600°C до 735°C

$$c_a = 666 + \frac{13002}{138 - \theta_a} \quad (3.1б)$$

- Для температури від 735°C до 900°C

$$c_a = 545 + \frac{17820}{\theta_a - 731} \quad (3.1в)$$

- Для температури від 900°C до 1200°C

$$c_a = 650 \quad (3.1г)$$

де c_a – питома теплоємність, Дж/кг·К; θ_a – температура сталі, °С.

Теплопровідність:

- Для температури від 20°C до 800°C

$$a_a = 54 - 3.33 \times 10^{-2} \theta_a \quad (3.2а)$$

- Для температури від 800°C до 1200°C

$$a_a = 27.3 \quad (3.2б)$$

де a_a – теплопровідність, Вт/м·К; θ_a – температура сталі, °С.

Теплофізичні характеристики для різних проміжків значень температури для бетону визначаються за формулами 3.3 та 3.4:

Питома теплоємність:

- Для температури від 20°C до 100°C

$$c_p(\theta) = 900 \quad (3.3а)$$

- Для температури від 100°C до 200°C

$$c_p(\theta) = 900 + (\theta - 100) \quad (3.3б)$$

- Для температури від 200°C до 400°C

$$c_p(\theta) = 1000 + (\theta - 200) / 2 \quad (3.3в)$$

- Для температури від 400°C до 1200°C

$$c_a = 1100 \quad (3.3г)$$

де $c_p(\theta)$ – питома теплоємність, Дж/кг·К; θ – температура бетону, °С.

Теплопровідність:

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

$$\lambda_c = 2 - 0.2451 \left(\frac{\theta}{100} \right) + 0.0107 \left(\frac{\theta}{100} \right)^2 \quad (3.4a)$$

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

$$\lambda_c = 1.36 - 0.136 \left(\frac{\theta}{100} \right) + 0.0057 \left(\frac{\theta}{100} \right)^2 \quad (3.4b)$$

де λ_c – теплопровідність, Вт/м·К; θ – температура бетону, °С.

За формулами, які описані вище, можна порахувати теплофізичні характеристики сталі та бетону відповідно до поточної температури матеріалу. В таблиці 3.1 наведені обчисленні нелінійні теплофізичні характеристики сталі та бетону при підвищених температурах.

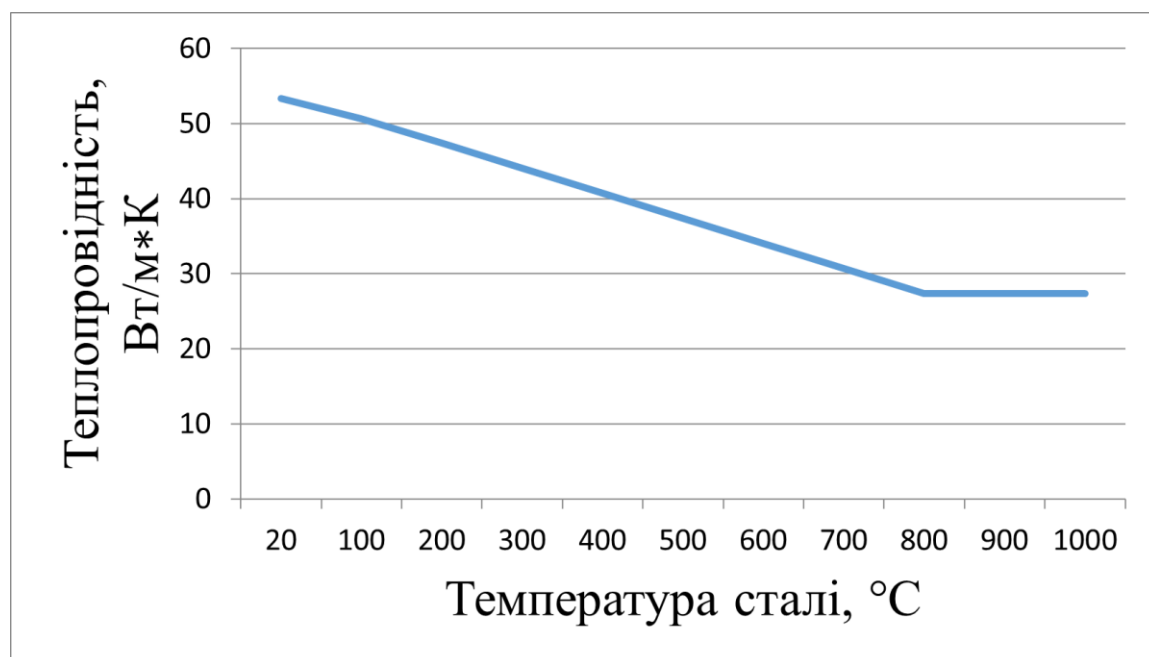
Таблиця 3.1. Нелінійні теплофізичні властивості сталі та бетону

Температура, °С	Сталь		Бетон	
	Питома теплоємність, Дж/кг * К	Теплопровідність, Вт/м * К	Питома теплоємність, Дж/кг * К	Теплопровідність, Вт/м * К
20	439.802	53.334	900	1.64222
100	487.62	50.67	900	1.49765
200	529.76	47.34	1000	1.3317
300	564.74	44.01	1050	1.18215
400	605.88	40.68	1100	1.049
500	666.5	37.35	1100	0.93225

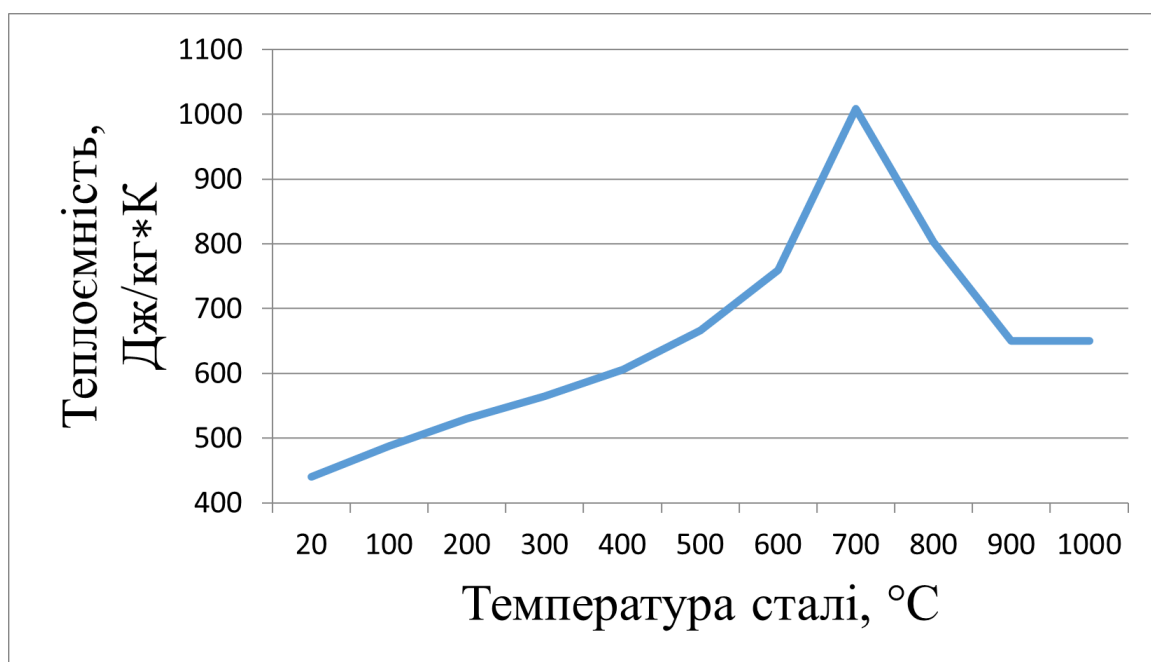
Таблиця 3.1. Нелінійні теплофізичні властивості сталі та бетону (продовження)

600	759.92	34.02	1100	0.8319
700	1008.16	30.69	1100	0.74795
800	803.261	27.3	1100	0.6804
900	650	27.3	1100	0.62925
1000	650	27.3	1100	0.5945

Спираючись на нелінійні теплофізичні властивості матеріалів, наведені в таблиці вище, для теплопровідності та теплоємності сталі та бетону можна сформулювати кусочно-лінійні закони зміни характеристик з підвищенням температури. Для теплофізичних властивостей сталі цей закон має вигляд, як показано на рисунку 3.1.



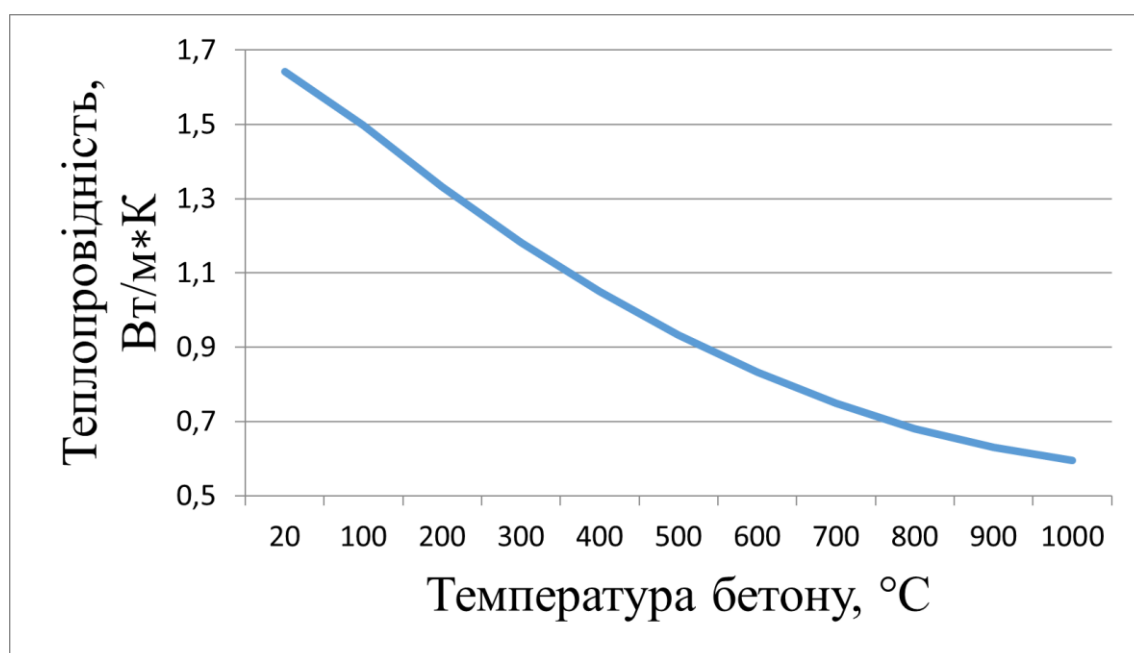
а



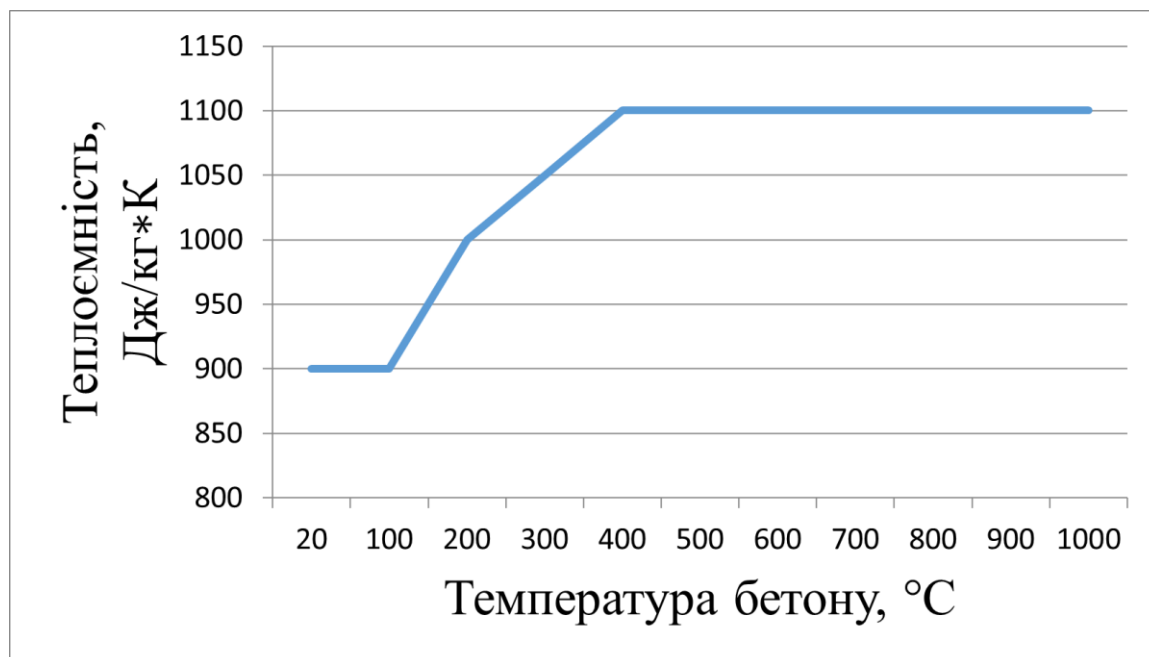
б

Рис. 3.1. Кусочно-лінійний закон нелінійної зміни теплофізичних властивостей сталі: а – теплопровідність; б – питома теплоємність

Для теплофізичних властивостей бетону кусочно-лінійний закон нелінійної зміни теплофізичних властивостей матеріалу з підвищенням температури має вигляд, як показано на рисунку 3.2.



а



б

Рис. 3.2. Кусочно-лінійний закон нелінійної зміни теплофізичних властивостей бетону: а – теплопровідність; б – питома теплоємність

Врахування нелінійності матеріалу дозволить отримати результати чисельного теплотехнічного розрахунку за методом скінченних елементів, які будуть наближені до результатів натурних експериментів. Порівняння результатів (середньої температури в перерізі на різних часових відмітках пожежі) чисельного та натурального експериментів описано в пункті 3.3 цього розділу.

3.1.2. Теплофізичні властивості вогнезахисних матеріалів

Вогнезахисні властивості вогнезахисних матеріалів визначаються виробником при натурних випробуваннях. Ці випробування проводяться на установках, які були описані в пункті 1.3.1 розділу 1. Нагрівальні установки дозволяють проводити теплофізичні дослідження малогабаритних пластин для визначення межі вогнестійкості вогнезахисного матеріалу. Експеримент проводиться до настання граничного стану зразку. Граничним станом вважається досягнення критичної температури у дослідному зразку. За критичну приймається

температура 500°C , яка визначається як середня між значеннями в розміщених термопарах.

В якості зразку використовується пластина певної товщини розмірами 600×600 мм. З одного боку наноситься шар вогнезахисного матеріалу, з іншого боку створюються умови ідеальної теплоізоляції. Таким чином імітується модель одновимірного процесу теплопровідності в сталевій пластині з вогнезахисним облицюванням. Результатом даного експерименту є час, в продовж якого в зразку температура досягає критичного показника.

Така модель може бути використана для дослідження теплотехнічних характеристик вогнезахисних матеріалів чисельними та аналітичними методами.

Представлений метод визначення теплофізичних властивостей відносить до вогнезахисних облицювань, які не змінюють свою товщину при нагріванні [53]. К таким облицюванням відносять плитні матеріали, штукатурки, обмазки і т.п.

Попередньо проводяться вогневипробування сталевих конструкцій пластин по визначенню вогнезахисної ефективності дослідних облицювань у відповідності до ДСТУ EN 13381-4:2022 (EN 13381-4:2013, IDT) [54]. Отримані температурні криві прогріву конструкції використовуються при розрахунках.

Для проведення порівняльних розрахунків необхідно мати результати досліджень мінімум двох конструкцій з різною приведеною товщиною металу. Підвищення кількості дослідних конструкцій з різними параметрами вогнезахисту підвищує точність подальших розрахунків по встановленню теплофізичних характеристик.

При проведенні розрахунку по визначенню теплофізичних характеристик матеріалів порівнюється час досягнення межі вогнестійкості та характер зміни температурних кривих прогріву конструкції при натурному випробуванні та розрахунку.

Початкові теплофізичні характеристики облицювання при нормальній температурі приймаються з проектної документації по вогнезахисту. До таких характеристик відносяться: щільність, вологість та початкові коефіцієнти теплопровідності та теплоємності.

Коефіцієнти зміни теплопровідності та теплоємності облицювання при нагріві визначаються за допомогою методом підбору. Для цього створюється декілька моделей конструкції та виконується декілька теплотехнічних розрахунків з використанням підібраних властивостей матеріалів. Розрахунки проводяться до досягнення середнього співпадіння результатів розрахунків та випробувань не більше ніж 20% (відносно випробувань). При задовільному співпадінні результатів розрахунків та випробування, отримані теплофізичні характеристики облицювання приймаються за істинні.

Розрахунок виконується при умові зміни температури навколишньої середовища при стандартному режимі пожежі, рівняння якого має вигляд:

$$t_{a,t} = 345 \lg(8\tau + 1) + t_n [^{\circ}\text{C}] \quad (3.5)$$

де

$t_{a,t}$ - температура середовища, що нагрівається, $^{\circ}\text{C}$;

τ - час, хв,

t_n - початкова температура середовища, що нагрівається, $^{\circ}\text{C}$.

Коефіцієнт конвективного теплообміну, тобто теплопередачі, α , $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{K}$, від нагріваючого середовища $t_{a,t}$ до поверхні конструкції з температурою t_0 вираховується за формулою:

$$\alpha = 29 + 5.77 s_{np} \frac{\left(\frac{t_{a,t}}{100}\right)^4 - \left(\frac{t_0}{100}\right)^4}{t_{a,t} - t_0} \quad (3.6)$$

де s_{np} - приведений ступінь чорноти системи «середовище, що нагрівається - поверхня конструкції», і визначається за формулою:

$$s_{np} = \frac{1}{(1/s) + (1/s_0) - 1} \quad (3.7)$$

де s - ступінь чорноти вогневої камери пічки. $S = 0.85$;

s_0 - ступінь чорноти поверхні конструкції, що обігривається.

Розрахунок температури металеві конструкції виконується за допомогою програмного забезпечення за методом скінченних елементів.

Програма для розрахунку складається за алгоритмом, який являє собою ряд формул, отриманих на основі вирішення крайової задачі теплопровідності. За цими формулами температура конструкції вираховується послідовно через розрахункові інтервали часу – $\Delta\tau$ до заданого критичного значення.

Початкові умови приймаються наступними: початкова температура в усіх точках перерізу конструкції до впливу пожежі та температура навколишнього середовища приймаються однаковими та дорівнюють $t_n = 20^\circ\text{C}$ (293 K).

Незахищені металеві конструкції

Алгоритмом для чисельного розрахунку незахищених металевих конструкцій є формула, яка має вид:

$$t_{cm,\Delta\tau} = \frac{\Delta\tau}{\gamma_{cm}\delta_{np}(C_{cm} + D_{cm}t_{cm})} \alpha(t_{e,\tau} - t_0) + t_n \quad (3.8)$$

де $t_{cm,\Delta\tau}$ – температура стержня через розрахунковий момент часу $\Delta\tau$, К;
 t_{cm} – температура стержня в даний момент часу – τ , К;
 α – коефіцієнт передачі тепла від середовища, що нагрівається до поверхні конструкції (коефіцієнт конвекції), Вт/(м²*К);

C_{cm} – початковий коефіцієнт теплоємності металу, (Дж/(кг*К));

D_{cm} – коефіцієнт зміни теплоємності металу при нагріві, (Дж/(кг*К²));

γ_{cm} – питома вага металу, кг/м³;

δ_{np} – приведена товщина металу, м;

$$\delta_{np} = \frac{A}{P} \quad (3.9)$$

де A – площа поперечного перерізу, м²;

P – периметр, що обігрівається, поперечного перерізу стержня, м.

Максимальний розрахунковий інтервал часу $\Delta\tau_{\max}$ обчислюється за формулою:

$$\Delta\tau_{\max} = \frac{\gamma_{cm}\delta_{np}(C + D_{cm}t_{cm})}{\alpha} \quad (3.10)$$

де α та t_{cm} – максимально можливі значення в розрахунку.

Конструкції з вогнезахисним покриттям

Для плоских конструкцій з одномірним потоком тепла по товщині алгоритм розрахунку складається на основі схеми, показаної на рисунку 3.3. Вогнезахисне облицювання товщиною δ_0 розбивається на n -ну кількість шарів Δx .

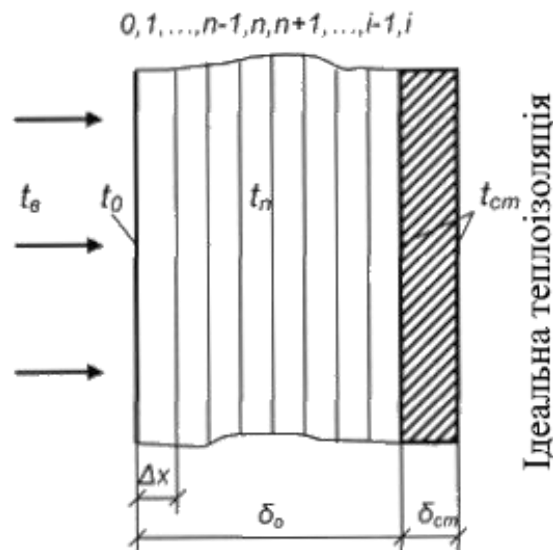


Рис. 3.3. Схема до розрахунку прогріву сталевій пластини з вогнезахисним облицюванням

Температура на сталевій пластині – $t_{cm,\Delta D}$ через розрахунковий інтервал часу $\Delta\tau$, розраховується за формулами:

- температура на поверхні облицювання, що обігривається:

$$t_{0,\Delta\tau} = \frac{2\Delta\tau \left[A(t_1 - t_0) + 0.5B(t_1^2 - t_0^2) + \alpha(t_g - t_0)\Delta x \right]}{\gamma_0 \Delta x^2 (C + Dt_0)} + t_1 - t_\phi \quad (3.11)$$

- температура у внутрішніх шарах облицювання:

$$t_{n,\Delta\tau} = \frac{\Delta\tau \left[A(t_{n-1} - 2t_n + t_{n+1}) + 0.5B(t_{n-1}^2 - 2t_n^2 + t_{n+1}^2) \right]}{\gamma_0 \Delta x^2 (C + Dt_n)} + t_n - t_\phi \quad (3.12)$$

- температура на сталевій пластині:

$$t_{n,\Delta\tau} = \frac{2\Delta\tau \left[A(t_n - t_{cm}) + 0.5B(t_n^2 - t_{cm}^2) \right]}{\Delta x \left[\gamma_0 \Delta x (C + Dt_{cm}) + 2\gamma_{cm} \delta_{cm} (C_{cm} + D_{cm} t_{cm}) \right]} + t_{cm} - t_\phi \quad (3.13)$$

де A – початковий коефіцієнт теплопровідності облицювання при нагріванні, Вт/(м*К);

B – коефіцієнт зміни теплопровідності облицювання при нагріванні, Вт/(м*К²);

C – початковий коефіцієнт теплоємності облицювання, Дж/(кг*К);

D – коефіцієнт зміни теплоємності облицювання при нагріванні, Дж/(кг*К²);

α – коефіцієнт конвективного теплообміну, Вт/(м²*К);

$$t_{\phi} = \frac{p_e r}{100 \left[(C + D t_{cm}) + \frac{2 \gamma_{cm} \delta_{cm} (C_{cm} + D_{cm} t_{cm})}{\gamma_0 \Delta x} \right]} \quad (3.14)$$

де p_e – початкова вагова вологість облицювання, %;

r – скрита теплота пароутворення води, $r=2260 \cdot 10^3$ Дж/кг.

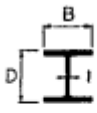




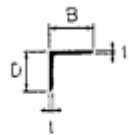

















Отже за вище описаним методом можна визначити теплофізичні характеристики різноманітних вогнезахисних облицювань за допомогою результатів натурних експериментів (кривих прогріву), які описані в п.1.3.1 розділу 1, та розрахунково-аналітичних методів розрахунку, використовуючи спеціалізоване програмне забезпечення, наприклад ANSYS FLUENT [55]. Експериментальні криві прогріву наведені у звітах по вишукуванню вказаних конструкцій.

Визначення приведеної товщини металу

Для представлення складної геометрії двовимірної конструкції в одному вимірі необхідно використовувати єдиний параметр для всіх видів перерізів – приведену товщину металу $\delta_{пр}$. Фізичний сенс $\delta_{пр}$ полягає в тому, що переріз стержневої конструкції будь-якого профілю з вогнезахистом приводиться до вигляду сталеві пластини певної товщини, нескінченних розмірів, з ідеальною теплоізоляцією з необігріваного боку (див. рисунок 3.3). Значення приведеної товщини металу не залежить від конфігурації профілю і довжини стержневої конструкції. Дана величина прямопропорційна масивності конструкції і зворотньопропорційна поверхні конструкції, що обігрівється. Таким чином при однаковому тепловому впливі і рівних теплофізичних характеристиках конструкції

приведена товщина металу являю собою єдиний показник, що визначає час прогріву конструкції до заданої температури.

Таблиця 3.2. Значення периметру, що обігрівається для типових сталевих конструкцій з вогнезахистом

Профіль	Периметр, що обігрівається, при різних умовах обігріву			
	Облицювання по контуру		Облицювання у вигляді коробу	
	з 4-х сторін	з 3-х сторін	з 4-х сторін	з 3-х сторін
	 $2B+2D+2(B-t)$ $=4B+2D-2t$	 $B+2D+2(B-t)$ $=3B+2D-2t$	 $2B+2D$	 $B+2D$
	 $2B+2D$	 $B+2D$	 $2B+2D$	 $B+2D$
	 $2B+2D+2(B-t)$ $=4B+2D-2t$	 $B+2D+2(B-t)$ $=3B+2D-2t$	 $2B+2D$	 $B+2D$
	 $2B+2D$	 $B+2D$	 $2B+2D$	 $B+2D$
	 πD	---	 πD	---

В закордонній практиці аналогічним чином застосовується величина Section Factor (m^{-1}), яка являє собою зворотнє значення приведеної товщини металу.

Приведена товщина металу конструкції $\delta_{пр}$ (мм) визначається наступним чином:

- для незахищених конструкцій і для конструкцій із реактивним покриттям приведена товщина визначається за формулою 3.9.
- для конструкцій, що покриті штукатурними або плитними облицюваннями з товщиною покриву менше 20 мм, приведена товщина металу також визначається за формулою 3.9, з врахуванням вирахування периметра конструкції, що обігривається за таблицею 3.2.
- для конструкцій, що покриті штукатурними або плитними облицюваннями з товщиною покриву більше 20 мм, приведена товщина металу також визначається за формулами 3.15-3.20.

Формули для розрахунку приведених товщин сталевих конструкцій з товщиною облицювання більше 20 мм:

- коробчастий переріз:

$$\delta_{пр} = \frac{(\delta_{пр,x}b + \delta_{пр,y}a)}{a + b} \quad (3.15)$$

де a та b – розміри перерізу, м;

$\delta_{пр,x}$ та $\delta_{пр,y}$ – приведені товщини пластин по осям x та y :

$$\delta_{пр,x} = \delta_x \frac{b - \delta_y}{b + \delta_0} - 0.25 \frac{C_{\gamma 0}}{C_{ст} \gamma_{ст}} \cdot \frac{\delta_0^2}{b + \delta_0} \quad (3.16)$$

$$\delta_{пр,y} = \delta_x \frac{a - \delta_x}{a + \delta_0} - 0.25 \frac{C_{\gamma 0}}{C_{ст} \gamma_{ст}} \cdot \frac{\delta_0^2}{a + \delta_0} \quad (3.17)$$

де δ_x та δ_y – товщини стінок перерізу пластин по осям x та y ;

δ_0 – товщина облицювання, м;

$C_{\gamma 0}$ та $C_{ст} \gamma_{ст}$ – початкові значення теплоємності облицювання та сталі, Дж/(кг·К).

- круглий переріз:

$$\delta_{np} = \delta_{cm} \frac{d_3 - \delta_{cm}}{d_3 + \delta_0} - 0,25 \frac{C_{\gamma 0}}{C_{cm} \gamma_{cm}} \cdot \frac{\delta_0^2}{d_3 + \delta_0} \quad (3.18)$$

де δ_3 – зовнішній діаметр перерізу металу, м;

δ_{cm} – товщина стінки перерізу, м.

- двотавровий переріз (облицювання по контуру перерізу):

для полиць:

$$\delta_{np} = \frac{t}{2} \quad (3.19)$$

де t – товщина полиці, м;

для стінки:

$$\delta_{np} = 0,5d \frac{h - 1,5t}{h - 2t - \delta_0} - 0,25 \frac{C_{\gamma 0}}{C_{cm} \gamma_{cm}} \cdot \frac{\delta_0^2}{h - 2t - \delta_0} \quad (3.20)$$

де t – товщина стінки, м; h – висота перерізу, м.

- двотавровий переріз (облицювання плитами з утворенням повітряного прошарку): за формулою 3.15, приймаючи $\delta_x = d/2$; $\delta_y = t$.

3.2. Оцінка вогнестійкості моделі сталеві балки перекриття з врахуванням вогнезахисту

3.2.1. Теплотехнічний розрахунок вогнезахисної балки перекриття.

Порівняння результатів чисельного розрахунку з результатами натурального експерименту.

Чисельний розрахунок, який описано в цьому підрозділі, базується на натурному експерименті, який було проведено та описано Ковальовим А.І. [4].

Для дослідження було обрано сталеву балку перекриття двотаврового перерізу ІРЕ 400, яка має приведену товщина 5,309 мм, та коефіцієнт перерізу $A_m/V=188,4 \text{ м}^{-1}$, Довжина дослідної сталеві балки дорівнює 1 метр. Перед нанесенням вогнезахисної речовини сталеві балки були покриті шаром ґрунтовіки глибокого проникнення ГФ-021 товщиною 0,05 міліметри. В якості вогнезахисного матеріалу було обрано реактивне вогнезахисне покриття, яке було рівномірно нанесене на поверхню балки по всій довжині на грані перерізу, які піддаються

нагріванню. Товщина вогнезахисного покриття – 1.183 міліметри. До нанесення покриття на кожен балку було встановлено по 10 термопар ТХА.

Бокові торці балок закриті теплоізоляційними пластинами товщиною 40 міліметрів за допомогою 4 шпильок. Балки підвішувалися до плити перекриття, товщиною 250 міліметрів через шар керамічної мінеральної вати за допомогою шпильок.

Середня витрата реактивної вогнезахисної речовини в рідкому стані під час нанесення складала 1.79 кг/м^3 . Температура повітря при експерименті становила 27°C , відносна вологість повітря – 54%.

Натурний експеримент було проведено в випробувальній печі СВП-1, використовуючи метрологічно повірені засоби вимірювальної техніки. Експеримент проведено згідно стандартного температурного режиму.

Чисельний експеримент було проведено в ПК ЛІРА-САПР. Для експерименту було створено пластинчасту скінченно-елементну модель поперечного перерізу дослідної сталеві балки. Теплопередача уздовж балки приймається рівномірною. Оскільки балка кріпиться до стелі шпильками, таке закріплення виключає можливість виникнення процесу тепловіддачі від балки до залізобетонної плити, що в свою чергу дозволяє оптимально проаналізувати теплоізоляційні можливості вогнезахисного матеріалу.

Створення та аналіз чисельної моделі поперечного перерізу сталеві балки перекриття було виконано за чисельним методом скінченних елементів. Модель виконана зі пластинчатих скінченних елементів теплопровідності та стержневих елементів конвективного теплообміну. Крок сітки триангуляції моделі становить 2 міліметри. Така густа сітка триангуляції дозволить змоделювати тонкий шар вогнезахисного матеріалу в декілька шарів скінченних елементів, що дозволить детально проаналізувати теплопередачу між вогнезахисним матеріалом та сталеві балкою. Загальна кількість скінченних елементів в моделі – 3520. Модель поперечного перерізу балки з вогнезахистом показано на рисунку 3.4.

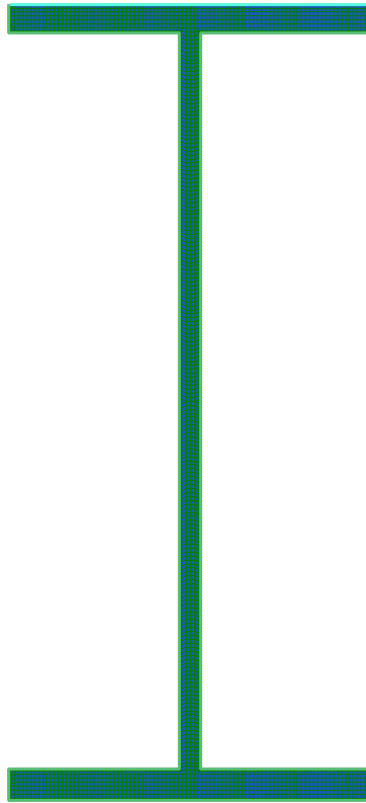


Рис. 3.4. Модель поперечного перерізу балки

Теплофізичні характеристики сталі (теплопровідність та питома теплоємність) були задані нелінійними, тобто з врахуванням їх зміни з підвищенням температури, згідно з розрахунками, наведеними в пункті 3.1.1 цього розділу. Густина сталі прийнята 7850 кг/м^3 . Нелінійні теплофізичні характеристики сталі наведено в таблиці 3.1.

Питома теплоємність вогнезахисного покриття приймається незмінним і дорівнює $c_p = 70,4 \text{ Дж/кг}\cdot\text{°C}$. Густина – 1420 кг/м^3 . Теплопровідність реактивної фарби λ_p була порахована за формулою 3.21 і наведена в таблиці 3.3 [56, 57].

$$\lambda_p = 4 \cdot 10^{-7} \theta^2 - 0.0004 \cdot \theta + 0.1037 \quad (3.21)$$

Коефіцієнт конвективного теплообміну між середовищем, що нагрівається, та сталеву балкою, $\alpha_c = 25 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$. Сумарний коефіцієнт конвективного теплообміну між необігрівною поверхнею сталеві балки та навколишнім середовищем, $\alpha^* = 5 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$.

Таблиця 3.3. Нелінійні теплофізичні властивості вогнезахисного матеріалу

Температура, °С	Теплопровідність, Вт/ м * К	Питома теплоємність, Дж/кг * К
20	0,09586	70,4
100	0,0677	
200	0,0397	
300	0,0197	
400	0,0077	
500	0,0037	
600	0,0077	
700	0,0197	
800	0,0397	
900	0,0677	
1000	0,1037	

Високотемпературний тепловий вплив від пожежі відбувається з трьох сторін: на нижню полицку, стінку та нижню грань верхньої полицки двотавра. Нагрівання відбувається згідно стандартного температурного режиму пожежі. Вплив пожежі відбувається 60 хвилин, часовий крок розрахунку – 60 секунд.

Результати теплотехнічного розрахунку нестационарної теплопровідності за методом скінченних елементів показано на рисунку 3.5. Встановлено нерівномірний розподіл температури по висоті перерізу, проте різниця температур сягає не більше ніж 50°C. Різниця температури присутня, так як температурний вплив на верхню полицку двотавру відбувається з однієї сторони, а на нижню – з обох. Також видно, що стінка двотавру прогривається сильніше, ніж полицки. Це

пов'язано з тим, що температурний вплив на стінку також відбувається з обох сторін стінки.

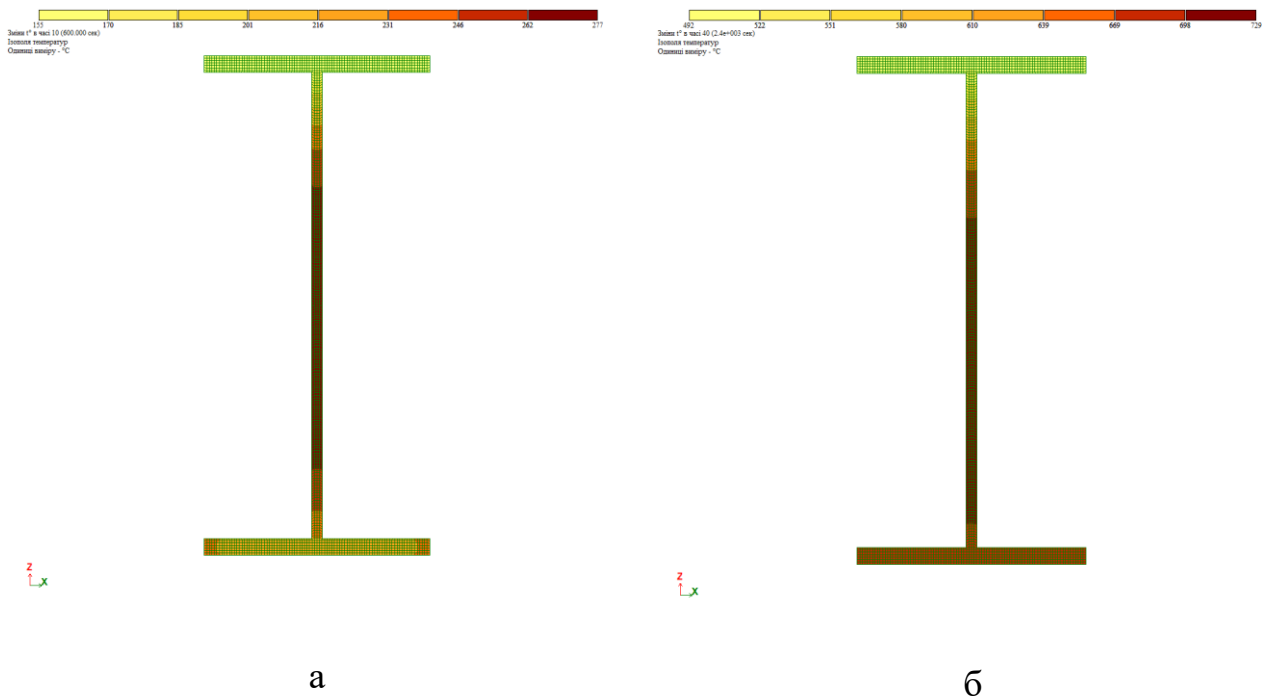


Рис. 3.5. Температурний розподіл в перерізі балки на відмітках часу: а – 10 хв; б – 40 хв

Результати теплотехнічного розрахунку, проведені в цьому пункті було порівняно з результатами чисельного дослідження, проведеного Ковальовим А.І. та натурним експериментом. Різниця між цими двома дослідженням полягає в способі моделювання балки. Ковальов А.І. в своїх роботах [4, 10] моделює просторову модель балки, тоді як в цьому дослідженні моделюється поперечний переріз. Теплотехнічний розрахунок об'ємної скінченно-елементної моделі сталевій балки дозволяє врахувати теплопровідність по довжині балки. Проте через те, що нагрівання конструкції відбувається знизу температурне поле по довжині балки буде близьке до рівномірного, тоді як температурне поле по висоті балки – ні. Також слід зазначити, що побудова об'ємної моделі є складнішим процесом та займає більше часу для розрахунку. Тому для вирішення подібної задачі розрахунок пласкої моделі сталевій балки перекриття є більш оптимальним.

Порівняння результатів теплотехнічних розрахунків та натурального експерименту показані на рисунку 3.6. Різниця результатів складає менше 5%, з чого можна зробити висновок, що запропонована методика є достовірною і може бути використана для вирішення наступних задач дослідження.

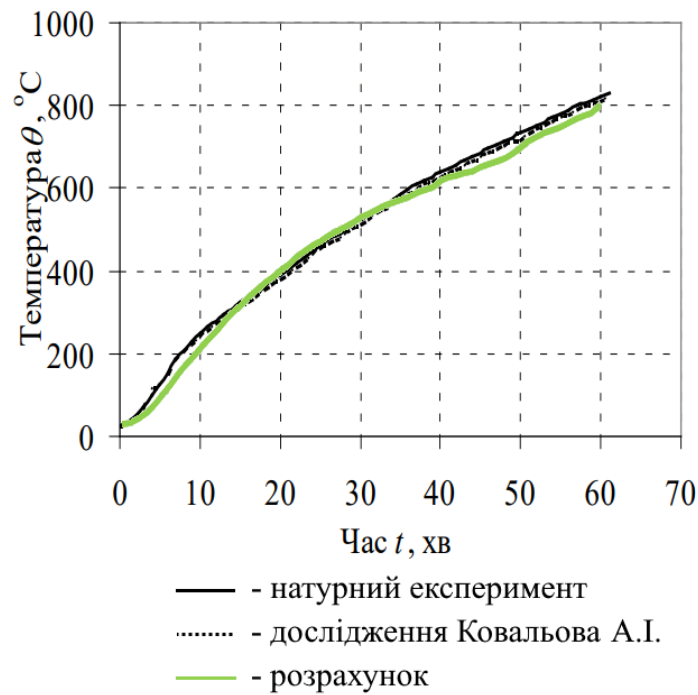


Рис. 3.6. Графік порівняння середньої температури в балці за результатами досліджень

3.2.2. Створення та теплотехнічний розрахунок моделей перерізів сталевих балок з різними варіантами вогнезахисту

Спираючись на результати чисельного дослідження, описаного в п.2 другого розділу було прийнято рішення створити декілька моделей сталевих балок перекриття з різними варіантами вогнезахисту та порівняти їх термонапружений стан.

В якості дослідної моделі було обрано сталеву балку перекриття довжиною 12 метрів. Переріз сталеві балки – зварний двотавр, яким має наступні розміри: полочки – 800x50 міліметрів, стінка – 1350x50 міліметрів. На сталеву балку перекриття спирається залізобетонна плита перекриття, товщиною 600 міліметрів. Нелінійні теплофізичні характеристики матеріалів балки та плити наведено в таблиці 3.1.

В якості вогнезахисних матеріалів було обрано наступні види вогнезахисту від українського виробника [58]: вогнезахисна штукатурка, вогнезахисна фарба на органічному розчиннику та вогнезахисні плити з мінерального матеріалу. Теплофізичні характеристики вогнезахисних матеріалів були отримані за допомогою вирішення задачі зворотної теплопровідності на основі проведених виробником натурних експериментів і наведені в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4. Нелінійні теплофізичні властивості вогнезахисних матеріалів

№	Назва матеріалу	Щільність, кг/м ³ / Вологість, %	Значення коефіцієнтів теплопровідності λ , Вт/(м*К) та теплоємності c , Дж/(кг*К) при різних температурах T , °С						
			T	20	1000				
1	Вогнезахисна штукатурка GP- 240	450 / 5	T	20	1000				
			λ	0,247	0,247				
			c	840	840				
2	Вогнезахисна фарба на органічному розчиннику MS- 90	1250 / 3	T	20	200	220	280	670	1100
			λ	0,05	0,09	0,06	0,02	0,04	0,08
			c	656	776	880	1008	1248	1120
3	Вогнезахисна плита FB-300	750 / 5	T	20	100				
			λ	0.35	0.09				
			c	1650	3050				
4	Повітря	1,205-0,277 / 60	T	20	200	400	600	800	1000
			λ	0,026	0,0393	0,052	0,062	0,073	0,081
			c	1005	1026	1068	1114	1156	1185

Вогнезахисні покриття були нанесені на сталеву балку у шари, необхідні для підвищення межі вогнестійкості до 120 хв [58]. Товщина шару вогнезахисної фарби складає 1,5 міліметрів, вогнезахисної штукатурки – 24,6 міліметрів, вогнезахисних плит - 25 міліметрів.

В ПК ЛІРА-САПР було створено 4 пластинчаті скінченно-елементні моделі конструкції сталевих балок перекриття з залізобетонними плитами, що спираються на них. В одній моделі не враховувався вогнезахист, в інших трьох моделях було змодельовано відповідні варіанти вогнезахисних матеріалів, що покривають сталеву балку. Моделі було створено зі скінченних елементів, описаних в п. 2.1 та 3.2.1 розділів 2 та 3 відповідно.

Кількість елементів в моделі:

- Без вогнезахисту – 9136;
- З врахуванням вогнезахисної фарби – 9544;
- З врахуванням вогнезахисної штукатурки – 9980;
- З врахуванням вогнезахисних плит – 16100.

Крок тріангуляції в моделях дорівнює 12,5 міліметрів, в ділянці вогнезахисної фарби – 0,5 міліметри. Моделі сталеві балки перекриття з вогнезахистом та без показані на рисунку 3.7.

Особливістю моделювання перерізу сталеві балки перекриття, яка обкладена вогнезахисними плитами полягає в тому, що необхідно додатково змодельовати повітря, яке знаходиться між захисною плитою та стінкою двотавра. Повітря також було змодельовано пластинчатими скінченними елементами теплопровідності. Власне через цей аспект, кількість скінченних елементів в моделі з плитним вогнезахистом суттєво більше, ніж в інших моделях. Цей нюанс необхідно враховувати при проведенні розрахунку, так як чим більше скінченних елементів – тим довше виконується розрахунок. Також варто зазначити, що врахування нелінійної зміни теплофізичних матеріалів так само напряму впливає на швидкість розрахунку. Даний аспект описано в пункті 3.3 цього розділу.

Температурний вплив було задано згідно зі стандартний температурним режимом пожежі (пункт 1.3.2 розділу 1). Час температурного впливу – 120 хвилин. Крок інтегрування – 300 секунд.

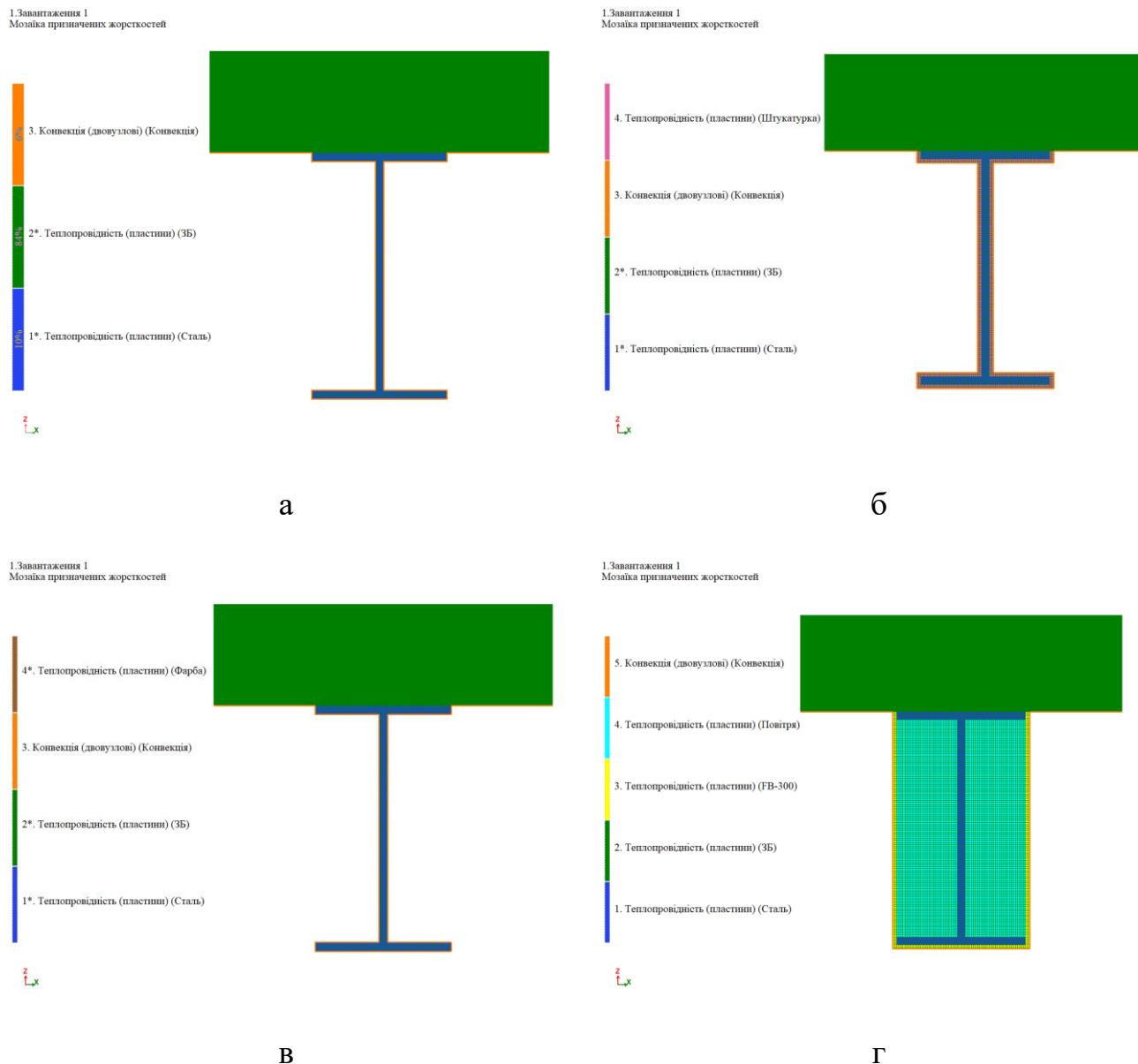


Рис. 3.7. Скінчено-елементна модель сталевій балки перекриття: а – без вогнезахисту; б – з нанесеною вогнезахисною штукатуркою; в – з нанесеною вогнезахисною фарбою; г – обкладена вогнезахисними плитами

Час виконання теплотехнічного розрахунку з урахуванням нелінійної зміни теплофізичних властивостей матеріалів для кожної задачі склав (процесор AMD Ryzen 5600, 16 гігабайт оперативної пам'яті):

- Без врахування вогнезахисту – 10 хв;
- З врахуванням фарби MS-90 – 26 хв;
- З врахуванням штукатурки GP-240 – 11 хв;
- З врахуванням плит FB-300 – 18 хв.

Після виконання теплотехнічного розрахунку отримуємо значення температури в перерізі в кожну хвилину температурного впливу. Кожен з вогнезахисних матеріалів має границю вогнестійкості не менше 120 хвилин, проте середня температура в перерізі захищеної балки різна. На рисунку 3.8 зображено графік залежності температури від часу для кожної з моделей.

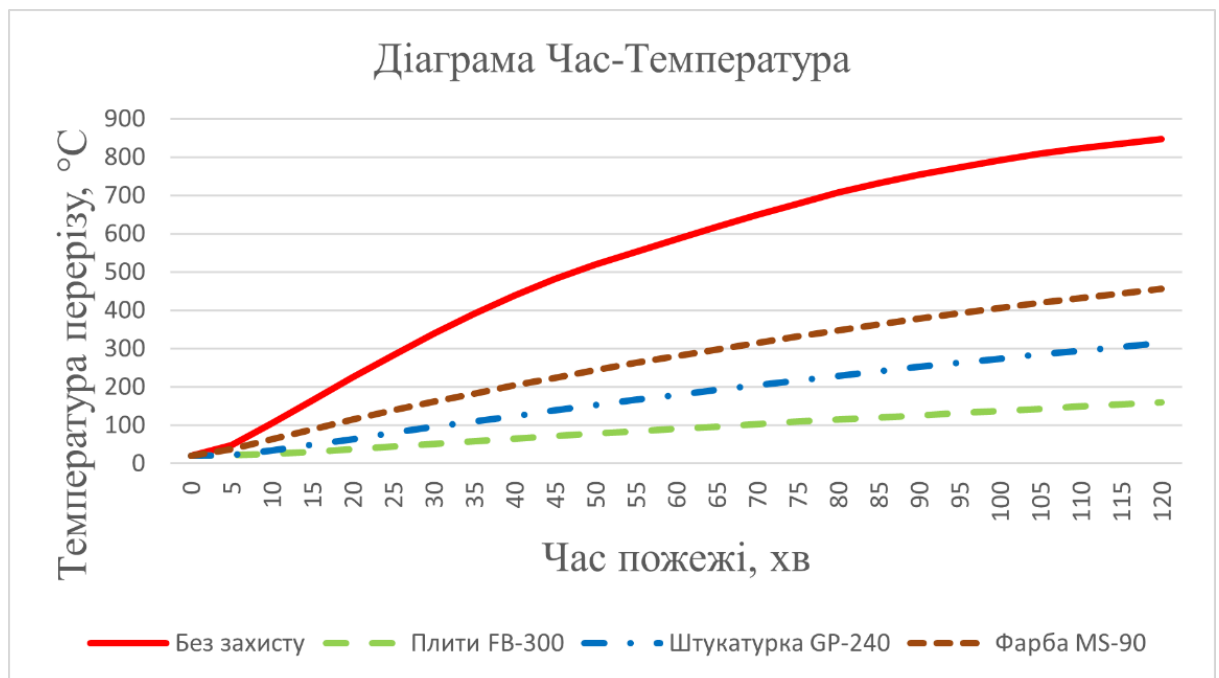


Рис. 3.8. Зведений графік середньої температури в перерізі балки

Графік на рисунку 3.8 показує, що середня температура в перерізі вогнезахисної різними варіантами вогнезахисту балки не перевищує критичної відмітки, яка приймається за 500°C.

Найнижче значення середньої температури в перерізі сталеві балки зафіксовано в моделі, де в якості вогнезахисту було змодельовано вогнезахисні плити. Це пов'язано з тим, що між внутрішньою частиною бокових вогнезахисних плит та двотавром знаходиться повітря, а повітря, як відомо, має дуже добрі

теплоізоляційні властивості. Саме тому спосіб вогнезахисту мінеральними плитами вважається найбільш ефективним і в залежності від товщини вогнезахисного шару може підвищувати межу вогнестійкості конструкції до 210 хвилин (п.3.3 цього розділу). Варто зазначити, що спосіб вогнезахисту мінеральними плитами є досить специфічним, якщо брати до уваги процес облаштування цих плит на конструкцію. Плити клеються до конструкції за допомогою спеціального термоклею та скріпляються між собою металевими скобами. Даний процес є досить трудомістким та часовитратним.

Гарний результат вогнезахисту показала вогнезахисна штукатурка. Це пов'язано з тим, що спосіб нанесення дозволяє рівномірно покривати сталеву конструкцію достатньо товстим шаром вогнезахисту. Також штукатурка має низький коефіцієнт теплопровідності та досить високий показник теплоємності, що дозволяє цьому типу вогнезахисного матеріалу підвищувати межу вогнестійкості конструкції до 240 хвилин [58].

Вогнезахисна фарба є найбільш універсальною, так як підвищує межу вогнестійкості до 120 хвилин, що покриває вимоги більшості будівель. Також спосіб нанесення є простим та швидким в порівнянні із штукатуркою та плитами.

Важливим критерієм роботи вогнезахисних сталевих балок перекриття є зміна міцнісних характеристик перерізу з підвищенням температури. В пункті 2.3 розділу 2 описано алгоритм зміни модуля пружності з підвищенням температури. Отже відповідно до цього алгоритму було сформовано зведений графік зміни модуля пружності з часом температурного впливу для моделей перерізів сталевих балок перекриття, використаних в цьому чисельному експерименті. Графік наведено на рисунку 3.9.

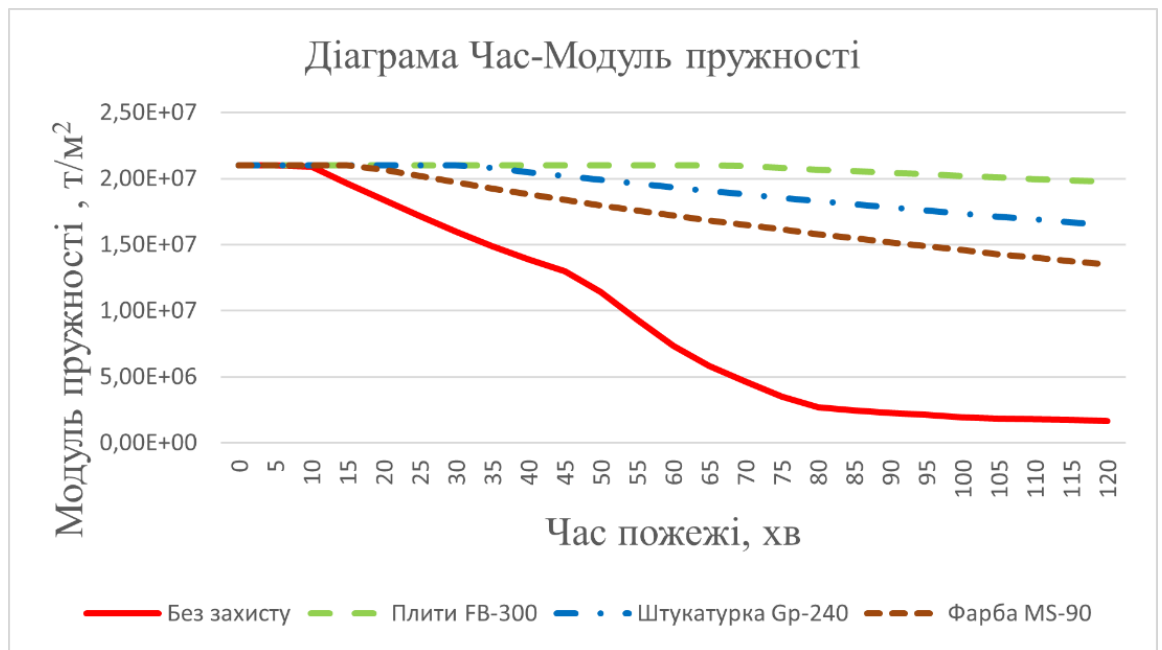


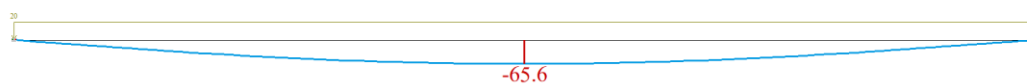
Рис. 3.9. Зведений графік зміни модуля пружності відповідно до середньої температури в перерізі балки в часі температурного впливу

В ПК ЛІРА-САПР було створено спрощені стержневі скінченно-елементні моделі балки для кожного варіанту вогнезахисту. За методикою, описаною в пункті 2.3 другого розділу цього дослідження, жорсткісні характеристики в кожній з моделей були знижені відповідно середнього значення температури по перерізу для обраної часової відмітки пожежі (120 хвилин). Коефіцієнти зниження, які були застосовані до жорсткісних характеристик перерізів сталевих балки перекриття наступні:

- для балки без захисту – 0,0792;
- для балки, покритої вогнезахисною фарбою – 0,643;
- для балки, покритої вогнезахисною штукатуркою – 0,785;
- для балки, покритої вогнезахисними плитами – 0,9404.

При зібраному навантаженні на балку в 20 т/м отримаємо результати статичного розрахунку для кожної моделі балки. Результати показані на рисунку 3.10.

1. Завантаження 1
Епора переміщень Z1
Одиниці виміру - мм



2
Відм. 0.000
Мінімальне значення -65.6138;

а

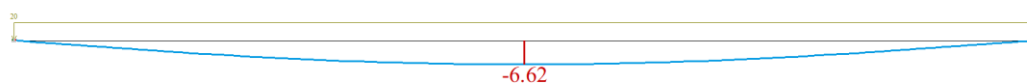
1. Завантаження 1
Епора переміщень Z1
Одиниці виміру - мм



2
Відм. 0.000
Мінімальне значення -8.08184;

б

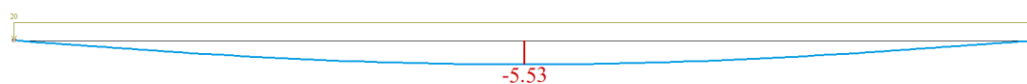
1. Завантаження 1
Епора переміщень Z1
Одиниці виміру - мм



2
Відм. 0.000
Мінімальне значення -6.61989;

в

1. Завантаження 1
Епора переміщень Z1
Одиниці виміру - мм



2
Відм. 0.000
Мінімальне значення -5.52596;

г

Рис. 3.10. Прогини в балці: а – без вогнезахисту; б – покритої вогнезахисною фарбою; в – покритої вогнезахисною штукатуркою; г – покритої вогнезахисними плитами

Відповідно до рисунків 3.8 – 3.10 можна зробити висновок, що найбільш ефективним варіантом вогнезахисту є облаштування вогнезахисних мінеральних плит. Проте є певний нюанс, який видно на рисунку 3.11: нижня полицка

прогрівається значно сильніше, ніж стінка та верхня полицка. Це пов'язано з причинами, описаними в пункті 2.2 другого розділу (тепловіддача плиті перекриття) а також з тим, що нижня полицка захищена лише вогнезахисною плитою, а стінка – вогнезахисною плитою та повітрям.

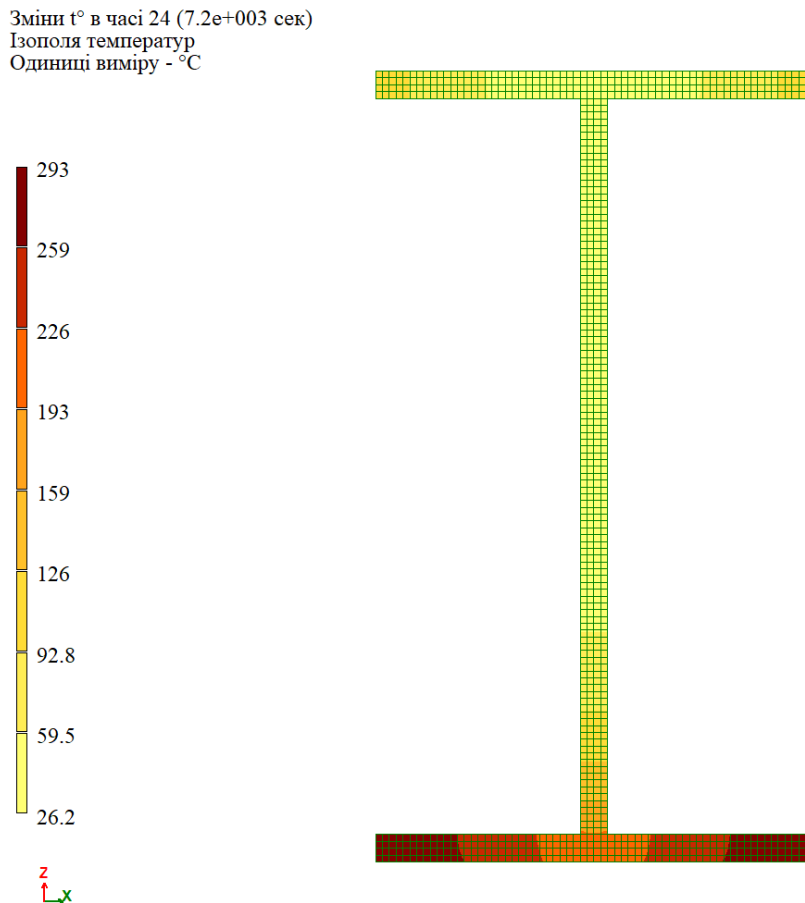


Рис. 3.11. Розподіл температури по перерізу сталевій балки з вогнезахисними плитами на 120-й хвилині пожежі

3.2.3. Підбір оптимальної товщини вогнезахисту сталевій балки перекриття.

Вогнезахисні плити FB-300 виробляються з товщинами 25, 30, 35 та 40 міліметрів. Якщо за проектом вогнезахисту необхідно забезпечити більшу товщину, наприклад 60 міліметрів, плити склеюються та скріплюються між собою сталевими скобами. Проте при підвищенні температури дані скоби «вистрілюють», від чого вогнезахисний шар зменшується. Тому прийнято рішення підібрати оптимальну одношарову компоновку плитного вогнезахисту. Було створено дві

додаткові моделі: вогнезахисні плити товщиною 40 міліметрів по периметру та вогнезахисна плита 40 міліметрів біля нижньої полицки, 25 міліметрів по боках перерізу [59].

Моделі пораховані з урахуванням тих самих критеріїв та параметрів, що і у минулому розрахунку:

- Режим пожежі – стандартний;
- Час температурного впливу – 120 хвилин;
- Теплофізичні характеристики матеріалів конструкції та вогнезахисту – нелінійні.

Після виконання теплотехнічного розрахунку отримуємо результати середньої температури в перерізі, які графічно можна зобразити як на рисунках 3.12 та 3.13.

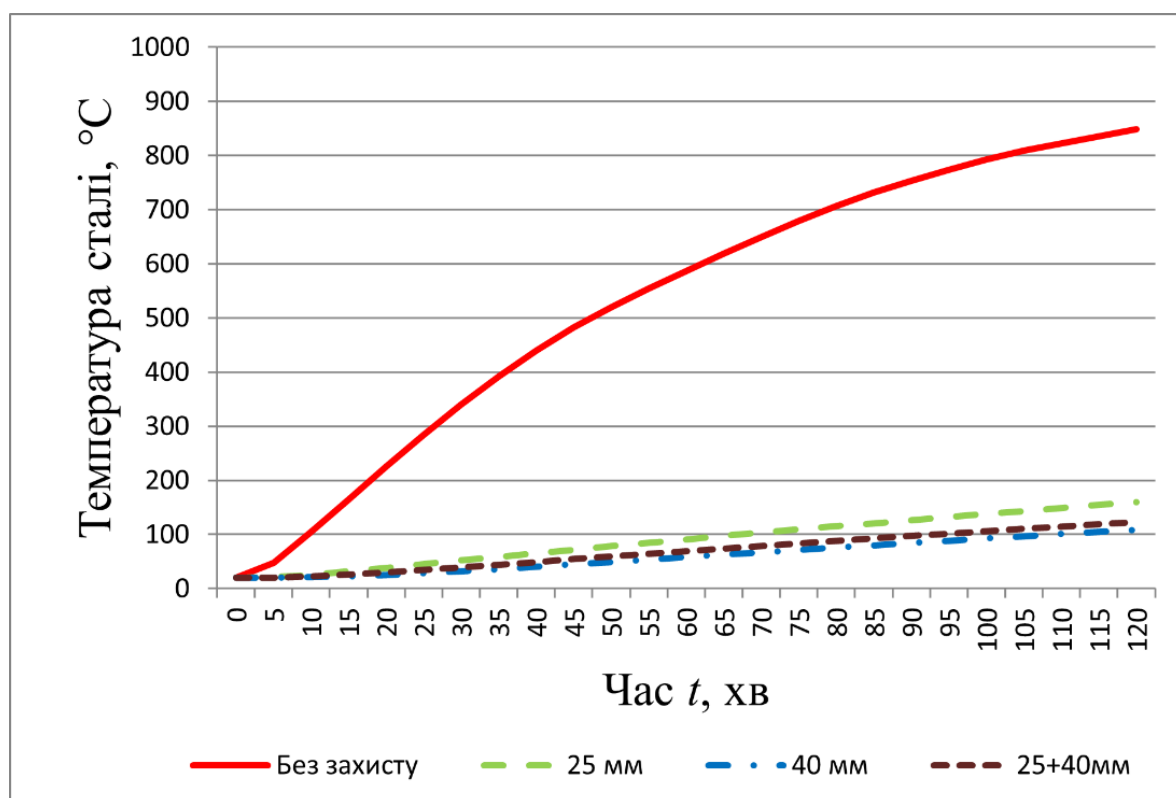


Рис. 3.12. Графік зміни температури в перерізі з часом

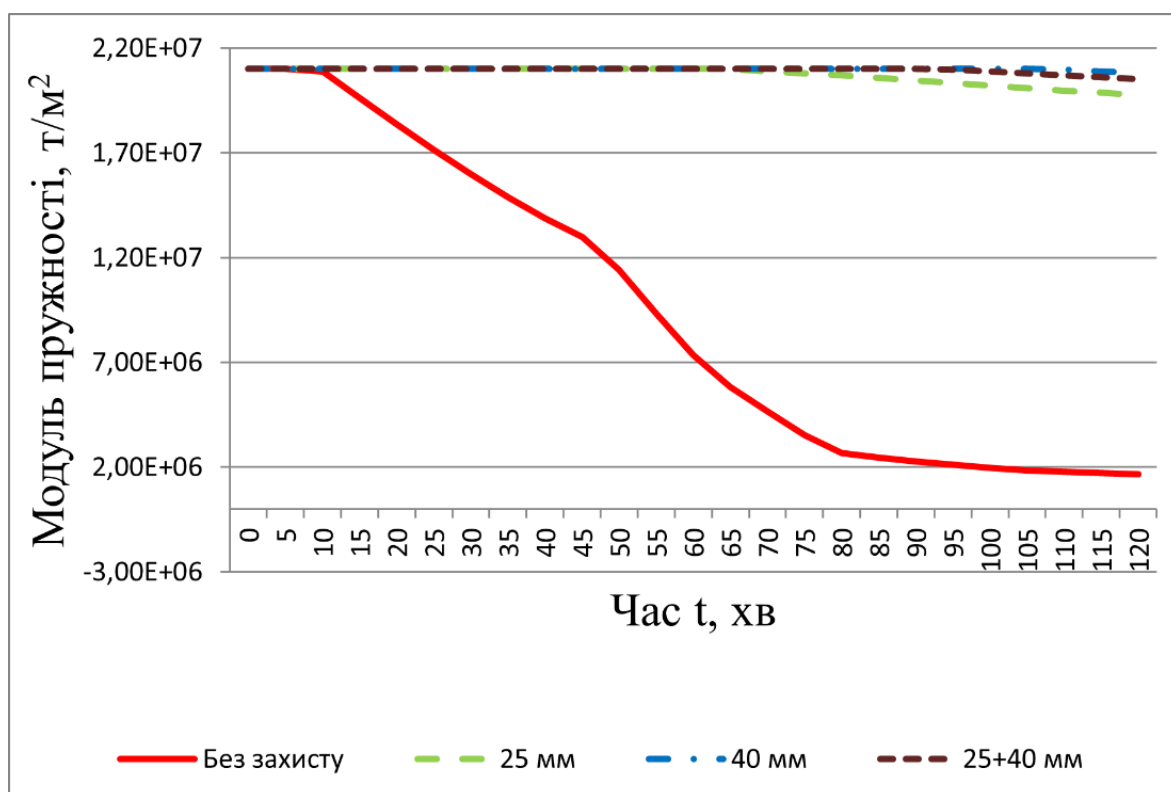


Рис. 3.13. Графік зміни модуля пружності в перерізі з часом

Видно, що на фоні незахищеної балки, різниця в зміні середньої температури по перерізу в балках з різною компоновкою вогнезахисту сягає до 50°C, проте в контексті збільшення межі вогнестійкості до 120 хвилин, не є суттєвою. Аналогічна ситуація і зі зміною модуля пружності.

3.2.4. Лінійні та нелінійні теплофізичні властивості матеріалів.

У пункті 3.2.1 цього розділу було встановлено, що врахування нелінійної зміни теплофізичних характеристик матеріалів при чисельних експериментах дозволяє отримати результати, наближені до реальних. Проте варто зазначити, що час виконання розрахунку довший ніж без врахування цього критерію. Це пов'язано з тим, що комп'ютеру необхідно виконувати розрахунок теплопровідності на багатьох ітераційних кроках, постійно змінюючи значення теплофізичних характеристик матеріалів в кожному скінченному елементі. Час розрахунку напряму залежить від обчислювальних можливостей комп'ютера. Нижче наведено опис порівняльного розрахунку з та без врахування нелінійної зміни теплофізичних властивостей матеріалів.

Для цього дослідження була взята готова модель сталеві балки перекриття з вогнезахисними плитами, які були облаштовані у компоновці 25+40 міліметрів. Виконано теплотехнічний скінченно-елементний розрахунок з врахуванням та без врахування нелінійних теплофізичних властивостей матеріалів конструкції та вогнезахисту. На рисунку 3.14 наведено зведений графік результатів зміни середньої температури в перерізі з часом.

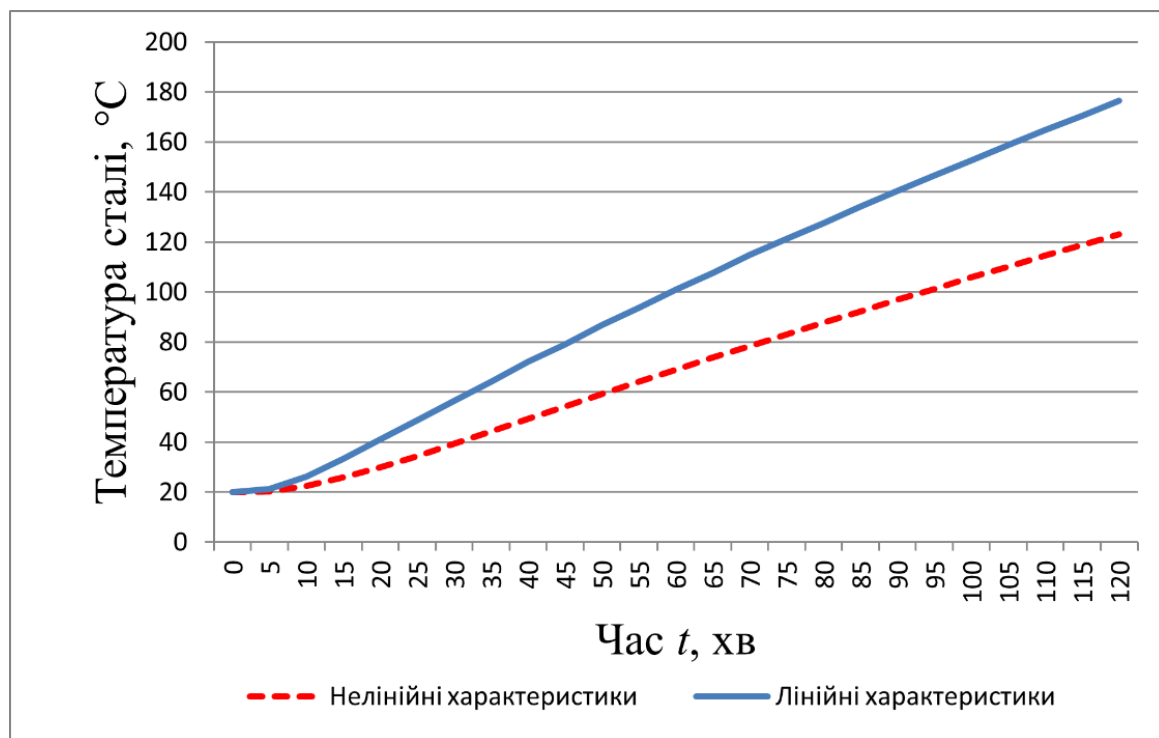


Рис. 3.14. Графік порівняння зміни середньої температури в перерізі з часом з та без врахування нелінійних теплофізичних характеристик матеріалів

Як видно з графіку, при теплотехнічному розрахунку з заданням лінійних матеріалів значення температури вище, тобто задання нелінійних матеріалів відкриває додаткові резерви несучої здатності перерізу. На рисунку 3.15 наведено зведений графік результатів зміни модуля пружності в перерізі з часом. Так як модуль пружності в даному контексті напряму залежить від температури в перерізі, графік цілком прогнозований. При розрахунку з заданням лінійних значень теплофізичних матеріалів модуль пружності знижується менше ніж для при розрахунку з заданням нелінійних значень.

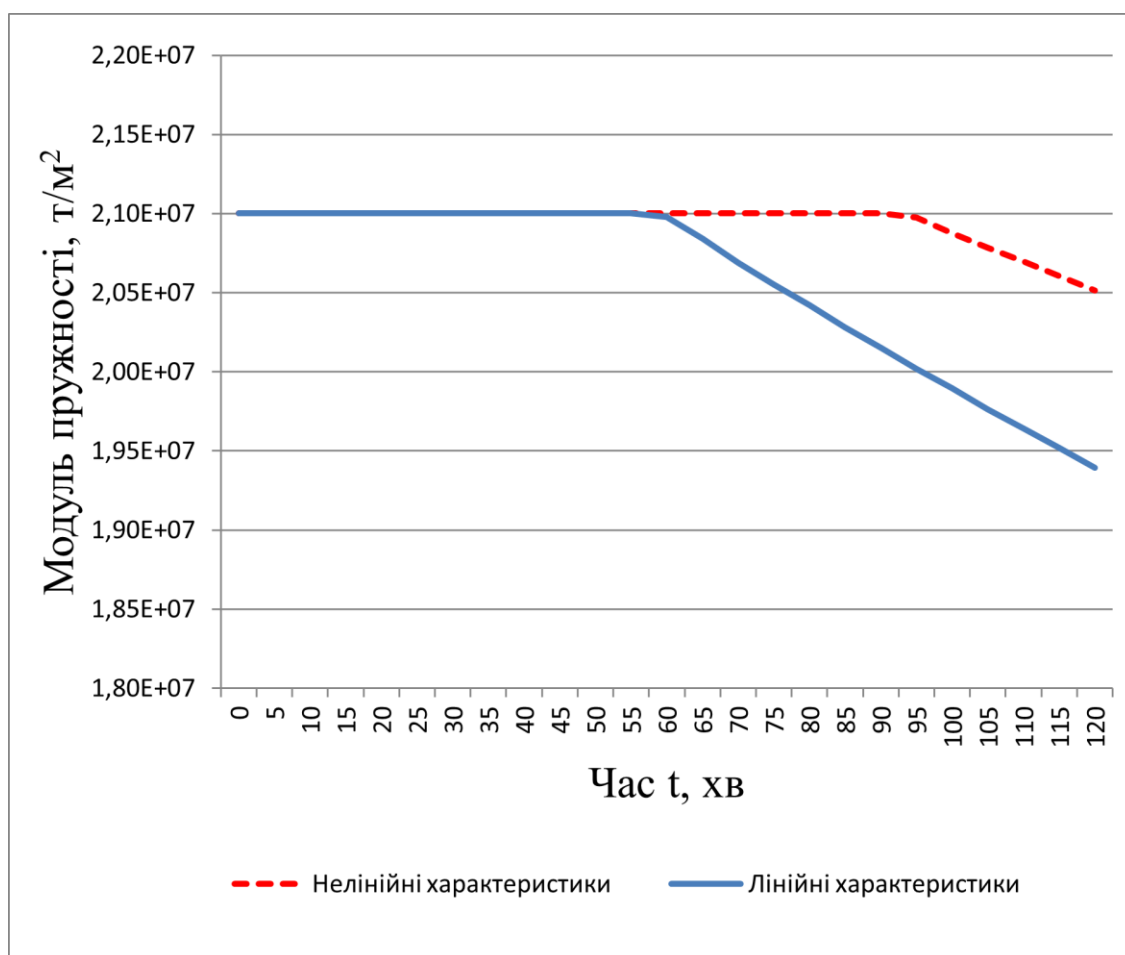


Рис. 3.15. Графік зміни модуля пружності в перерізі з часом

Таблиця 3.5 показує порівняння результатів теплотехнічного розрахунку при встановленому кроці 30 хвилин.

Таблиця 3.5. Таблиця порівняння результатів з заданням лінійних та нелінійних характеристик матеріалів

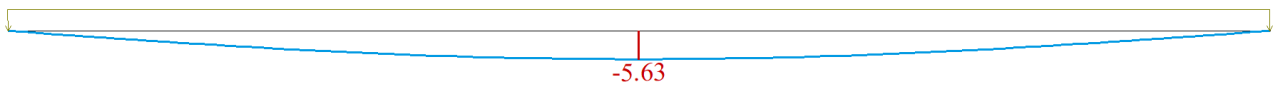
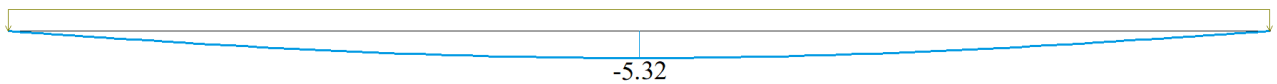
Час, хв	Нелінійні характеристики			Лінійні характеристики		
	T, °C	E, т/м ²	Час розрахунку, хв	T, °C	E, т/м ²	Час розрахунку, хв
30	39,25	2.1*10 ⁷	18	56,6	2.1*10 ⁷	<1
60	68,8	2.1*10 ⁷		101	2.1*10 ⁷	
90	97,05	2.1*10 ⁷		140,5	2.01*10 ⁷	
120	123,1	2.08*10 ⁷		176,55	1,94*10 ⁷	

Було проведено статичний скінченно-елементний аналіз стержневих моделей балок за результатами двох теплотехнічних розрахунків: в першій моделі міцнісні характеристики перерізу понижаються відповідно результатам теплотехнічного розрахунку, де теплофізичні характеристики сталі були задані нелінійними, в другій моделі – де були задані лінійними.

Було побудовано дві стержневі скінченно-елементні моделі сталеві балки двотаврового перерізу (як в пункті 3.2.2 цього розділу), довжиною 12 метрів, на яку діє постійне навантаження в 20 т/м. Коефіцієнти зниження були задані відповідно результатів теплотехнічного розрахунку на часовій відмітці в 120 хвилин. Коефіцієнти зниження модуля пружності дорівнюють $k_{E,нелін}=0.9769$; $k_{E,лін}=0.92345$.

Після виконання статичного скінченно-елементного розрахунку отримаємо результати, які представляють собою прогини в балках.

1. Завантаження 1
Ешора переміщень Z1
Одиниці виміру - мм



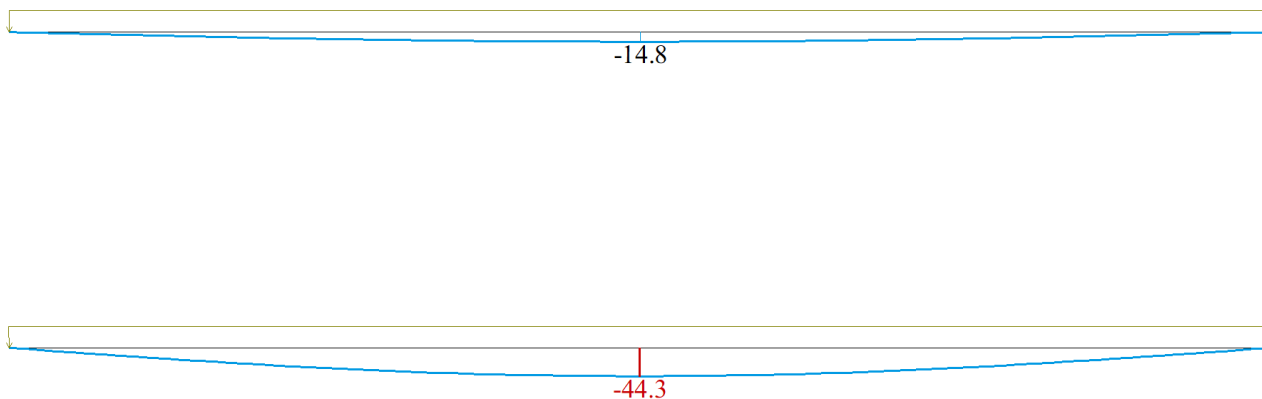
Мінімальне значення -5.6274;

Рис. 3.16. Прогини в балках з вогнезахистом з та без врахування нелінійної зміни теплофізичних властивостей матеріалів на часовій відмітці 120 хвилин

Як видно з рисунку 3.16, різниця по прогинам складає близько 6 %. Така мала різниця пов'язана з недостатністю часу прогріву сталеві балки через гарні вогнезахисні властивості теплоізоляційного облицювання. Якщо виконати

аналогічний розрахунок для вогнезахищеної балки перекриття на часовій відмітці 60 хвилин ($k_{E,нелін}=0.3506$; $k_{E,лін}=0.1144$), результат буде наступним:

1.Завантаження 1
Ешора переміщень Z1
Одиниці виміру - мм



Мінімальне значення -44.2641;

Рис. 3.17. Прогини в балках без вогнезахисту з та без врахування нелінійної зміни теплофізичних властивостей матеріалів на часовій відмітці 60 хвилин

Як видно з рисунку 3.17, результат відрізняється на 67%. Отже виконання розрахунку з врахуванням нелінійної зміни теплофізичних властивостей матеріалів відкриває додаткові резерви несучої здатності сталевих конструкцій.

Відповідно до критеріїв, які були враховані в цьому розділі, алгоритм розрахунку сталевих конструкцій на вогнестійкість набуває наступного вигляду (рис. 3.18):

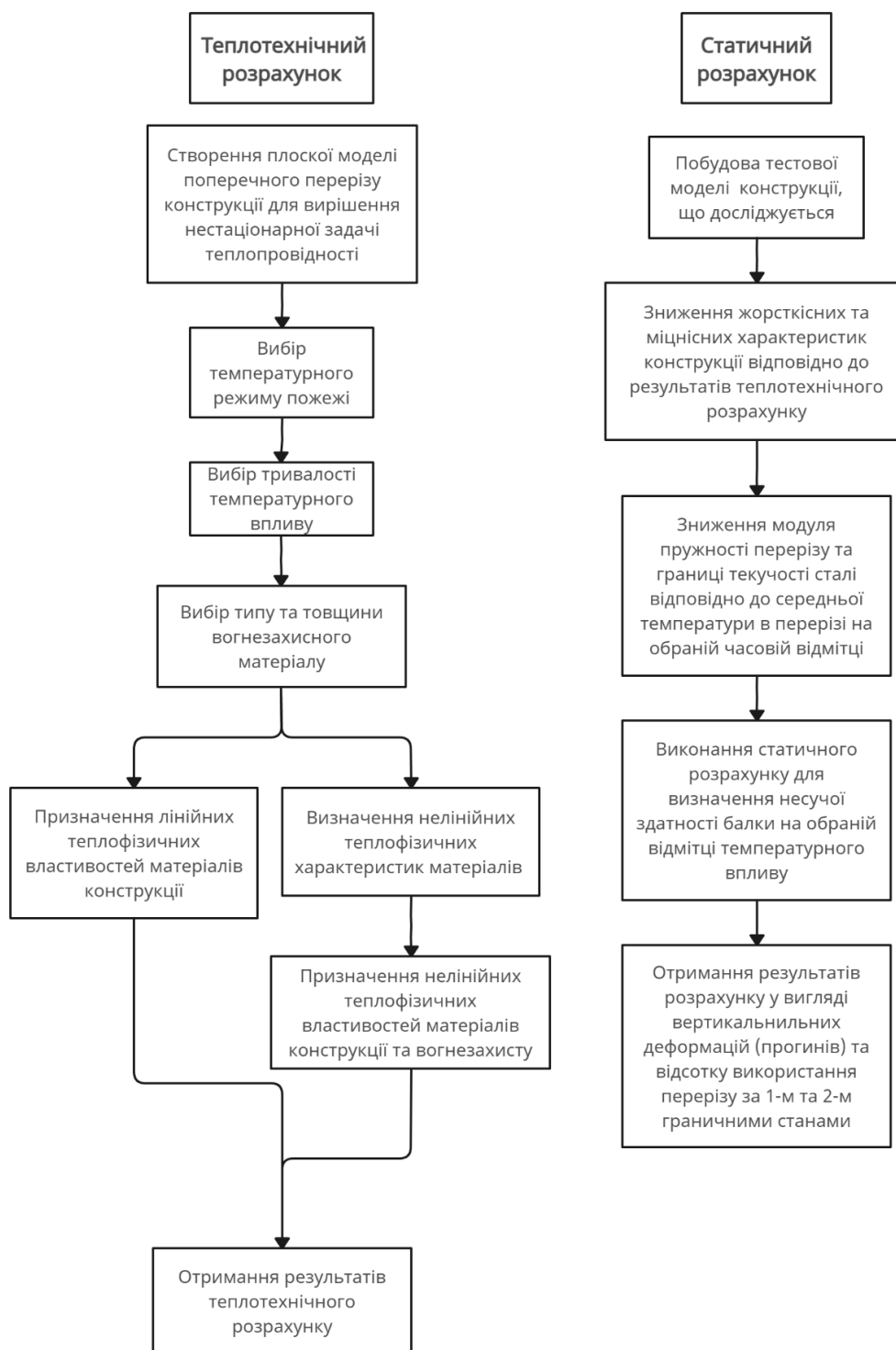


Рис. 3.18. Алгоритм визначення межі вогнестійкості сталеві балки перекриття з врахуванням вогнезахисту.

1. Виконання теплотехнічного розрахунку

1.1. Створення моделі поперечного перерізу сталеві балки за допомогою скінченних елементів теплопровідності.

1.2. Вибір температурного режиму пожежі

1.3. Вибір тривалості високотемпературного впливу.

1.4. Вибір типу та товщини шару вогнезахисного матеріалу.

1.5. Призначення лінійних або визначення та призначення нелінійних теплофізичних властивостей матеріалам конструкції та вогнезахисним матеріалам.

1.6. Отримання результатів теплотехнічного розрахунку у вигляді розподілення температури по перерізу сталеві балки на заданих часових відмітках пожежі.

2. Виконання статичного розрахунку.

2.1. Побудова тестової стержневої скінченно-елементної моделі сталеві балки.

2.2. Зниження жорсткісних характеристик перерізу за середнім значенням температури на обраній часовій відмітці.

2.3. Отримання результатів статичного скінченно-елементного розрахунку у вигляді вертикальних деформацій (прогину) балки на обраній часовій відмітці пожежі.

Для швидкого попереднього розрахунку можна задавати лінійні (незмінні) теплофізичні характеристики матеріалів. Такий розрахунок буде проведений в запас, так як показники температури в перерізі будуть вищі за реальні. Для отримання істинних значень температури та, відповідно, модуля пружності в перерізі необхідно виконувати теплотехнічний розрахунок з врахуванням нелінійних теплофізичних властивостей матеріалів.

3.3. Висновки до розділу 3.

За результатами проведеної в розділі 3 роботи можна зробити наступні висновки:

1. Формалізовано і узагальнено алгоритм визначення нелінійних властивостей матеріалів за методикою Єврокод 2 і 3 для його використання в чисельних дослідженнях.

2. Проведено порівняльний розрахунок скінченно-елементної моделі розподілу температур по перерізу сталевих балок із врахуванням реактивного вогнезахисту (фарба яка спучується під дією температур) з результатами натурального експерименту. Результати чисельного дослідження відрізняються від результатів натурального експерименту менше ніж на 5%. Цей результат підтвердив достовірність методологічних підходів розроблених в дисертації.

3. Вперше виконано теплотехнічний розрахунок сталевій балки перекриття з врахуванням різних вогнезахисних матеріалів та вогнезахисних плит різної компоновки із врахуванням нелінійної зміни теплофізичних властивостей матеріалів. Встановлено закономірність нерівномірного розподілу температурних полів по висоті перерізу балки в залежності від різних вогнезахисних матеріалів. Встановлено, що під час нерівномірного розподілення температур по висоті перерізу більш точний результат можна отримати через вдосконалення чисельної моделі перерізу, яка враховує уточнення жорсткісних характеристик перерізу через нерівномірну зміну модуля пружності (ця задача вирішена в 4 розділі цієї наукової праці).

4. Вперше порівняно результати чисельних досліджень з врахуванням лінійної і нелінійної роботи матеріалів. Порівняння показало необхідність виконання розрахунків з врахуванням нелінійних властивостей матеріалів (сталі і бетону), що відкрило додаткові резерви несучої спроможності сталевих балок при дії високих температур.

5. Виявлено закономірності деформування сталевих балок в залежності від типу та товщини вогнезахисних матеріалів під час пожежі. Отриманий результат має практичну цінність.

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА МЕТОДОЛОГІЇ ТА УДОСКОНАЛЕНОГО АЛГОРИТМУ РОЗРАХУНКУ СТАЛЕВИХ БАЛОК ПЕРЕКРИТТЯ З ВОГНЕЗАХИСТОМ З РЕАЛІЗАЦІЄЮ В ПРОГРАМНОМУ КОМПЛЕКСІ

4.1. Розвиток чисельних методів визначення несучої здатності сталевих балок перекриття при впливі високих температур

4.1.1. Методика визначення характеристик перерізу

Для отримання крутильних, зсувних і секторіальних характеристик використовується методика, заснована на теорії Сен-Венана [60, 61]. Основні залежності отримано зі співвідношень тривимірної теорії пружності за відповідних гіпотез.

Нехай вісь x спрямована вздовж прямолінійної осі стрижня, осі y, z - головні центральні осі перерізу. Двовимірну область перерізу позначимо Ω , одиничний вектор нормалі до межі Γ має вигляд $n=(n_y, n_z)$. Для обчислення зазначених характеристик необхідно визначити три функції Ψ_1, Ψ_2, Ψ_3 , задані в ділянці Ω ; перша з них відповідає крученню, друга і третя - зсуву [61].

Згідно з теорією Сен-Венана функції Ψ_i задовольняють в області Ω рівнянню $\Delta\Psi_i = f_i$, а на межі Γ області Ω граничній умові:

$$\Psi_{i,n} + g_i = 0 \quad (4.1)$$

де $\Delta\Psi = \frac{\partial^2\Psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\Psi}{\partial z^2}$ - оператор Лапласа, $\Psi_{i,n}$ - похідна Ψ_i по y напрямку нормалі

до границі Γ :

$$\Psi_n = \frac{\partial\Psi}{\partial y}n_y + \frac{\partial\Psi}{\partial z}n_z; f_1 = 0, f_2 = y, f_3 = z; g_1 = yn_z - zn_y \quad (4.2)$$

$$g_2 = \left[(y^2 - z^2)n_y + 2yzn_z \right] \cdot \mu / 4; g_3 = \left[2yzn_y + (z^2 - y^2)n_z \right] \cdot \mu / 4 \quad (4.3)$$

де μ - коефіцієнт Пуассона.

Це крайова задача Неймана для рівнянь Лапласа і Пуассона. Рівняння відповідають умовам мінімуму функціонала енергії:

$$\int_{\Omega} \left[\left(\frac{\partial \Psi_i}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Psi_i}{\partial z} \right)^2 + 2f_i \Psi_i \right] d\Omega + \int_{\Gamma} 2g_i \Psi_i d\Gamma \quad (4.4)$$

який використовується для побудови системи рівнянь МСЕ.

Вибір в якості шуканих функції кручення Ψ_1 і функцій вигину Ψ_2, Ψ_3 дозволяє побудувати єдиний і досить простий алгоритм для розв'язання задач кручення і вигину. Це також дає змогу уникнути складнощів, що виникають під час використання функції напружень Прандля у разі багатозв'язної області [62, 63]. За знайденою функцією Ψ_1 обчислюються:

– момент інерції кручення:

$$I_{кр} = \int_{\Omega} \left[\left(\frac{\partial \Psi_1}{\partial y} - z \right)^2 + \left(\frac{\partial \Psi_1}{\partial z} + y \right)^2 \right] d\Omega \quad (4.5)$$

– жорсткість на кручення:

$$GI_{кр} = \int_{\Omega} G \left[\left(\frac{\partial \Psi_1}{\partial y} - z \right)^2 + \left(\frac{\partial \Psi_1}{\partial z} + y \right)^2 \right] d\Omega \quad (4.6)$$

– координати центру кручення:

$$Y_0 = - \int_{\Omega} z \Psi_1 E d\Omega / EI_y; \quad Z_0 = \int_{\Omega} y \Psi_1 E d\Omega / EI_z \quad (4.7)$$

$$\text{де } EI_y = \int_{\Omega} z^2 E d\Omega, \quad EI_z = \int_{\Omega} y^2 E d\Omega$$

– секторіальний момент інерції:

$$I_{\omega} = \int_{\Omega} \Psi_1^2 d\Omega - Y_0^2 I_y - Z_0^2 I_z - \left(\int_{\Omega} \Psi_1 d\Omega \right)^2 / F, \quad F = \int_{\Omega} d\Omega \quad (4.8)$$

– секторіальна жорсткість:

$$EI_{\omega} = \int_{\Omega} E \Psi_1^2 d\Omega - Y_0^2 EI_y - Z_0^2 EI_z - \left(\int_{\Omega} E \Psi_1 d\Omega \right)^2 / EF, \quad EF = \int_{\Omega} E d\Omega \quad (4.9)$$

– координати центру згину (зсуву):

$$\bar{Y} = Y_0 + \frac{1}{EI_y} \left[\int_{\Omega} G\mu y^3 d\Omega + \int_{\Gamma} G\mu\Psi_1 y^2 n_z d\Gamma \right] \quad (4.10)$$

$$\bar{Z} = Z_0 + \frac{1}{EI_z} \left[\int_{\Omega} G\mu z^3 d\Omega + \int_{\Gamma} G\mu\Psi_1 z^2 n_y d\Gamma \right] \quad (4.11)$$

Зсувні площі F_y, F_z обчислюються за функціями Ψ_2, Ψ_3 .

Обзначимо:

$$\eta_{22} = \frac{\mu(y^2 - z^2)}{4} + \frac{\partial\Psi_2}{\partial y}; \quad \eta_{33} = \frac{\mu(z^2 - y^2)}{4} + \frac{\partial\Psi_3}{\partial z} \quad (4.12)$$

$$\eta_{23} = \frac{\mu yz}{2} + \frac{\partial\Psi_2}{\partial z}; \quad \eta_{32} = \frac{\mu yz}{2} + \frac{\partial\Psi_3}{\partial y} \quad (4.13)$$

$$q_2 = \int_{\Omega} (\eta_{32}^2 + \eta_{33}^2) \cdot 4G^2 d\Omega; \quad q_3 = \int_{\Omega} (\eta_{22}^2 + \eta_{23}^2) \cdot 4G^2 d\Omega \quad (4.14)$$

Тоді $F_y = \frac{q_3}{EI_z^2}, F_z = \frac{q_2}{EI_y^2}$.

$$GF_y = \int_{\Omega} G d\Omega \cdot \frac{F_y}{F}; \quad GF_z = \int_{\Omega} G d\Omega \cdot \frac{F_z}{F} \quad (4.15)$$

Викладена методика застосовується і для тонкостінних перерізів. Область такого перерізу розбивається на прямокутні смугові елементи. Шукані функції $\Psi_i(y, z)$ на кожному прямокутнику подаються у вигляді $\psi_i(y, z) = \varphi_i(y) + z\zeta_i(y)$, де вісь y спрямована вздовж довгого боку, вісь z – уздовж короткого.

$$\text{Тоді } \frac{\partial\psi_i}{\partial y} = \frac{\partial\varphi_i}{\partial y} + z\frac{\partial\zeta_i}{\partial y}, \quad \frac{\partial\psi_i}{\partial z} = \zeta_i(y).$$

Вибравши лінійні функції форми для φ_i та ζ_i та підставивши ці формули у функціонал енергії, отримаємо рівняння МСЕ з умови мінімуму цього функціоналу. Характеристики тонкостінного перерізу обчислюються за знайденими Ψ_i так само, як і в загальному випадку.

Під час чисельного визначення характеристик жорсткості застосовують трикутні та смугові скінченні елементи з полілінійною функцією форми, хоча можна використовувати й більш високоточні поліноми [64-67]. Задача визначення характеристик жорсткості значно ускладнюється під час розрахунку конструкцій у нелінійній постановці. Як правило, всі методи розв'язання нелінійних задач

ґрунтуються на розв'язанні рекурентної послідовності лінійних рівнянь. Для покрокових методів необхідно визначати для кожного кроку жорсткісні характеристики, що відповідають дотичним модулям деформації, а для методу січних жорсткісні характеристики, що відповідають модулям деформації. У цьому разі в разі нелінійних залежностей σ - ϵ модулі деформації за перерізом мають змінне значення і залежать від зусиль, що діють на переріз.

Алгоритм обчислення жорсткісних характеристик, що відповідають дотичним або січним модулям деформації, полягає в наступному:

- для заданого перерізу і заданих зусиль, що діють на переріз, на k -му кроці крокового методу або k -ій ітерації методу січних визначають положення центру ваги, поворот осей і кривизну перерізу (Y_c, β, ζ);

- на підставі знайдених Y_c, β, ζ , визначають деформації елементарних ділянок перерізу (прийнято гіпотезу плоских перерізів);

- для кожної ділянки визначається дотичний або січний модуль деформації;

- дотичні або січні жорсткісні характеристики визначають за формулами (4.1-4.15) для змінних за перерізом модулів деформації.

В програмному комплексі ЛІРА-САПР реалізовано підсистему «Конструктор перерізів» [68-70], яка дає змогу визначати весь набір жорсткісних характеристик для перерізу стержня, а для проведення нелінійного розрахунку - дотичні та січні жорсткісні характеристики. Конструктор перерізів ПК ЛІРА-САПР підтримує нелінійний розрахунок для заданого набору зусиль. Для підсистеми «Конструктор перерізів» розроблено інструменти, що дають змогу задати характеристики нелінійного деформування матеріалів і застосувати їх до елементів перерізу, що конструюється.

Реалізовано закони нелінійного деформування, що дають змогу моделювати арматурні сталі, смуговий і профільний прокат і бетони різних марок. Є можливість формування діаграми σ - ϵ в табличному вигляді. Результати введення для контролю динамічно відображаються в графічному вікні.

4.1.2. Методика поділених частин перерізу

В розділах 2 і 3 при аналізі результатів скінченно-елементного теплотехнічного розрахунку плоских моделей поперечних перерізів сталевих балок перекриття було встановлено закономірності нерівномірного розподілу температури по висоті перерізу. Це призводить до нерівномірної зміни жорсткісних характеристик перерізу та пружно-деформаційних характеристик сталі. Для оцінки несучої здатності сталевих балок перекриття в цьому дослідженні зниження вище описаних характеристик відбувалося відповідно до середньої температури в перерізу двотаврової сталевий балки. Така методика не враховує нерівномірний розподіл температури і відповідно нерівномірну зміну жорсткісних характеристик перерізу.

Для уточнення жорсткісних характеристик необхідно розділити двотавровий переріз сталевий балки на декілька ділянок і перерахувати жорсткісні характеристики перерізу з урахуванням понижуючих коефіцієнтів відповідно до середньої температури в кожній ділянці поперечного перерізу [71].

Для чисельного експерименту було прийнято використовувати сталевий двотавр перерізу ІРЕ 400 (даний переріз було використано в експериментальному дослідженні, яке описано в пункті 4.3 цього розділу). Для даного перерізу було виконано теплотехнічний розрахунок, результати якого було порівняно з результатами натурного експерименту в пункті 3.2.1 розділу 3. Результати розподілення температурних полів по висоті перерізу на часовій відмітці впливу в 60 хвилин зображено на рисунку 4.1.

На рисунку видно, що даний переріз можна розбити на 5 ділянок. В кожній ділянці було пораховано середню температуру. Відповідно цій середній температурі для кожної ділянки буде призначено свій понижуючий коефіцієнт модуля пружності.

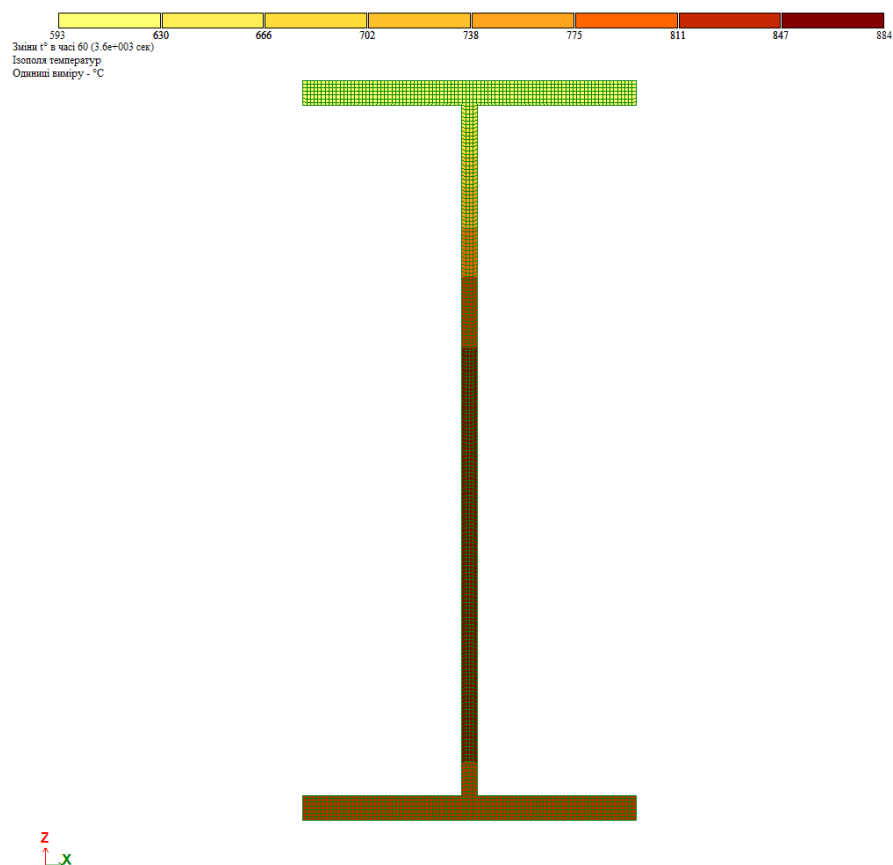


Рис. 4.1. Температурний розподіл в перерізі балки на відмітці часу в 60 ХВИЛИН

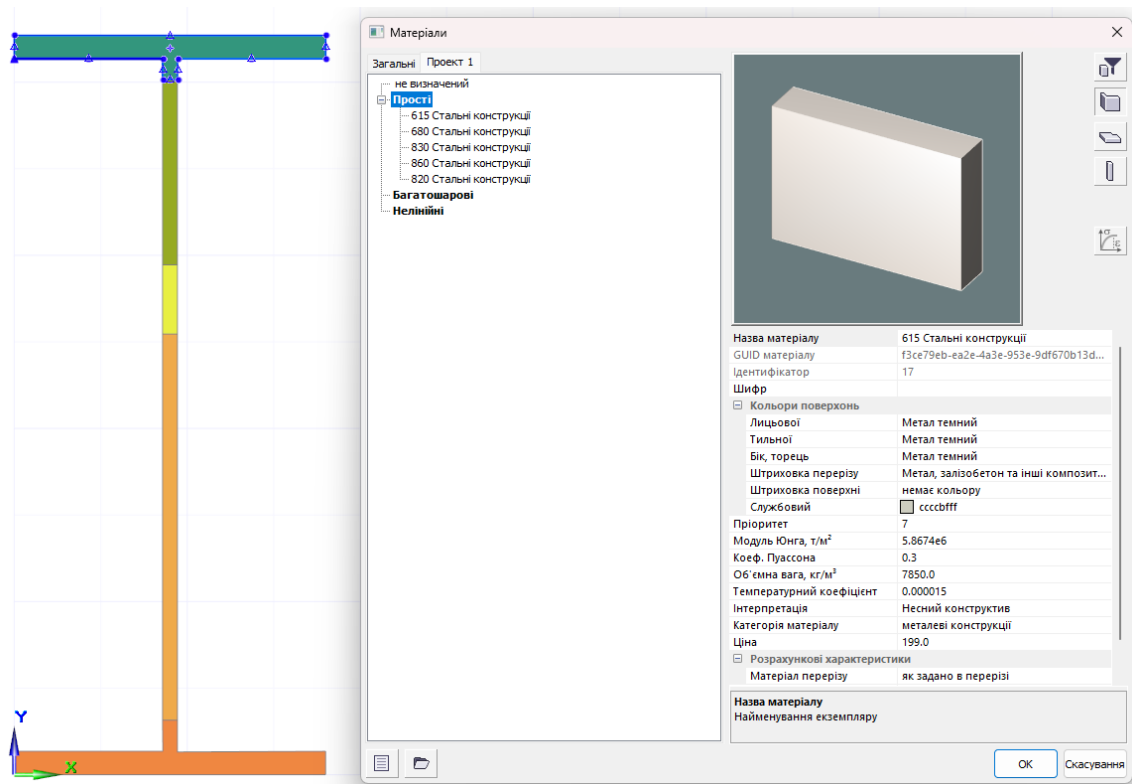


Рис. 4.2. Переріз балки, поділений на 5 ділянок

За допомогою модуля «Конструктор перерізів» в ПК ЛІРА-САПР [72] було створено модель перерізу сталевго двотавру і поділено його на 5 ділянок, як зображено на рисунку 4.2.

Середня температура i , відповідно, коефіцієнт пониження модуля пружності для кожної ділянки:

1. Ділянка 1 – 615°C , $k_{E,\theta,1} = 0,283$;
2. Ділянка 2 – 680°C , $k_{E,\theta,2} = 0,166$;
3. Ділянка 3 – 830°C , $k_{E,\theta,3} = 0,08325$;
4. Ділянка 4 – 860°C , $k_{E,\theta,4} = 0,0765$;
5. Ділянка 5 – 820°C , $k_{E,\theta,5} = 0,0855$.

Враховуючи критерій нерівномірного розподілу температури i , відповідно, зміни модуля пружності по висоті перерізу, за допомогою модуля «Конструктор перерізів» за методикою, описаною в пункті 4.1.1 цього розділу було обчислено приведені жорсткісні характеристики поперечного перерізу сталевго двотавра, які наведено в таблиці 4.1.

Після обчислення приведених жорсткісних характеристик перерізу, сталевий двотавр було імпортовано в ПК ЛІРА-САПР як спеціальний тип жорсткості. Було створено скінченно-елементну модель шарнірно спертої балки довжиною 4.7 метри (дана довжина балки відповідає довжині в експериментальному дослідженні, яке описано в пункті 4.3 цього розділу).

На стержень було прикладено навантаження, величиною 17 кН/м та навантаження від власної ваги балки. Після проведеного статичного скінченно-елементного розрахунку було отримано результати, які виражаються в деформаціях сталевго балки перекриття після 60 хвилин високого температурного впливу. Прогини балки наведено на рисунку 4.3.

Таблиця 4.1. Приведені жорсткісні характеристики сталевого двотавра

EA	26080 тс
EI _u	689,19 тс*м ²
EI _v	49,786 тс*м ²
EI _{uv}	0,26615 тс*м ²
EI _y	689,19 тс*м ²
EI _z	49,786 тс*м ²
ES _y	1833,8 тс*м
ES _z	422,62 тс*м
GJ _t	0,64226 тс*м ²
EI _w	1,485931 тс*м ⁴
GF _y	3849,3 тс
GF _z	4195,7 тс

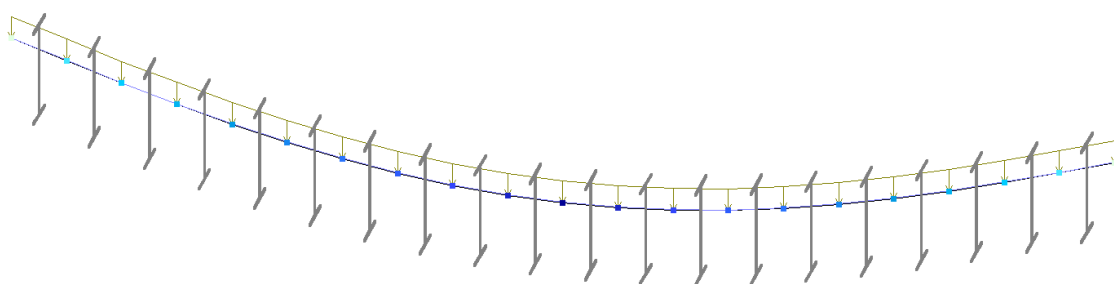
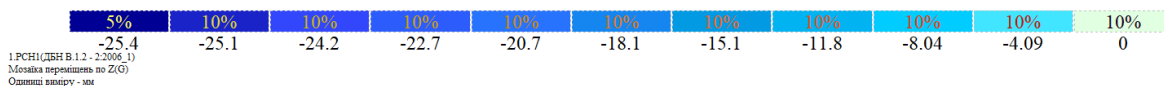


Рис. 4.3. Прогини в сталевій балці перекриття після 50-ти хвилин високого температурного впливу

Як видно з рисунку вище, максимальне значення прогину в сталевій балці перекриття з уточненням жорсткісних характеристик перерізу завдяки врахуванню нерівномірного розподілу температури по висоті перерізу складає 25.4 міліметри. Достовірність даної методики підтверджено в пункті 4.3, де описано результати натурального експерименту.

Перевагою цієї методики є можливість врахування нерівномірного розподілу температурних полів по висоті перерізу сталевієї балки перекриття, що призводить до нерівномірної зміни модуля пружності в перерізі. Проте недоліком є складність врахування даного аспекту в часі (необхідно створювати декілька моделей для різних часових відміток пожежі).

4.2. Оцінка методики ітераційного зниження жорсткості під впливом надвисоких температур

Методики оцінки межі вогнестійкості сталевих балок перекриття з врахуванням або без врахування вогнезахисних матеріалів, які були описані в цьому дослідженні дозволяють точно оцінити вогнестійкість конструкції на фіксованій відмітці часу. Проте вони не є досконалими, так як для визначення часу втрати несучої спроможності конструкції необхідно створювати декілька скінченно-елементних моделей для врахування пониження жорсткості на різних відмітках часу.

Для вирішення цієї проблеми в цьому дослідженні запропоновано використовувати методику ітераційного зниження жорсткості, яку було реалізовано в ПК ЛІРА-САПР. Дана методика полягає в покроковому зниженні жорсткісних характеристик перерізу відповідно до середньої температури по висоті перерізу на обраних часових відмітках температурного впливу.

Алгоритм чисельного розрахунку за цією методикою наступний:

1. Виконується теплотехнічний розрахунок поперечного перерізу конструкції з або без врахування вогнезахисних матеріалів.

2. За результатами теплотехнічного розрахунку визначаються середні значення температури в перерізі конструкції на часових відмітках температурного впливу (пожежі) з певним кроком, наприклад 10 хвилин.

3. Відповідно до середніх значень температури в поперечному перерізі конструкції для обраних часових відміток обчислюються коефіцієнти зниження модуля пружності $k_{E,\theta}$.

4. Відповідно кількості обраних часових відміток температурного впливу необхідно сформулювати завантаження. В кожному завантаженні призначаються відповідні коефіцієнти зниження модуля пружності $k_{E,\theta}$.

5. Виконується статичний скінченно-елементний розрахунок, за результатами якого можна оцінити прогини балки в кожному завантаженні (на кожній відмітці часу температурного впливу).

Таблиця 4.2. Середня температура та відповідні коефіцієнти зниження модуля пружності на обраних часових відмітках

Часова відмітка пожежі, хв	Середня температура в перерізі, °C	Коефіцієнт зниження модуля пружності $k_{E,\theta}$
0	20	1
10	216	0,884
20	403	0,697
30	528,5	0,51735
40	610,5	0,2911
50	679,5	0,1669
60	738,5	0,1146

Отже за результатами теплотехнічного розрахунку моделі вогнезахисної сталеві балки перекриття двотаврового перерізу ІРЕ 400, довжиною 4.7 метри, було встановлення значення середньої температури в поперечному перерізі на часових відмітках пожежі. Відповідно до цих значень було обчислено коефіцієнти

зниження модуля пружності. Значення середньої температури на різних часових відмітках пожежі з відповідними коефіцієнтами зниження модуля пружності наведено в таблиці 4.2.

Наступним кроком було створення скінченно-елементної стержневої моделі балки в ПК ЛІРА-САПР. В задачі було створено сім завантажень (відповідно обраним часовим відміткам пожежі), для кожного з якого було створено підзадачу як показано на рисунку 4.4. За допомогою функціоналу Підзадачі для кожного завантаження було призначено відповідний коефіцієнт зниження модуля пружності.

Навантаження, що діє на скінченні елементи дорівнює значенню, яке було описано в пункті 4.1.2 цього розділу – 17кН/м.

Після виконання статичного скінченно-елементного розрахунку шарнірно опертої сталевий балки перекриття з врахуванням покрокового зниження жорсткісних характеристик перерізу за допомогою знижуючого коефіцієнту модуля пружності, отримуємо результати у вигляді прогинів в балці, які вказані на рисунку 4.5, на зазначених часових відмітках температурного впливу.

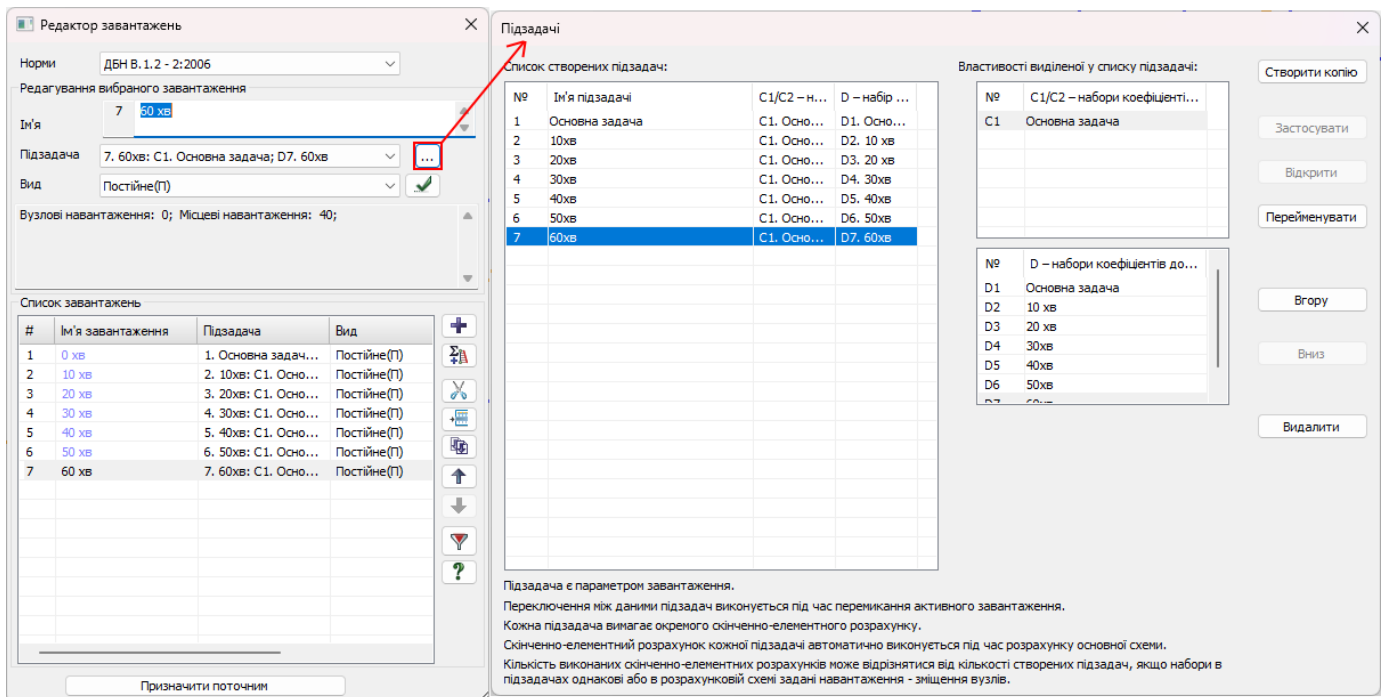
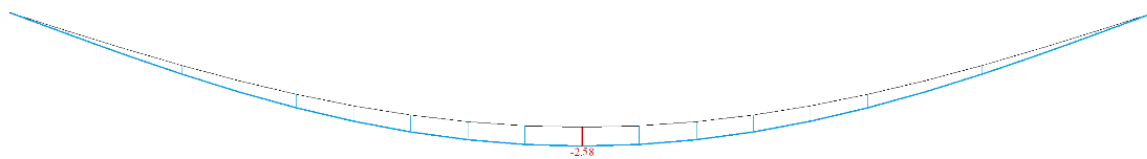


Рис. 4.4. Створення завантажень та підзадач для покрокового зниження модуля пружності в елементах сталевий балки перекриття

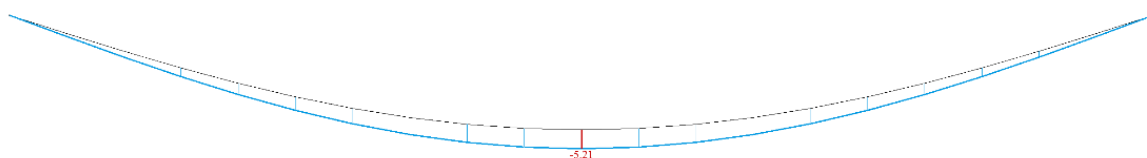
1.0 хл [1. Основна задача, C1. Основна задача, D1. Основна задача]
Етора параметра, Z1
Одиница виміру - мм



Z
мм, 0.000
Мінімальне значення -2.57581;

a

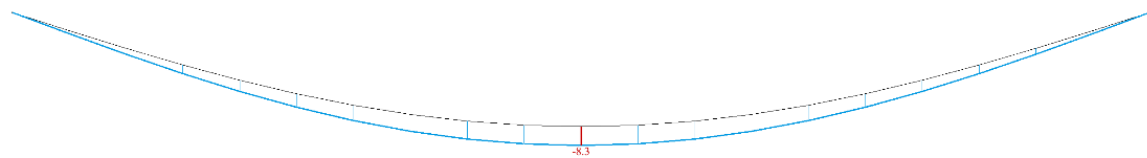
2.10 хл [2. 10хл: C1. Основна задача, D2. 10 хл]
Етора параметра, Z1
Одиница виміру - мм



Z
мм, 0.000
Мінімальне значення -5.21381;

б

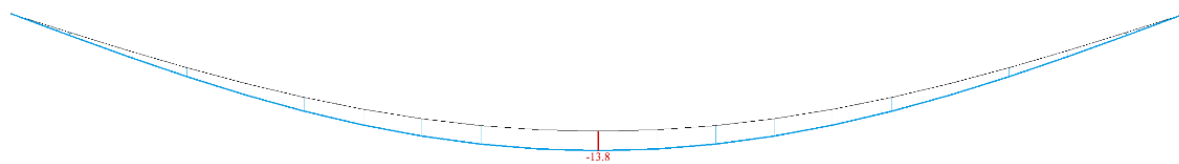
3.20 хл [3. 20хл: C1. Основна задача, D3. 20 хл]
Етора параметра, Z1
Одиница виміру - мм



Z
мм, 0.000
Мінімальне значення -8.28557;

в

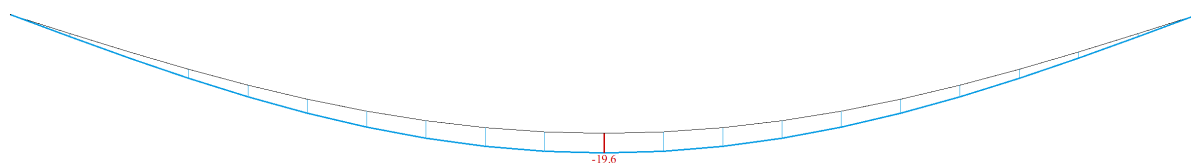
4.30 кв [4. 30кв: С1. Основна задача; D4. 30кв]
Единица перемещень Z1
Одиница виміру - мм



Z
Едм. 0.000
Минимальне значення -13.7885;

Г

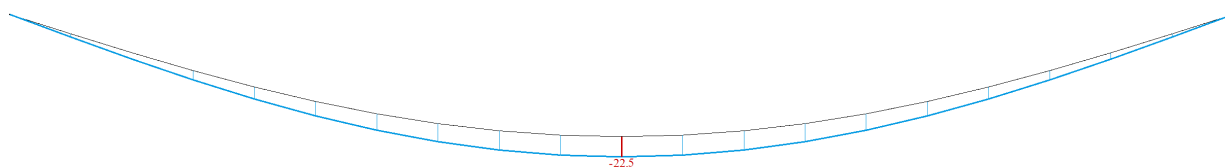
5.40 кв [5. 40кв: С1. Основна задача; D5. 40кв]
Единица перемещень Z1
Одиница виміру - мм



Z
Едм. 0.000
Минимальне значення -19.6307;

Г

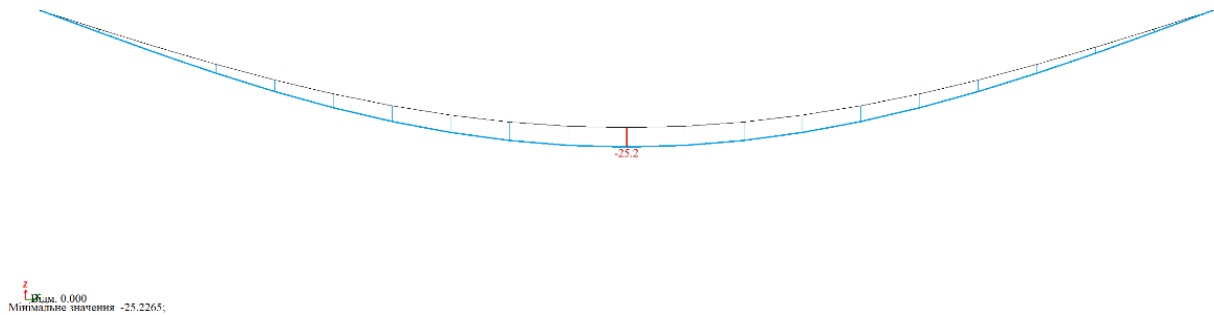
6.50 кв [6. 50кв: С1. Основна задача; D6. 50кв]
Единица перемещень Z1
Одиница виміру - мм



Z
Едм. 0.000
Минимальне значення -22.4854;

Д

7.60 хв [7. 60хв: С1. Основна задача; D7. 60хв]
 Единиця переміщення Z1
 Одиниці виміру - мм



е

Рис. 4.5. Результати статичного розрахунку сталевій балки перекриття з використанням ітераційної методики зниження жорсткості на часових відмітках пожежі: а – 0 хвилин; б – 10 хвилин; в – 20 хвилин; г – 30 хвилин; г – 40 хвилин; д – 50 хвилин; е – 60 хвилин

Результати статичного розрахунку сталевій балки перекриття за методикою ітераційного зниження жорсткості можна представити у покрокових прогинах балки на зазначених часових відмітках пожежі, які дорівнюють:

1. 0 хвилин – 2.38 міліметрів;
2. 10 хвилин – 5.21 міліметрів;
3. 20 хвилин – 8.3 міліметрів;
4. 30 хвилин – 13.8 міліметрів;
5. 40 хвилин – 19.6 міліметрів;
6. 50 хвилин – 22.5 міліметрів;
7. 60 хвилин – 25.2 міліметрів.

Перевагою цієї методики є те, що можна проаналізувати прогини в нагрітій навантаженій балці на різних часових відмітках пожежі в одній задачі. Аналіз результатів відбувається аналогічно аналізам результатів деформацій будь-якої моделі кнструкції по завантаженням. Недоліком цієї методики є те, що наразі ПК ЛІРА-САПР не має можливості врахувати термповзучість сталі і тому виконати перевірку сталевих перерізів за 1-м та 2-м граничними станами, а також місцевої

стійкості перерізу з врахуванням термонапруженності конструкції в часі неможливо.

4.3. Порівняння розрахункових деформацій сталевих балок із деформаціями, зареєстрованими під час випробувань

Чисельні розрахунки, описані в пунктах 4.1 та 4.2 цього розділу, було виконано на основі натурального експерименту, який було проведено та описано Ковальовим А.І. [73].

Об'єктом натурального експерименту було обрано сталеву балку перекриття двотаврового перерізу ІРЕ 400 (приведена товщина складає 5,309 міліметри, коефіцієнт перерізу $A_m/V=188,4\text{м}^{-1}$) довжиною 4.7 метри. Балка покрита вогнезахисною фарбою шаром товщиною 1,173 міліметри.

Перед прогрівом балка була навантажена двома бетонними блоками по 730 та 264 кг по всій довжині. Експеримент було проведено при температурі повітря 27°C та відносній вологості повітря 54%.

Схема поперечного перерізу балки з прикладеним на неї навантаженням зображено на рисунку 4.6.

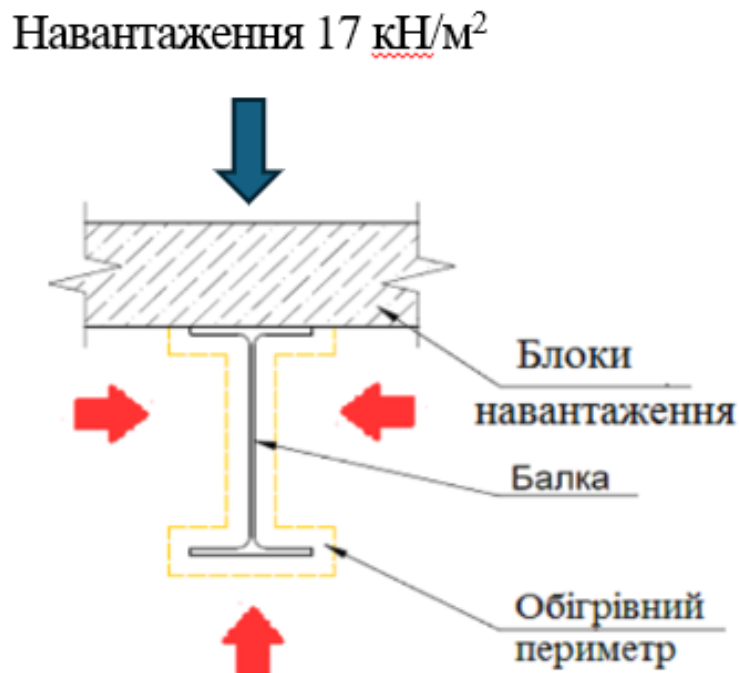


Рис. 4.6. Схема навантаження балки

Результати температурного розподілу по перерізу сталевій балки та порівняння їх з результатами чисельного теплотехнічного розрахунку наведено в пункті 3.2.1 розділу 3.

В своєму дослідженні Ковальов А.І. порівнював результати деформацій навантаженої балки при температурному впливі з результатами чисельного дослідження, проведеного в ПК ЛІРА-САПР. Відмінністю між дослідженням Ковальова А.І. та наведеним дослідженням є те, що в роботі Ковальова А.І. моделювання сталевій балки перекриття для виконання теплотехнічного та статичного розрахунків виконувалося в об'ємній постановці: тобто сталеві балка була змодельована за допомогою пластинчатих скінченних елементів. Такий підхід без сумніву дозволяє дуже детально проаналізувати деформації в термонапруженій конструкції в повній мірі, проте має певні недоліки, такі як складність в моделюванні та застосуванні таких моделей для вирішення інженерних задач в проектуванні.

В представленій дисертаційній роботі в пунктах 4.1 та 4.2 статичний скінченно-елементний розрахунок було виконано для стержневої моделі балки. Використання стержневої моделі дозволяє швидко та просто моделювати будівельні конструкції (звісно, з певними спрощеннями) та використовувати їх для вирішення інженерних задач в проектуванні.

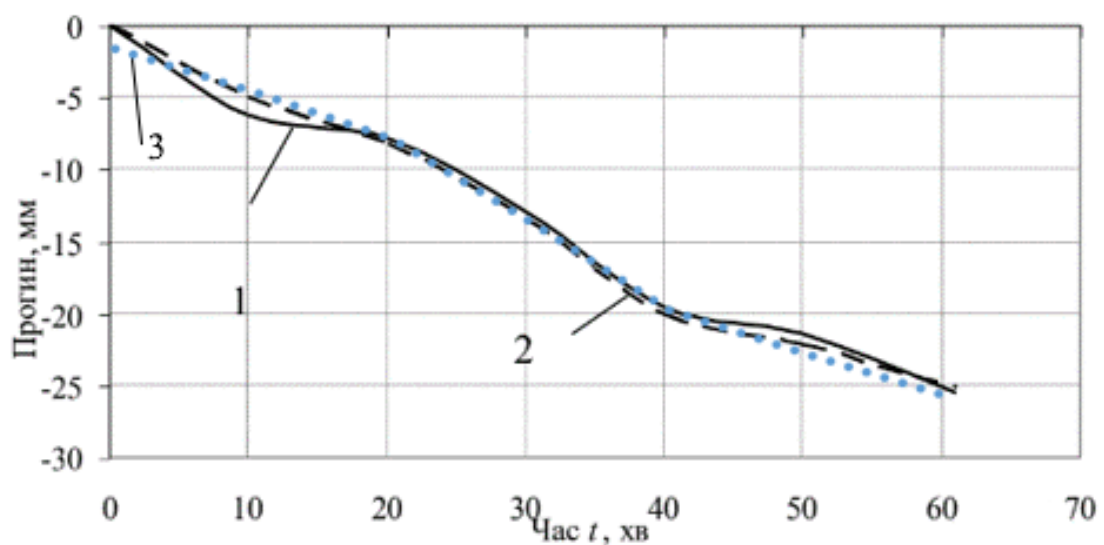


Рис. 4.7. Прогини навантаженої балки: 1 – експеримент; 2 – чисельний розрахунок пластинчатої моделі; 3 – чисельний розрахунок стержневої моделі

На рисунку 4.7 показано графік результатів прогинів в сталевій балці перекриття при проведенні натурного та чисельних експериментів, де модель термонапруженої балки була виконана за допомогою пластинчатих та стержневих скінченних елементів.

Якщо порівняти дані результати з результатами чисельного розрахунку стержневої моделі балки за методикою ітераційного зниження жорсткості то можна зробити висновок, що похибка результатів складає менше 3%, що дає підстави вважати запропоновану методику ітераційного пониження жорсткості достовірною.

Отже приймаючи до уваги запропоновані в цьому розділі методики, остаточний алгоритм розрахунку сталевих балок на вогнестійкість, розроблений в цій дисертаційній роботі, можна описати наступним чином:

1. Виконання теплотехнічного розрахунку

- 1.1. Створення моделі поперечного перерізу сталеві балки за допомогою скінченних елементів теплопровідності.

- 1.2. Вибір температурного режиму пожежі

- 1.3. Вибір тривалості високотемпературного впливу.

- 1.4. Вибір типу та товщини шару вогнезахисного матеріалу.

- 1.5. Призначення лінійних або визначення та призначення нелінійних теплофізичних властивостей матеріалам конструкції та вогнезахисним матеріалам.

- 1.6. Отримання результатів теплотехнічного розрахунку у вигляді розподілення температури по перерізу сталеві балки на заданих часових відмітках пожежі.

2. Виконання статичного розрахунку.

- 2.1. Побудова тестові стержневої скінченно-елементної моделі сталеві балки.

- 2.2. Зниження жорсткісних характеристик перерізу: варіант 1 – за середнім значенням температури на обраній часовій відмітці; варіант 2 – з уточненням жорсткісних характеристик в перерізі на обраній часовій відмітці за методикою поділених частин перерізу; варіант 3 – за середнім значенням температури на

декількох обраних часових відмітках за методикою ітераційного зниження жорсткості.

2.3. Отримання результатів статичного скінченно-елементного розрахунку у вигляді вертикальних деформацій (прогину) балки для варіантів 1 і 2 на обраній часовій відмітці пожежі, для варіанту 3 – на кількох обраних часових відмітках пожежі.

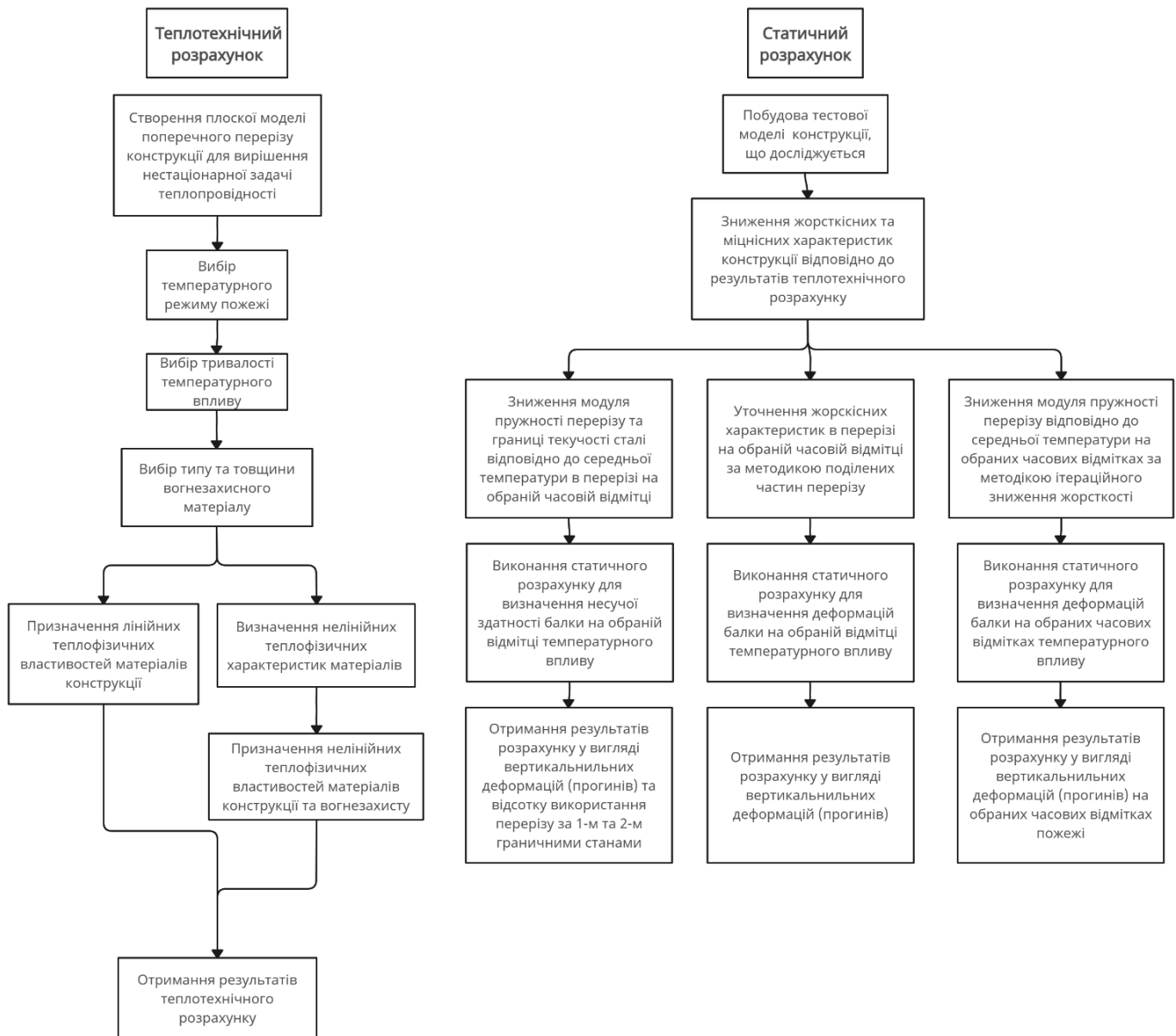


Рис. 4.8. Алгоритм визначення межі вогнестійкості сталевій балки перекриття

Отже даний алгоритм можна вважати достовірним та зручним у використанні для вирішення інженерно-проектних задач по оцінці межі вогнестійкості сталевих балок перекриття. Даний алгоритм можна адаптувати для

оцінки інших сталевих та залізобетонних конструкцій, проте необхідно враховувати критерії роботи цих конструкцій. Алгоритм оцінки межі вогнестійкості сталевих балок перекриття з врахуванням їх критеріїв роботи та вогнезахисних матеріалів показано на рисунку 4.8.

4.4. Висновки до розділу 4.

За результатами проведеної в розділі 4 роботи можна зробити наступні висновки:

1. Розроблено методологічний підхід врахування нерівномірного розподілу температур по висоті перерізу за допомогою удосконаленої розрахункової схеми з уточненими характеристиками перерізу через розділення перерізу на ділянки. Порівняння чисельних результатів досліджень і даних натурного експерименту дала високе співпадіння (3%).

2. Розроблено та запропоновано нову методику ітераційного зниження жорсткостей. Дана методика дозволяє в одній задачі оцінити деформації конструкції на різних часових відмітках пожежі.

3. Порівняно результати чисельних розрахунків та натурного експерименту. Відмінність складає менше 3 %, з чого можна зробити висновок, що запропоновані методики дозволяють достовірно оцінити ступень вогнестійкості навантажених сталевих конструкцій.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Підсумовуючи проведену роботу в цьому дисертаційному дослідженні можна зробити наступні загальні висновки:

1. Сталеві несучі конструкції, особливо згинальні, такі як балки перекриття схильні до значного ураження та швидкої втрати несучої здатності внаслідок високих температурних впливів (пожежі), якщо не виконувати роботи по облаштуванню вогнезахисту;

2. Традиційні способи проектування вогнезахисту є дієвими проте базуються на експериментальних методах оцінки ступеню вогнестійкості: виробники вогнезахисних матеріалів проводять експериментальні вишукування для оцінки межі вогнестійкості вогнезахисних матеріалів, проте дані натурні експерименти не є універсальними для всі типів конструкцій;

3. Сучасні експериментальні методи оцінки ступеню вогнестійкості дозволяють точно оцінити вогнестійкість конструкції, проте мають певні недоліки, такі як ціна та складність проведення експерименту, а також обмеження по величині конструкцій;

4. Сучасні аналітичні методи оцінки ступеню вогнестійкості дозволяють швидко оцінити вогнестійкість конструкції. За результатами аналітичної оцінки можна обрати тип та товщину вогнезахисного матеріалу. Проте дані методи не враховують суттєві аспекти роботи конструкції під час впливу пожежі, такі як нерівномірний розподіл температури по перерізу конструкції;

5. Існує необхідність у розвитку чисельних методик, побудованих на чисельних методах, таких як МСЕ для того, щоб перекрити недоліки попередніх методів. Сучасні чисельні методи потребують адаптації для вирішення задач цього дослідження та експериментального підтвердження.

6. Розвинуто методику чисельного моделювання для вирішення задачі нестационарної теплопровідності. Проведено чисельний експеримент оцінки межі вогнестійкості сталеві балки перекриття при високотемпературному впливі.

7. Підтверджено закономірності розподілення температур в сталевих балках перекриття без вогнезахисту під час пожежі з урахуванням тепловіддачі при

вирішенні задачі нестационарної теплопровідності використовуючи метод скінченних елементів.

8. Встановлено закономірність розподілення температур по висоті перерізу сталевих балок з обпертими на них монолітних залізобетонних плит. Виявлено характер відбору та передачі тепла від окремої сталеві балки до залізобетонних плит, що показало нерівномірне розподілення температурних полів по висоті перерізу балок. Тепловіддача від сталеві балки до залізобетонної плити призвела до виникнення різниці температур в нижній і верхній полицках двотаврових сталевих балок до 200 °С.

9. Порівняно результати чисельного розрахунку, проведеного за МСЕ у вітчизняному програмному комплексі ЛПА-САПР з результатами аналогічного розрахунку в ANSYS FLUENT. Різниця результатів теплотехнічного розрахунку, які представляють собою розподілення температурних полів по перерізу, складає менше 3%.

10. Виявлені закономірності розподілення температур по висоті балки та врахування зміни модуля пружності-деформації сталі під час пожежі підтвердило втрату несучої спроможності сталеві балки. Встановлено часовий критерій роботи сталевих балок після впливу високих температур до 15 хвилин пожежі за 1-м граничним станом експлуатаційних навантажень. Прогини балки на тестовій моделі досягають нормативних значень при недонапруженні конструкцій. Встановлено часові критерії роботи сталевих балок під час пожежі за критеріями несучої здатності.

11. Формалізовано і узагальнено алгоритм визначення нелінійних властивостей матеріалів конструкцій та вогнезахисту за методиками, представленими в Єврокодi 2 і 3 та за допомогою вирішення оберненої задачі теплопровідності. Даний алгоритм було використано в чисельних дослідженнях.

12. Проведено чисельний розрахунок скінченно-елементної моделі сталеві балки перекриття з врахуванням вогнезахисної реактивної фарби. Отримані результати теплотехнічного розрахунку було порівняно з результатами натурного

експерименту. Розходження результатів склало менше 5%, що підтверджує достовірність методологічного підходу виконання теплотехнічного розрахунку.

13. Виконано теплотехнічний розрахунок сталеві балки перекриття з врахуванням різних вогнезахисних матеріалів та вогнезахисних плит різної компоновки із врахуванням нелінійної зміни теплофізичних властивостей матеріалів. Встановлено закономірність нерівномірного розподілу температурних полів по висоті перерізу балки. Встановлено, що під час нерівномірного розподілення температур по висоті перерізу більш точний результат можна отримати через вдосконалення чисельної моделі перерізу, яка враховує уточнення жорсткісних характеристик перерізу через нерівномірну зміну модуля пружності. Виявлено закономірності деформування сталевих балок в залежності від типу та товщини вогнезахисних матеріалів під час пожежі.

14. Порівняно результати чисельних досліджень з врахуванням лінійної і нелінійної роботи матеріалів. Порівняння показало необхідність виконання розрахунків з врахуванням нелінійних властивостей матеріалів (сталі і бетону), що відкрило додаткові резерви несучої спроможності сталевих балок при дії високих температур.

15. Розроблено методологічний підхід врахування нерівномірного розподілу температур по висоті перерізу за допомогою методики поділених частин перерізу, яка представляє собою розділення перерізу на ділянки для врахування по-частинного зниження жорсткісних характеристик перерізу.

16. Запропоновано методику ітераційного зниження жорсткостей, яка дозволяє в одній задачі оцінити деформації конструкції на декількох часових відмітках пожежі одночасно (в одній моделі).

18. Порівняно результати чисельних розрахунків та натурального експерименту. Розбіжність складає менше 3 %, з чого можна зробити висновок, що запропоновані методики дозволяють достовірно оцінити межу вогнестійкості навантажених сталевих балок перекриття.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Аналітична довідка про пожежі та їх наслідки в Україні за 12 місяців 2023 року. URL: <https://idundcz.dsns.gov.ua/upload/2/0/1/8/2/6/2/analychna-dovidka-pro-pojeji-122023.pdf>
2. Бушев В.П., Пчелинцев В.А., Федоренко В.С., Яковлев А.Я. Огнестойкость зданий. — М.: Стройиздат, 1970,. - 264 с.
3. Якими матеріалами можна проводити вогнезахист металоконструкцій? URL: <https://uscc.ua/kakimi-materialami-mozhno-provodit-ognezashchitu-metallokonstruktsiy>
4. Ковальов А.І., Пурденко Р.Р., Отрош Ю.А., Томенко В.І., Качкар Є.В., Майборода Р.І. Оцінювання вогнестійкості вогнезахищених сталевих балок. ВІСТІ Донецького гірничого інституту. 2022. №2 (51). С.43-53.
5. ДСТУ Б В.1.1-4-98. Захист від пожежі. Будівельні конструкції. Методи випробувань на вогнестійкість. Загальні вимоги. – [Чинні від 2006-01-01]. – К.: Держбуд України, 1999. – (Державний стандарт України).
6. ДСТУ EN 1363-1:2023. Випробування на вогнестійкість. Частина 1. Загальні вимоги (EN 1363-1:2020, IDT). -[Чинні від 2023-03-01]. – К.: ДП «УкрНДНЦ», 2023. – (Державний стандарт України).
7. Яковлев А.И., Бушев В.П., Олимпиев В.Г. Руководство по испытанию строительных конструкций на огнестойкость.- М.: ВНИИПО, 1980, 51с.
8. Kovalov A., Otrosh Yu., Vedula S., Danilin O., Kovalevska T. Parameters of fire-retardant coatings of steel constructions under the influence of climatic factors. Науковий вісник Національного гірничого університету. 2019. №3. Р. 46-53.
9. Maiboroda R., Otrosh Y., Rashkevich N., Melezhyk, R. Assessment of the fire resistance of buildings from fireproof reinforced concrete building structures. Municipal Economy of Cities. 2023. № 4(178). Р. 219–231.
10. Ковальов А.І., Отрош Ю.А., Пурденко Р.Р., Томенко В.І. Дослідження вогнестійкості захищених реактивною вогнезахисною речовиною сталевих будівельних конструкцій. Пожежна безпека. 2022. №41. Ст. 57-66.

11. Голоднов О.І., Антошина Т.В., Отрош Ю.А. Про необхідність розрахунку будівель зі сталевим каркасом на температурні впливи. Збірник наукових праць Українського інституту сталевих конструкцій імені В. М. Шимановського. 2017. Вип. 20. Ст. 65-84.
12. Прокофєв О.І., Демчина Б.Г., Шналь Т.М., Лоза М.З., Шевчук А.О.. Посібник з основ теорії горіння : Навч. Посібник. Національний ун-т Львівська політехніка.— Львів : Видавництво Національного ун-ту Львівська політехніка, 2002. 108с.
13. Сур'янінов М.Г., Отрош Ю.А., Балдук, І.Ф. Дадашов П.Г. Експериментальні та комп'ютерні дослідження залізобетонних колон за високих температурних впливів. Наука та інновації. 2020. Т. 16, № 2. — С. 55-61.
14. Фомін С. Л., Бутенко С. В., Поклонський В. Г. Бетонні та залізобетонні конструкції, що призначені для роботи за умов впливу підвищених і високих температур. Наука та будівництво. 2016. № 4. С. 24-31.
15. ДБН В.1.1-7-2016. Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. — [Чинні від 2017-06-01]. — К.: Мінрегіонбуд України, 2016. — 39 с. — (Державні будівельні норми).
16. ДСТУ-Н Б EN 1993-1-2:2010. Єврокод 3. Проектування сталевих конструкцій. Частина 1-2. Загальні положення. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість (EN 1993-1-2:2005, IDT). - [Чинні від 2013-07-01]. — К.: Мінрегіонбуд України, 2010. — 106 с. — (Державний стандарт України).
17. Калафат К.В, Білик А.С, Біляєв М.А., Ковалевська Е.А. Розрахунок сталевих конструкцій на вогнестійкість відповідно до Єврокоду 3. Практичний посібник до ДСТУ-Н EN 1993-1-2:2010. Київ: Український Центр Сталевого Будівництва, 2016. 81 с.
18. Вайнберг Д.В., Городецкий А.С., Киричевский А.С. Метод конечного элемента в механике деформированных тел. Прикладная механика, т. 8, вып. 8, 1972.
19. Клованич С.Ф. Метод конечных элементов в нелинейных задачах инженерной механики. Запорожье: Издательство журнала «Світ геотехніки», 2009, — 400 с.
20. Зенкевич О.С. Метод конечных элементов в технике. Монография. — Перевод с английского. — М.: Мир, 1975. — 543 с.

21. Павленко І.В. Метод конечных элементов в задачах сопротивления материалов и линейной теории упругости. Сумы: Изд-во СумГУ, 2006. – 148 с.
22. Перельмутер А.В., Сливкер В.И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. - 2.изд., перераб. и доп. - К. : Сталь, 2002. - XVIII, 600 с.
23. Стренг Г., Фикс Д. Теория метода конечных элементов. — М.: Мир, 1977. — 349 с.
24. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. — М.: Мир, 1979. — 392 с.
25. Барабаш М.С., Ковальов А.І., Ромашкіна М.А. Розрахункове оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних будівельних конструкцій засобами ПК «ЛІРА-САПР». Будівельні конструкції. Теорія і практика. 2023. №12. С. 53-64.
26. Колякова В.М., Божинський М.О., Фесенко О.А. Розподіл температури в перерізі залізобетонної плити. Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві. 2016. № 5. С. 232-239.
27. Башинська О.Ю. Створення розрахункових моделей будівельних конструкцій при врахуванні реологічних властивостей залізобетону : дис. канд. техн. наук : 05.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди / Національний авіаційний університет – Київ, 2019. – 152 с.
28. Ding Jun, Li Guo-Qiang, Sakumoto Y. Parametric studies on fire resistance of fire-resistant steel members. *Constructions Steel Research*, 2004. 60 №7. p. 1007-1027.
29. Zhongqiang Wang, Miao Chen, Yong Liao. Analysis of Fire Resistance of Prestressed Concrete T-Beam Based on ABAQUS Numerical Simulation. *Applied Sciences*. 2023. №13 (8). 4683. P. 1-15.
30. Puneet Kumar, Venkatesh R. Kodur. A Rational Approach for Fire-Resistance Evaluation of Double-Tee, Prestressed Concrete Slabs in Parking Structures. *PCI Journal*. 2020. №65 (2). P. 20-41.
31. Ji-Hu Choi, Dal-Hun Yang, Seung-Jai Choi, Seong-Tae Yi. Fire resistance of bi-directionally prestressed concrete under extreme fire loading. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings*. 2021. №174 (3). P. 1-43.

32. Зенкевич О.К. Метод конечных элементов: от интуиции к общности. Сб. переводов «Механика». М.: Мир, 1970. №6. С. 90-103.
33. Зенкевич О., Морган К. Конечные элементы и аппроксимации. — М.: Мир, 1986. — 318 с.
34. Connor J.J., Brebbia C.A. Finite element techniques for fluid flow. — London: Butterworth & Co, 1976. — 308 p.
35. Марчук Г. И., Агошков В. И. Введение в проекционно-сеточные методы. — М.: Наука, 1981. — 416 с.
36. Mitchell R.A., Wait A.R. The finite element method in partial differential equations — London: A Wiley-Interscience publication, 1977. — 208 p.
37. Douglas H. Norrie, Gerard de Vries. The finite element method. Fundamentals and Applications — New-York: Academic press, 1973. — 342 p
38. Granino A. Korn, Theresa M. Korn Mathematical Handbook for Scientists and Engineers – New York: Dover Civil and Mechanical Engineering, 1961. – 1152 p.
39. Richard Courant, David Hilbert. Methods of Mathematical Physics. Vol. 1. – M.-New-York: Interscience Publishers, 1953. – 560 p.
40. Лаптев Г.Ф. Элементы векторного исчисления. – М.: Наука, 1975. – 336 с.
41. Clive A.J. Fletcher. Computational Techniques for Fluid Dynamics. Vol. 1. — Berlin: Heidelberg, 1991. — 401 p.
42. Шабров Н. Н. Метод конечных элементов в расчетах деталей тепловых двигателей. — Л.: Машиностроение, 1983. — 212 с.
43. Михлин С.Г. Прямые методы в математической физике. – М.: Гостехиздат, 1950.
44. Смирнов В.И. Курс высшей математики. Т.II, - М.: Наука, 1974. – 665 с.
45. George E. Forsythe, Michael A. Malcolm, Cleve B. Moler. Computer Methods for Mathematical Computations. – New Jersey: Prentice Hall, 1977. – 270 p.
46. ДСТУ-Н Б EN 1991-1-2:2010. Єврокод 1. Дії на конструкції. Частина 1-2. Загальні дії. Дії на конструкції під час пожежі (EN 1991-1-2:2002, IDT). - [Чинні від 2014-07-01]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2011. – 74 с. – (Державний стандарт України).

47. ДСТУ-Н Б В.2.6-211:2016. Проектування сталевих конструкцій. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість. - [Чинні від 2014-04-01]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2016. – 147 с. – (Державний стандарт України).
48. ГОСТ 26020-83. Двутавры стальные горячекатанные с параллельными гранями полок. Сортамент.
49. S. Bilyk, O. Bashynska, O. Bashynskyi. Determination of changes in thermal stress state of steel beams in LIRA-SAPR software. *Strength of Materials and Theory of Structures*. Київ, 2022. Вип.108. С. 182-202.
50. Стренг Г., Фікс Дж., Теорія методів кінцевих елементів. – М.: Мир, 1977. 352 с.
51. ДСТУ 3436-96 Швеллеры стальные горячекатаные. Сортамент (ГОСТ 8240-97)
52. ДСТУ-Н Б EN 1992-1-2:2012. Єврокод 2. Проектування залізобетонних конструкцій. Частина 1-2. Загальні положення. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість (EN 1992-1-2:2004, IDT). – [Чинні від 2013-07-01]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2012. – 135 с. – (Державний стандарт України).
53. Инструкция по расчету фактических пределов огнестойкости металлических конструкций. - М.: ВНИИПО - 1983. - 115 с.
54. ДСТУ EN 13381-4:2022. Методи випробування для визначення впливу на вогнестійкість елементів конструкцій. Частина 4. Пасивні вогнезахисні матеріали для сталевих конструкцій (EN 13381-4:2013, IDT). – [Чинні від 2023-06-01]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2022. – 135 с. – (Державний стандарт України).
55. Кужидловський К., Лобур М.М., Фармага І.В., Матвійків О.М. Інформаційно-розрахунковий метод для визначення теплофізичних характеристик композитних матеріалів. Комп'ютерні системи проектування. Теорія і практика. 2010. №685. С. 51-54.
56. Sadkovyi, V., Andronov, V., Semkiv, O., Kovalov, A., Rybka, E., Otrosh, Yu. et. al.; Sadkovyi, V., Rybka, E., Otrosh, Yu. (Eds.) (2021). Fire resistance of reinforced concrete and steel structures. Kharkiv: PC Technology center, 180.
57. Kovalov A., Slovinskyi V., Udianskyi M., Ponomarenko I., Anszczak M. Research of fireproof capability of coating for metal constructions using calculation-experimental method. In *Materials Science Forum*. 2020. Vol. 1006 MSF. P. 3–10.

58. Офіційний сайт української компанії виробника вогнезахисних облицювань Ammokote. URL: <https://ammokote.com/uk/>
59. Башинський О.В., Башинська О.Ю. Аналіз напружено-деформованого стану вогнезахисної сталеві балки перекриття. Будівельні конструкції. Теорія і практика. Київ, 2023. Вип.12. С. 126-138.
60. Лурье А.И. Теория упругости. М.: Наука, 1970. 547 с.
61. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория упругости. М.: Наука, 1987. 246 с.
62. Фиалко С.Ю., Лумельский Д.Е. О численном решении задачи кручения и изгиба призматических стержней произвольного поперечного сечения. Математичні методи та фізико–механічні поля. 2012. Т. 55, №2. С. 156–169.
63. Барабаш М.С. Комп'ютерні технології проектування металевих конструкцій / М.С. Барабаш, С.В. Козлов, Д.В. Медведенко // Навчальний посібник. З грифом МОН України. Лист № 1/11-1378 від 18.02.11 р. – К.:НАУ, 2012. – 572 с.
64. Молчанов И.Н., Николенко Л.Д., Филоненко Ю.Б. Решение задачи Неймана для уравнения Пуассона методом конечных элементов. Межведомственный научный сборник «Вычислительная и прикладная математики». 1977. Вып. 33. С. 137–143.
65. Биргер И.А., Пановко Я.Г. Прочность, устойчивость, колебания. Т.1. М.: Машиностроение, 1968. 831 с.
66. Баженов В. А. Будівельна механіка. Комп'ютерні технології: Підручник / В. А. Баженов, А. В. Перельмутер, О. В. Шишов.– К.: Каравела, 2009. – 696 с.
67. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. М.: Наука, 1975. 576 с.
68. Городецкий А.С., Барабаш М.С. Учет нелинейной работы железобетона в ПК ЛИРА–САПР. Метод «Инженерная нелинейность». Международный научный журнал: International Journal for Computational Civil and Structural Engineering (Международный журнал по расчету гражданских и промышленных конструкций). 2016. Т. 2, №12. С. 92–98.
69. Барабаш М.С., Сорока М.М., Сур'янінов М.Г. Нелінійна будівельна механіка з ПК ЛІРА–САПР. Монографія. Одеса: Екологія, 2018. 248 с.
70. Барабаш М.С. Компьютерное моделирование процессов жизненного цикла объектов строительства. Монография. К.: «Сталь», 2014. 301 с.

71. Башинський О.В. Оцінка несучої здатності сталевій балки перекриття в умовах високих температурних впливів. Наука та будівництво. Київ, 2024. Том 39 №1 (2024). С. 72-78.
72. Офіційна сторінка компанії LIRALAND Group. Конструктор перерізів універсальний. URL: https://www.liraland.ua/lira/systems/section_designer.php
73. Ковальов А.І., Отрош Ю.А., Рашкевич Н.В., Рудаков С.В., Томенко В.І., Юрченко С.П. Оцінка вогнестійкості вогнезахисних сталевих конструкцій для забезпечення пожежної безпеки об'єктів. Problems of emergency situations. 2023. №1 (37). С. 282-292.

ДОДАТОК А.
ДОВІДКИ ПРО ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНУ АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ
ДИСЕРТАЦІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ



ЛІРА САІПР

Товариство з обмеженою
відповідальністю «ЛІРА САІПР»
Україна, 04053, м. Київ, Киянівський
провулок, 7-а
Т./ф.+38(044) 590-58-86,
e-mail: info@liraland.com.ua
<http://www.liraland.ua>

Дата 12.06.24 № 73

ДОВІДКА

про експериментальну апробацію результатів дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня доктора філософії на тему «Створення та критерії роботи конструктивних моделей сталевих балок із вогнезахистом» за спеціальністю 192 – Будівництво та цивільна інженерія аспіранта кафедри металевих та дерев'яних конструкцій КНУБА, Башинського Олексія Володимировича

Результати дисертаційного дослідження Башинського Олексія Володимировича було використано при розробці та реалізації моделей вогнезахисних будівельних конструкцій (вогнезахисної сталеві балки, сталеві колони) в лінійній та нелінійній постановці.

Назва апробованих результатів:

1. Розроблена методика для розрахункового оцінювання вогнестійкості вогнезахисних сталевих будівельних конструкцій дозволяє моделювати вогневий та механічний вплив на вогнезахиснену конструкцію з достатньою для інженерних розрахунків точністю.
2. Розроблені комп'ютерні моделі теплового та напружено-деформованого стану вогнезахисних конструкцій дозволяють враховувати теплофізичні та механічні властивості матеріалів, з яких складається конструкція, нелінійні закони деформування матеріалів моделі, міцнісні та деформаційні властивості матеріалів при впливі пожежі.
3. Проведено верифікацію точності розроблених скінчено-елементних моделей вогнезахисного багатопустотного залізобетонного перекриття з натурними експериментальними дослідженнями.

Завдяки впровадженню результатів дисертаційної роботи Башинського Олексія Володимировича вдалося підвищити ефективність надання послуг у сфері розрахунку і проектування будівельних конструкцій, в тому числі і вогнезахисних.

Директор
ТОВ «ЛІРА-САІПР»



М.С. Барабаш