

ХАРКІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БУДІВНИЦТВА ТА
АРХІТЕКТУРИ

БЕРЕСТЯНСЬКА СВІТЛАНА ЮРІЇВНА

УДК 624.073:624.012.44:624.042.5

**НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН СТАЛЕБЕТОННИХ ПЛИТ ПРИ СИЛОВИХ І
ТЕМПЕРАТУРНИХ ВПЛИВАХ**

05.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків-2002

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі будівельної механіки та гідравліки Української державної академії залізничного транспорту Міністерства транспорту України.

Науковий керівник:

- доктор технічних наук, професор
Чихладзе Елгуджа Давидович, завідувач кафедри будівельної механіки та гідравліки Української державної академії залізничного транспорту.

Офіційні опоненти:

- доктор технічних наук, професор
Яременко Олександр Федорович, завідувач кафедри будівельної механіки Одеської державної академії будівництва та архітектури Міністерства освіти і науки України;
- кандидат технічних наук, доцент
Стельмах Олег Адамович, заступник начальника кафедри пожежної профілактики Академії пожежної безпеки України Міністерства внутрішніх справ України.

Провідна установа:

- Харківська державна академія міського господарства, кафедра будівельних конструкцій, Міністерства освіти і науки України, м. Харків.

Захист відбудеться 18.02 2003 р. о 15⁰⁰ год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.056.04 при Харківському державному технічному університеті будівництва та архітектури (61002, м. Харків, вул. Сумська,40).

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Харківського державного технічного університету будівництва та архітектури за адресою: 61002, м. Харків, вул. Сумська,40.

Автореферат розісланий 10.01 2003 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 64.056.04,
канд. техн. наук, доцент

Смельяненко М.Г.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Застосування сталобетонних конструкцій дозволяє значно поліпшити показники матеріалоемності, вартості та трудоемності будівництва, що досягається завдяки багатофункціональному використанню сталевих листів: застосування як складової частини опалубки, закладних деталей; об'єднання функції робочої арматури із захисними та ізоляційними функціями; компактне розміщення біля зовнішньої кромки згинального елемента; спроможність сталевих листів сприймати розтягуючі зусилля одночасно за всіма напрямками. Найбільший ефект від зовнішнього армування досягається в згинальних за двома напрямками плитах перекриття та покриття будівель та споруд. Плоский сталевий лист працює в умовах двохосового розтягування, завдяки чому підвищується жорсткість та несуча спроможність сталобетонної плити у порівнянні з залізобетонною плитою при одному і тому ж витраті металу.

Впровадження згинальних за двома напрямками сталобетонних плит утруднено у зв'язку з недостатнім розробленням методів розрахунку та проектування особливо з урахуванням високоінтенсивних температурних впливів. Конструкція має відповідати не тільки вимогам міцності, жорсткості та тріщиностійкості, але і вимогам протипожежної безпеки.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Робота виконана в рамках наукових тем: «Розробка теорії і методів розрахунку сталобетонних конструкцій» реєстраційний номер 0196U000644, *особистий внесок* – участь у розробці алгоритму і числові розрахунки; «Теорія напружено-деформованого і граничного станів сталобетонних плит при впливі інтенсивних теплових потоків» реєстраційний номер 0199U003103, *особистий внесок* – участь у дослідженнях напружено-деформованого стану і розрахунок межі вогнестійкості сталобетонних плит.

Метою роботи є розробка математичного апарата для розрахунку напружено-деформованого стану сталобетонних плит на силові і температурні впливи.

Задачі досліджень. Для досягнення поставленої в роботі мети були визначені такі задачі:

1. Розробити математичний апарат для розрахунку плит із зовнішнім листовим армуванням з урахуванням особливостей деформування сталового листа і бетону в умовах плоского напруженого стану під впливом навантаження і температури.
2. Розробити алгоритм і програму розрахунку сталобетонних плит на ПЕОМ.
3. Провести чисельні дослідження сталобетонних плит з різними геометричними і міцнісними характеристиками матеріалів та різними температурними умовами.
4. Співвіднести теоретичні та існуючі в літературі експериментальні дані.
5. Розробити конструкції захисту сталового листа від теплових впливів при пожежі та методику їхніх розрахунків.
6. Впровадити результати роботи в практику проектування та будівництва.

Об'єкт дослідження – сталобетонні плити.

Предмет дослідження. Напружено-деформований стан прямокутних в плані сталобетонних плит при дії статично прикладеного зовнішнього навантаження і температурних впливів, в тому числі і відповідно до умов стандартної пожежі.

Методи дослідження. Аналітичні та чисельні. Отримані залежності для описання напружено-деформованого стану сталобетонних плит при силових і температурних впливах, оснований на приведенні бетону до умовно ізотропного матеріалу. Сформульовані початкові та граничні умови, що визначені закріпленням плити і вказаними вище впливами. Здійснена чисельна реалізація поданого рішення.

4. Наукова новизна. Наукову новизну даних досліджень визначають такі результати:

1. Розроблено методику оцінки напружено-деформованого стану сталобетонних плит при силових і температурних впливах.
2. Отримано дані про несучу спроможність, деформації, напруження, внутрішні зусилля сталобетонних плит при дії статично прикладеного навантаження і температурних впливах, що здійснюються за різними схемами.
3. При температурному впливі з боку бетону сталобетонна плита задовольняє вимогам норм для перекрить будівель I ступеня вогнестійкості.
4. При дії пожежі з боку сталового листа, межа вогнестійкості сталобетонних плит задовольняє вимогам до перекрить будівель III ступеня вогнестійкості. Показано, що при використанні різних протипожежних покриттів вогнестійкість конструкцій, що розглядаються, може бути доведена до вимог, які відповідають будівлям I ступеня вогнестійкості.
5. При дії пожежі одночасно з обох боків сталобетонну плиту необхідно захищати, щоб забезпечити ступінь вогнестійкості перекриття будівель вище III. Розроблено і рекомендовано різні способи захисту і методика їхніх розрахунків.

Практичне значення отриманих результатів. Запропонована методика розрахунку дозволяє визначити несучу спроможність сталобетонних навантажених плит при різних схемах температурних впливів. З'являється можливість при проектуванні будівель і споруд, поруч з

розрахунками на міцність, жорсткість та тріщиностійкість, проводити розрахунки на вогнестійкість і передбачати конструктивні заходи щодо протипожежного захисту.

Результати дисертаційної роботи впроваджені у вигляді програми розрахунку напружено-деформованого стану сталобетонних (НДС) плит на силові і температурні впливи в проектному інституті Харківметропроект.

Особисто отримані здобувачем результати.

1. На підставі літературних джерел виконано аналіз методів розрахунку конструкцій з зовнішнім листовим армуванням на силові і температурні впливи.
2. Розроблено математичний апарат, алгоритм і програма розрахунку сталобетонних плит при силових і температурних впливах на ПЕОМ.
3. Проведені чисельні дослідження сталобетонних плит з різними геометричними і міцнісними характеристиками матеріалів.
4. Розроблена методика розрахунку захисту сталового листа від теплових впливів при пожежі.

Апробація результатів роботи. Основні результати дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на:

1. Другій всеукраїнській науково-технічній конференції «Науково-практичні проблеми сучасного залізобетону» (м. Київ, 1999р.).
2. Другій науково-технічній конференції «Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди» (м. Рівне, 1999р.).
3. Міжнародній науково-практичній конференції «Башенные сооружения: материалы, конструкции и технологии» (м. Макіївка, 2001р.).
4. Науково-технічних конференціях Української державної академії залізничного транспорту (1998-2001 р.р.).
5. Першій обласній конференції молодих вчених «Тобі, Харківщино, - пошук молодих», яка проходила в рамках обласного форуму «Освіта, наука, виробництво – шляхи інтеграції» (м. Харків 2002 р.). Доповідь відзначена дипломом.

Публікації. Основний зміст дисертації опубліковано у 8 наукових працях, 7 з яких у виданнях, рекомендованих ВАК України для публікації результатів дисертаційних робіт, 1 – тези доповіді науково технічної конференції.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, додатка і нараховує 214 сторінок тексту, у тому числі: 142 сторінки основного тексту, 67 рисунків, 12 таблиць, 49 сторінок додатка. Список використаних літературних джерел нараховує 139 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність, наукова новизна и практична цінність роботи, дана її загальна характеристика.

У першому розділі дисертаційної роботи приводиться огляд літературних джерел, присвячених опису існуючих видів конструктивних рішень будівель і споруд, у яких використана зовнішня листовая арматура.

Вивченню властивостей конструкцій із зовнішнім армуванням листовою сталлю присвячені роботи Клименка Ф.Е., Воронкова Р.В., Стрелецького М.М., Людковського І.Г., Залесова О.С., Чихладзе Е.Д., Скоробогатова С.М., Васильєва О.П., Бердичевського Г.Й., Аншина Л.З., Барабаша В.М., Бочагова В.П., Потера М.Л., Лавсена Р.М., Онга К.С., Стороженка Л.И., Шагіна О.Л., Санжаровського Р.С. і ін. Незважаючи на ефективність, розглянуті сталобетонні конструкції мають ряд недоліків. Зокрема, конструкції з відкрито розташованою листовою арматурою в порівнянні з залізобетонними мають меншу межу вогнестійкості. Дія температури призводить до швидкого нагрівання сталового листа до критичної температури і втрачання міцнісних властивостей. На практиці є досвід щодо боротьби з відзначеним недоліком. Тут необхідно в першу чергу відзначити дослідження Мілованова А.Ф., Кричевського О.П., Некрасова К.Д., Б. Бартелеми і Ж. Крюппа, Фоміна С.Л., Чихладзе Е.Д., Веревічевої М.А., Жакіна А.І., Демчини Б.Г.,

Колякова М.Й. та інших. Однак, для широкого застосування розглянутих конструкцій потрібен математичний апарат, що дозволяв би ще на стадії проектування розраховувати такі конструкції не тільки на міцність, жорсткість і тріщиностійкість, але і на вогнестійкість. Огляд накопиченого матеріалу показав, що характер деформування і вичерпання несучої спроможності згинальних за двома напрямками сталобетонних плит, що піддаються не тільки силовим, але і температурним впливам, у тому числі й в умовах пожежі, досліджений недостатньо.

Другий розділ містить основні положення теорії сталобетонних плит, що враховують, крім силових, і температурні впливи. Умови рівноваги елемента сталобетонної плити пропонуються у вигляді:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2}(M_T - M_x) + \frac{\partial^2}{\partial y^2}(M_T - M_y) - 2 \frac{\partial^2 M_{xy}}{\partial x \partial y} + \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) M_T = q(x, y) \quad (1)$$

Температурні згинальні моменти в бетоні і сталевому листі (рис. 1) визначаються в такий спосіб:

$$M_T = (M_T^b + M_T^s) \cdot 0,5 ; \quad (2)$$

$$M_T^b = - \int_{x_{ti}}^{x_i} \frac{\alpha_b E_b (T - T_0)}{3(1 - \nu_b)} x dx ; \quad M_T^s = - \int_{h_b}^{h_b + \delta} \frac{\alpha_s E_s (T - T_0)}{3(1 - \nu_s)} x dx ,$$

де T_0 - початкова температура; α_b , α_s - коефіцієнти лінійного розширення бетону і сталі.

Рис. 1. Деформації в перетині сталобетонного елемента

Моменти M_x , M_y , M_{xy} зв'язані з коефіцієнтами жорсткості і кривизнами залежностями

$$\begin{pmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} \\ D_{21} & D_{22} & D_{23} \\ D_{31} & D_{32} & D_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} K_x \\ K_y \\ 2K_{xy} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

де $D_{11} = D_1 \sin^2 \alpha + D_2 \cos^2 \alpha$; $D_{12} = D_{21} = D_\mu$;

$$D_{13} = D_{31} = D_{23} = D_{32} = (D_1 - D_2) \cos \alpha \cdot \sin \alpha / 2 ;$$

$$D_{22} = D_1 \cos^2 \alpha + D_2 \sin^2 \alpha ; \quad D_{33} = (D_1 + D_2 - 2D_\mu) / 4 ;$$

$$D_i = \bar{x}_i^3 E_b / (3(1 - \nu_b^2)) + \bar{x}_{ti}^3 E_{bt} / (3(1 - \nu_{bt}^2)) + E_s A_s (h_0 - x_i)^2 \lambda_i / (1 - \nu_s^2) ;$$

$$D_\mu = 0,5 (D_{\mu 1} + D_{\mu 2}) ;$$

$$D_{\mu i} = \nu_b \bar{x}_i^2 \bar{x}_j E_b / (3(1 - \nu_b^2)) + \nu_{bt} \bar{x}_{ti}^2 \bar{x}_{tj} E_{bt} / (3(1 - \nu_{bt}^2)) + \nu_s E_s A_s (h_0 - x_i)(h_0 - x_j) \lambda_j / (1 - \nu_s^2) ;$$

$$K_x = -\partial^2 w / \partial x^2 ; \quad K_y = -\partial^2 w / \partial y^2 ; \quad K_{xy} = -\partial^2 w / \partial x \partial y ; \quad (4)$$

A_s - площа сталевго листа на одиниці довжини; E_b , E_{bt} , ν_b , ν_{bt} - параметри деформування, отримані приведенням бетону до умовно ізотропного миттєво-пружного суцільного середовища;

E_s, ν_s - параметри деформування сталевго листа (робота сталевго листа за межею пружності враховується методом перемінних параметрів пружності); x_i, x_{ti} - положення нейтральних осей, що визначаються з умови рівності нулю проекцій сил, що діють у перетині на горизонтальну площину.

Приведені параметри деформування знаходяться за такими залежностями:

- для стиснутого бетону:

$$\nu_b = \eta \left(1 - \frac{\bar{E}_{b1}}{\bar{E}_{b2}} \right) / \left(1 - \eta^2 \frac{\bar{E}_{b1}}{\bar{E}_{b2}} \right); \quad (5)$$

$$E_b = \beta_{bT} \bar{E}_{b1} (1 - \nu_b \eta);$$

- для розтягнутого бетону:

$$\nu_{bt} = \eta \left(1 - \frac{\bar{E}_{bt1}}{\bar{E}_{bt2}} \right) / \left(1 - \eta^2 \frac{\bar{E}_{bt1}}{\bar{E}_{bt2}} \right); \quad (6)$$

$$E_{bt} = \beta_{bT} \bar{E}_{bt1} (1 - \nu_{bt} \eta),$$

де β_{bT} - коефіцієнт, що враховує зниження початкового модуля пружності бетону при нагріванні; коефіцієнти Пуассона бетону ν_b, ν_{bt} слабо залежать від температури і тому приймаються постійними;

$$\begin{aligned} \bar{E}_{bi} &= 3 \sum_{k=1}^n A_{ik} (\varepsilon'_{bi})^{k-1} / (k+2); \\ \bar{E}_{bti} &= 3 \sum_{k=1}^n A_{tik} (\varepsilon'_{bti})^{k-1} / (k+2), \end{aligned} \quad (7)$$

A_{ik}, A_{tik} - коефіцієнти, що визначаються з умови мінімуму квадратичних відхилень експериментально отриманих значень напружень у досвідах Г. Купфера і підрахованих з використанням залежностей у вигляді полінома п'ятого ступеня

Зміна модуля пружності сталі від температури враховується залежністю:

$$E_s = \beta_s E_s(20^\circ C), \quad (8)$$

де β_s - коефіцієнт, що враховує зниження початкового модуля пружності сталі при нагріванні.

Для рішення задачі про напружено-деформований стан сталобетонної плити необхідно знати розподіл температурно-вологісного поля в її перетині. Припустимо, що плита прогривається рівномірно по поверхні: а) з боку сталевго листа; б) з боку бетону; в) з боку сталевго листа і бетону одночасно. У випадку рівномірного прогріву задача про розподіл температури і вологи зводиться до одномірної (рис. 2). При цьому бетон розглядається як пористе трифазне середовище (тверде – 1, рідке – 2, газоподібне – 3) з різними температурами фаз. Необхідність розгляду і вологісного поля пов'язана з наявністю вологи в порах бетону, при випаровуванні якої виникає рухома границя паротворення.

Рис. 2. Розрахункові схеми сталобетонної плити при температурних впливах:

а) з боку сталевго листа; б) з боку бетону; в) по обидва боки

На основі аналізу рівняння балансу мас у фазах, рівнянь руху і рівнянь балансу енергії показано, що для мікропористих середовищ з розмірами пор $r \leq 10^{-7}$ м типу щільних важких бетонів з пористістю $\approx 20-30\%$ тепломасообмін описується наступною системою рівнянь:

$$c\rho \partial T / \partial t = \partial / \partial x (\lambda \partial T / \partial x), \quad \partial \rho_3 / \partial t = (8r/3) \sqrt{R/2\pi M} \partial (\rho_3 \sqrt{T}) / \partial x, \quad (9)$$

де T - температура твердого каркаса разом з паром, К; c - питома теплоємність бетону, Дж/кг·К; ρ - щільність сухого твердого каркаса, кг/м³; λ - коефіцієнт теплопроводності сухого каркаса, Вт/м·К; ρ_3 - щільність пари, кг/м³; M - молярна маса пари Дж/моль; R - газова постійна, R=8,31 Дж/моль·град; t - час, сек.

Початкові і граничні умови для випадку однобічного нагрівання з боку сталі (рис. 2,а) мають такий вигляд:

$$t = 0: \quad \rho_3 = \rho_{30}, \quad T = T_0; \quad (10)$$

$$x = h_b: \quad \lambda \partial T / \partial x = \alpha_c (T_0 - T), \quad \rho_3 = \rho_{30}; \quad x = 0: \quad \rho_3 = \rho_f; \quad Q = Q_c + Q_r,$$

де Q - повний тепловий потік до одиниці поверхні конструкції, що нагрівається; Q_c - конвективний тепловий потік; Q_r - променистий тепловий потік; α_c - коефіцієнт конвективного теплообміну між бетоном і холодним середовищем; ρ_f - щільність гарячої пари, кг/м³.

На границі паротворення

$$x = \xi_1: \quad -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = r_t \rho_{20} \frac{d\xi_1}{dt}; \quad \left(k_3 \rho_3 \frac{\partial p}{\partial x} \Big|_{\xi_1-0} - k_3 \rho_3 \frac{\partial p}{\partial x} \Big|_{\xi_1+0} \right) = \rho_{20} \frac{d\xi_1}{dt}, \quad (11)$$

де r_t - питома теплота паротворення, Дж/кг; p - тиск пари рідини, що випаровується, у порах, Па; $p = \rho_3 TR / (M \varphi_3)$; k_3 - коефіцієнт фільтрації пари по порах; φ_3 - об'ємна частка пари; ρ_{20} - щільність вологи в бетоні, кг/м³.

У випадку нагрівання з боку бетону границя паротворення рухається з цього ж боку, і граничні умови мають вигляд:

$$x = 0: \quad \lambda \partial T / \partial x = \alpha_c (T_0 - T), \quad \rho_3 = \rho_{30}; \quad x = h_b: \quad \rho_3 = \rho_f; \quad Q = Q_c + Q_r, \quad (12)$$

$$x = \xi_2: \quad -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = r_t \rho_{20} \frac{d\xi_2}{dt}; \quad \left(k_3 \rho_3 \frac{\partial p}{\partial x} \Big|_{\xi_2-0} - k_3 \rho_3 \frac{\partial p}{\partial x} \Big|_{\xi_2+0} \right) = \rho_{20} \frac{d\xi_2}{dt},$$

де α_c - коефіцієнт теплообміну між сталлю і холодним середовищем, Вт/м³·С.

На відміну від цих випадків, при температурному впливі на плиту з обох боків (рис. 2,в) волога також випаровується з обох боків, і тому утворюються дві границі паротворення ξ_1, ξ_2 . Це явище відбивається в граничних умовах, що мають такий вигляд:

$$t = 0: \quad \rho_3 = \rho_{30}, \quad T = T_0; \quad (13)$$

$$x = 0: \quad \rho_3 = \rho_f; \quad Q = Q_c + Q_r, \quad x = h_b: \quad \rho_3 = \rho_f; \quad Q = Q_c + Q_r,$$

$$x = \xi_1(t), \xi_2(t): -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = r_{t\xi_{20}} \frac{d\xi}{dt}; \left(k_3 \rho_3 \frac{\partial p}{\partial x} \Big|_{\xi=0} - k_3 \rho_3 \frac{\partial p}{\partial x} \Big|_{\xi+0} \right) = \rho_{20} \frac{d\xi}{dt}$$

Задача тепломасообміну для кожної схеми теплового впливу зважується шляхом різницевої апроксимації.

Знаючи розподіл температури по товщині плити, за залежностями (2) визначаємо температурні моменти, а рішенням рівняння рівноваги (1) з урахуванням залежностей (3) методом скінчених різниць при кроковому навантаженні визначаємо напружено-деформований стан сталобетонної плити. Межа вогнестійкості визначається часом t , за який плита втрачає несучу спроможність. У свою чергу, несуча спроможність характеризується наступними факторами, що мають місце в будь-якій точці кінцево-різницевої сітки: міцністю бетону; міцністю сталевого листа; міцністю контакту.

Як чисельний метод рішення отриманої системи рівнянь використовується метод скінчених різниць (МКР), що, на нашу думку, є одним з найефективніших методів рішення задач вигину пластинок, пристосований для різних умов обпирання, різного навантаження і різних обрисів контуру пластинки.

Відповідно до прийнятого методу на j поверхні пластинки вибирається кінцеве число точок, що являють собою вузли кінцево-різницевої сітки. Для кожної з цих точок записуються вихідні рівняння, у яких частки похідні замінюються наближеними значеннями шуканої функції прогинів у вузлах сітки. В результаті, неперервне рішення замінюється його дискретними значеннями, а диференціальне рівняння зводять до системи алгебраїчних:

$$\sum_{L=-2}^{L=2} \sum_{K=-2}^{K=2} B(N) \cdot w(I+K, J+L) = P(I, J) - M_T(I, J), \quad (14)$$

де $N = 5K + L + 13$; $L, K = -2.0, -1.0, 0, 1.0, 2.0$;

$P(I, J)$ – значення функції зовнішнього навантаження в точці (I, J) .

На початку розрахунку визначалися жорсткості і температурний момент нульового наближення. У нульовому наближенні першого кроку навантаження, жорсткості максимальні і визначалися з припущення пружних властивостей матеріалів конструкції. Температурний вплив передбачає стандартна пожежа. Початкова температура приймається $T=20^\circ\text{C}$.

Моделювання процесу деформування сталобетонної плити під навантаженням, здійснювалося кроками в 10 кН/м^2 . Дія температури враховувалася рівнянням стандартної пожежі і моделювалася як добавка до навантаження в кожній точці скінчено-різницевої сітки. Температурні поля визначалися з інтервалом часу 1 сек. Розрахунок сталобетонної плити виконувався з інтервалом часу до випару вологи – 0,67 хв, після випару – 1,67 хв. Чисельна реалізація оцінки напружено-деформованого стану сталобетонних плит при синхронному впливі короткочасного зосередженого навантаження і температури здійснювалася в середовищі *Borland Paskal 7.0*. Основна програма для розрахунку *Tens.pas* складається з основної процедури *Tensdef* і пакета модулів (рис.3).

У третьому розділі дисертації проводиться аналіз чисельних досліджень сталобетонних плит на силові і температурні впливи.

Розглядалися вільно обперті по контуру сталобетонні плити під дією статичного навантаження і температурного впливу, що характеризувалося рівнянням стандартної пожежі. Початкова температура приймається $T=20^\circ\text{C}$. Плита мала розміри $1,0 \times 1,0 \text{ м}$, товщину бетонного шару $h_b=0,05 \text{ м}$, сталевий лист товщиною $h_s=0,1 \text{ см}$. Обирання таких розмірів плити обумовлено наявними експериментальними даними.

Передбачалося, що бетонний шар плити виконано з важкого бетону природного твердіння вологістю 3% класів В20, В30, В40, В50, В60 з розрахунковими опорами на осьовий стиск

відповідно $R_b=15,0; 22,0; 29,0; 36,0; 43,0$ МПа і модулем пружності відповідно $E_b=27,0 \times 10^3; 32,5 \times 10^3; 36,0 \times 10^3; 39,0 \times 10^3; 40,0 \times 10^3$ МПа, сталевий лист зі сталі марки С 255.

Результати розрахунку приведені на рис. 4, з якого видно, що межа вогнестійкості конструкції зі збільшенням міцності бетону зростає. При навантаженні 10 кН/м^2 і класі бетону В 60 вона складає 25 хв.

На рис.5 представлено графік розподілу температурних полів по товщині плити з бетону щільністю $\rho=2300 \text{ кг/м}^3$, вологістю 3%, пористістю 0,2. З графіків видно, що зі збільшенням часу температурного впливу, різниця температур між нагрівальною і не нагрівальною поверхнями збільшується, що призводить до збільшення температурних моментів. Проведені дослідження показали, що при дії температури з боку сталевго листа межа вогнестійкості настає через досягнення в сталевому листі границі текучості.

Марка сталі на напружено-деформований стан сталебетонних плит практично не впливає. Графіки залежності межі вогнестійкості від навантаження і температурних полів від часу впливу для сталей марок С 235, С 285 будуть такі ж, як і для сталі марки С 255 (рис.4, 5). Збільшення товщини сталевго листа до 0,3 см на межу вогнестійкості плити практично не впливає, але, при нормальній температурі несуча спроможність плити збільшується до 160 кН/м^2 .

Рис.3. Алгоритм розрахунку

Рис. 4. Межа вогнестійкості сталебетонних плит залежно від міцності бетону

Рис. 5. Розподіл температури по товщині плити

При визначенні впливу величини повітряного зазору на межу вогнестійкості конструкції, його величина варіювалася в межах від $h=0$ до $h=0,5$ см із кроком 0,1 см. Результати розрахунку представлені на рис.6, з якого видно, що межа вогнестійкості сталебетонних плит збільшується зі збільшенням повітряного зазору. Пристрій повітряного зазору між бетоном і сталевим листом значно зменшує внутрішньопоровий тиск, що є істотним для дрібнопористих бетонів при інтенсивних режимах нагрівання. Однак, збільшення повітряного зазору понад 0,5 см призводить до уповільнення теплообміну між сталлю і бетоном, і, як наслідок, більш швидкому нагріванню сталевго листа, що призводить до погіршення міцнісних властивостей сталебетонної плити. При наявності повітряного зазору 0,5 см між сталевим листом і бетоном руйнування плити настає досить швидко: температура сталевго листа 700°C досягається приблизно через 26 хв після початку пожежі.

Рис. 6. Межа вогнестійкості сталебетонних плит у залежності від величини повітряного зазору між сталевим листом і бетоном

Згідно з СНиП 2.01.02-85* мінімальна межа вогнестійкості для несучих конструкцій перекриття для будівель I ступеня вогнестійкості має складати 1 годину, для будівель II ступеня вогнестійкості - 0,75 години. Проведені дослідження показують, що максимальна межа вогнестійкості сталебетонних плит при пожежі з боку сталевго листа складає 25 хв, що відповідає вимогам СНиП 2.01.02-85* для III, IV і IVa ступенів (15 хв). Розрахунки показують, що у всіх випадках утрата несучої спроможності виникала завдяки досягненню в сталевому листі границі текучості. Це дозволяє зробити висновок про необхідність пристрою захисного шару для сталебетонних плит при впливі пожежі з боку сталевго листа.

При дослідженні впливу захисного шару на напружено-деформований стан сталебетонних плит при силових і температурних впливах при дії пожежі з боку сталевго листа, тобто знизу, розглядалися такі способи протипожежного захисту: плита азбестоцементна ($h=0,05$ м); плита цементно-стружкова ($h=0,02$ м); плита мінераловатна ($h=0,10$ м); плита мінераловатна ($h=0,04$ м); легкий бетон ($h=0,03$ м).

Результати розрахунку конструкції представлені на рис.7, з якого видно, що пристрій захисного шару значно збільшує межу вогнестійкості сталобетонних плит при температурному впливі з боку сталевго листа. Захисний шар значно зменшує температуру плити. Так, при навантаженні 10 кН/м^2 , через 23 хв температурного впливу температура незахищеного сталевго листа складає 700°C , а захищеного коливається в межах від 230°C до 400°C в залежності від типу захисного шару. Через 62,5 хв температурного впливу плити з захисним шаром з азбестоцементу ($h=0,05 \text{ м}$), і мінераловатних плит ($h=0,04 \text{ м}$) утратили несучу спроможність. Не зруйнувалися конструкції з захисним шаром з мінераловатних плит товщиною $h=0,10 \text{ м}$ ($T_{\text{сталі}}=450^\circ\text{C}$), цементно-стружкових плит товщиною $h=0,02 \text{ м}$ ($T_{\text{сталі}}=550^\circ\text{C}$) і з легкого бетону товщиною $h=0,03 \text{ м}$ ($T_{\text{сталі}}=560^\circ\text{C}$).

Рис. 7. Залежність межі вогнестійкості сталобетонних плит від способу протипожежного захисту

У роботі були проведені дослідження напружено-деформованого стану сталобетонних плит при силових і температурних впливах: з боку бетону; з боку сталевго листа. Результати розрахунку представлені на рис.8, з якого видно, що зі збільшенням часу температурного впливу несуча спроможність сталобетонних плит падає. Однак, при температурному впливі з боку бетону і навантаженні 10 кН/м^2 , межа вогнестійкості сталобетонних плит складає майже 190 хв, що задовольняє вимогам СНиП 2.01.02-85*. При цій схемі температурного впливу руйнування відбувається через досягнення в стиснутих волокнах бетону граничних деформацій. Розподіл температури по товщині плити для цього випадку показано на рис. 9.

Рис. 8. Межа вогнестійкості сталобетонних плит при різних схемах температурної дії

При температурному впливі по обидва боки межа вогнестійкості конструкції складає 23 хв, що на 2 хв менше, ніж при дії температури з боку сталевго листа. Розрахунки показують, що у випадку температурного впливу по обидва боки, як і у випадку температурного впливу з боку сталевго листа, утрата несучої спроможності відбувається через досягнення в сталевому листі границі текучості. При такій схемі вогневого впливу, для забезпечення ступеня вогнестійкості вище III, конструкцію необхідно захищати з боку сталевго листа.

Як видно з графіків, представлених на рис.10, при дії температурного впливу по обидва боки середня частина плити прогривається повільніше ніж крайні волокна, але швидше ніж при однобічній дії температури.

Рис. 9. Розподіл температури по товщині плити при пожежі з боку бетону

Рис. 10. Розподіл температури по товщині плити при пожежі по обидва боки

Через 5 хв після початку температурного впливу температурний перепад між поверхнею плити і самою холодною точкою складає 273°C , а через 25 хв після початку пожежі цей перепад складає 179°C . Як і треба було очікувати, графік практично симетричний щодо лінії проведеної через середину товщини плити.

У четвертому розділі проводиться аналіз існуючих конструктивних рішень сталобетонних плит. Проводиться порівняння результатів розрахунку з наявними експериментальними даними при нормальній температурі. Так, при порівнянні з експериментальними дослідженнями, виконаними в Харківському національному автомобільно-дорожньому університеті, відсоток розбіжності по руйнівному навантаженню не перевищує 4,2%; при порівнянні з дослідженнями, виконаними в Національному Університеті Сінгапура, відсоток розбіжності по руйнівному навантаженню складає 4%. Порівнювалися такі результати розрахунку межі вогнестійкості з наявними експериментальними дослідженнями, проведеними Міловановим А.Ф. Відсоток розбіжності склав 3,7%.

Виконано порівняння ефективності використання сталобетонних плит з різними способами теплового захисту. У вартість конструкції включені витрати на готування бетонної суміші, формування, утримання форм, теплову обробку. Порівняння проводилося по СЕССЦМ ціннику на будівельні матеріали ч.1 і ч.IV (ДБН IV-4-97), РЭСН №6 Е-6-36-2 і Е-6-36-3. Економічний ефект залежить від використовуваного виду захисного покриття (табл.1).

Таблиця 1

Порівняння вартостей залізобетонних плит та сталобетонних з різними видами захисних покриттів

Вартість 1м ² залізобетонної плити (грн.)	Вартість 1м ² сталобетонної плити без захисного покриття (грн.)	Вид захисного покриття	Вартість 1м ²		Економічний ефект %
			Захисного покриття	Сталобетонної плити з захисним покриттям	
72,62	48,33	Цементно-стружкова плита h=0,02 м	30,00	78,33	-7,86
		Мінераловатна плита h=0,1 м	8,30	56,63	22
		Легкий бетон h=0,30 м	16,25	68,33	6

У роботі приведені й інші дані про практичне використання результатів дисертаційної роботи. Методика розрахунку сталобетонних плит, що піддаються силовому і температурному впливам, впроваджені в проектних рішеннях об'єктів ВАТ Харківметропроект.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

- Показано, що характер деформування і вичерпання несучої спроможності згинальних за двома напрямками сталобетонних плит, під дією навантаження і температури, у тому числі й в умовах пожежі, досліджено недостатньо.
- Розроблено методику розрахунку сталобетонних плит з урахуванням особливостей деформування сталевих листів (робота за межею пружності), і бетону (нелінійність деформування в умовах плоского напруженого стану і тріщиноутворення) під впливом навантаження і температури.
- Розроблено обчислювальний апарат розрахунку напружено-деформованого стану сталобетонних плит у вигляді програми *Tens.pas* реалізованої в середовищі Borland Paskal 7.0. Як чисельний метод рішення даної задачі використовується метод скінчених різниць.
- Розроблено методику визначення межі вогнестійкості сталобетонних плит у залежності від схем температурного впливу, яка заснована на представленні бетону як трифазного середовища, що дозволяє розрахувати температурно-вологісне поле, визначити рухливу границю паротворення, оцінити внутрішньопоровий тиск, установити час t , за який плита втрачає несучу спроможність.
- Проведено числові дослідження напружено-деформованого стану сталобетонних плит з різними геометричними, міцнісними характеристиками матеріалів, різними способами температурного захисту і різних схем температурного впливу, що показали:
 - для розглянутих класів важкого бетону зі збільшенням міцності бетону на стиск межа вогнестійкості плит збільшується;
 - зі збільшенням повітряного зазору між сталевим листом і бетоном до 0,5 см межа вогнестійкості сталобетонних плит збільшується від 4% до 25% в залежності від постійного навантаження. При повітряному зазорі 0,5 см і більш межа вогнестійкості падає;

- в усіх випадках при впливі вогню з боку сталевих листів втрата несучої спроможності виникала через досягнення в сталевому листі границі текучості;
 - пристрій захисного шару з цементно-стружкових плит ($h=0,02$ м), мінераловатних плит ($h=0,10$ м), легкого бетону ($h=0,03$ м), дозволяє довести межу вогнестійкості сталобетонних плит при навантаженні 10 кН/м^2 до I ступеня; асбоцементних плит ($h=0,05$ м), мінераловатних плит ($h=0,04$ м) – до II ступеня.
6. При дії стандартної пожежі з боку бетону межа вогнестійкості сталобетонних плит задовольняє вимогам які пред'являються до перекриття I ступеня і конструкція не має потреби в протипожежному захисті.
 7. При дії стандартної пожежі по обидва боки, межа вогнестійкості і напружено-деформований стан сталобетонних плит незначно зменшується в порівнянні з плитами, що підігріваються знизу.
 8. Вартість 1 м^2 сталобетонної плити з захистом у середньому на 20% нижче вартості залізобетонної плити.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Чихладзе Э.Д., Берестянская С.Ю. Напряженно-деформированное состояние элемента сталобетонной плиты при силовых и температурных воздействиях // Будівельні конструкції. Зб. наук. праць. - Київ: НДІБК, 1999. - Вип. 50. – С.259-263.
Особистий внесок – Отримані залежності для визначення напружень в елементі сталобетонної плити при дії навантаження і температури.
2. Берестянская С.Ю. Влияние повышенных и высоких температур на деформирование бетона при плоском напряженном состоянии // Зб. наук. праць “Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди”. – Рівне: РДГУ, 1999. – Вип.3. – С. 93-97.
3. Огнестойкость бетонных и сталобетонных конструкций / Чихладзе Э.Д., Жакин А.И., Веревичева М.А., Берестянская С.Ю., Колесниченко И.Н. - Харків: ХарДАЗТ, 2000.- Вип.40. - 97с.
Особистий внесок – Зроблено аналіз впливу температури на діаграму σ – ε бетону. Зроблено виведення рівнянь термопружності для сталобетонної плити (п.п.1.4.3, 4.1).
4. Веревичева М.А., Берестянська С.Ю. Тепломасообмін у бетонній плиті // Зб. наук. праць. – Харків: ХарДАЗТ, 2001. – Вип. 45. – С. 124-127.
Особистий внесок – Проведено чисельний розрахунок температурно-вологісних полів в перерізі сталобетонної плити.
5. Чихладзе Э.Д., Берестянська С.Ю. Розрахунок сталобетонних плит на силові та температурні впливи // Зб. наук. праць. – Харків: ХарДАЗТ, 2000. – Вип. 42. – С. 96-100.
Особистий внесок – Отримана розрахункова система рівнянь елемента сталобетонної плити з урахуванням температурних впливів.
6. Веревичева М.А., Берестянська С.Ю. Плоска задача тепломасообміну у бетонній плиті // Вісник ДонДАБА. – 2001. – Вип. – 5(30). – С. 138-140.
Особистий внесок – Проведено чисельний розрахунок рухомої границі паротворення.
7. Веревичева М.А., Берестянська С.Ю. Напружено-деформований стан сталобетонних плит при силових і температурних впливах // Науково-технічний журнал по результатах роботи 63-ої наук.-техн. конф. “Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті”. – Харків: ХарДАЗТ. – 2001. – Спец. вип. 5. – С. 91.
Особистий внесок – Запропоновано систему рівнянь тепломасообміну.
8. Чихладзе Э.Д., Веревичева М.А., Берестянская С.Ю. Напряженно-деформированное состояние сталобетонных плит при силовых и температурных воздействиях // Коммунальное хозяйство городов. Науч.-техн. сб. - Киев: Техника, 2002. - Вып. 39 - С. 98-104.

Особистий внесок – Виконано аналіз результатів розрахунків сталобетонних плит при дії навантаження і температури.

АНОТАЦІЯ

Берестянська С.Ю. Напружено-деформований стан сталобетонних плит при силових і температурних впливах. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 05.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди. – Харківський державний технічний університет будівництва та архітектури Міністерства освіти і науки України, Харків, 2002.

Дисертація присвячена розробці математичного апарата для розрахунку напружено-деформованого стану сталобетонних плит на силові і температурні впливи.

Розроблено і експериментально обґрунтовано методику розрахунку згинальних за двома напрямками сталобетонних плит при силових і температурних впливах, в тому числі і в умовах стандартної пожежі, з урахуванням нелінійності деформування і тріщиноутворення бетону в умовах плоского напруженого стану, пластичних деформацій сталового листа за межею пружності, податливості об'єднання листа з бетоном. Отримано повну систему рівнянь, що описує напружено-деформований стан малого елемента сталобетонної плити під дією навантаження і температури. Зроблено аналіз числових розрахунків плит з різними міцнісними та геометричними характеристиками матеріалів, різними способами температурного захисту і різними схемами температурного впливу.

Ключові слова: сталобетонна плита, плоский напружений стан, несуча здатність, напружено-деформований стан, стандартна пожежа, температурні впливи, температурний захист, межа вогнестійкості.

АННОТАЦИЯ

Берестянская С.Ю. Напряженно-деформированное состояние сталобетонных плит при силовых и температурных воздействиях. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.01 – строительные конструкции, здания и сооружения. – Харьковский государственный технический университет строительства и архитектуры Министерства образования и науки Украины, Харьков, 2002.

Диссертация посвящена разработке математического аппарата для расчета напряженно-деформированного состояния сталобетонных плит на силовые и температурные воздействия.

Проведен анализ литературных источников, посвященных описанию существующих видов конструктивных решений зданий и сооружений, в которых использована внешняя листовая арматура. Обзор накопленного материала показал, что характер деформирования и исчерпания несущей способности изгибаемых в двух направлениях сталобетонных плит, подвергающихся не только силовым, но и температурным воздействиям, в том числе в условиях стандартного пожара, исследован недостаточно.

Разработана и экспериментально обоснована методика расчета изгибаемых в двух направлениях сталобетонных плит при силовых и температурных воздействиях, в том числе и в условиях стандартного пожара, с учетом нелинейности деформирования и трещинообразования бетона в условиях плоского напряженного состояния, пластических деформаций стального листа за пределом упругости, податливости объединения листа с бетоном. Получена полная система уравнений, описывающая напряженно-деформированное состояние малого элемента сталобетонной плиты под действием поперечной нагрузки и температуры. Аппроксимацией экспериментальных диаграмм деформирования бетона для конкретных видов двухосного напряженного состояния получены аналитические зависимости, связывающие напряжения и деформации для широкого класса бетонов.

Сформулированы начальные и граничные условия, определяемые закреплением плиты и отмеченными выше воздействиями. Моделирование процесса деформирования сталобетонной плиты осуществляется шагами. Действие температуры учитывается уравнением стандартного

пожара и моделируется как добавка к нагрузке в каждой точке конечно-разностной сетки. Численная реализация напряженно-деформированного состояния сталебетонных плит при синхронном воздействии кратковременной нагрузки и температуры осуществляется в среде Borland Paskal 7.0. Предложенная методика расчета позволяет определить несущую способность сталебетонных нагруженных плит при различных схемах температурных воздействий, в том числе и с учетом противопожарных покрытий.

Проведен анализ численных расчетов несущей способности, деформаций, напряжений, внутренних усилий сталебетонных плит при действии статически приложенной нагрузки и стандартного пожара. Исследовано влияние прочности бетона, марки стали, толщины стального листа, воздушного зазора между стальным листом и бетоном, защитных покрытий на предел огнестойкости сталебетонных плит. Действие стандартного пожара осуществлялось по различным схемам (пожар со стороны стального листа, со стороны бетона, с обеих сторон).

Выполнено сравнение теоретических и экспериментальных данных. При нормальной температуре сравнение проводилось с экспериментальными исследованиями, проведенными в Харьковском национальном автомобильно-дорожном университете и с исследованиями, выполненными в Национальном Университете Сингапура. При определении предела огнестойкости сравнение производилось с экспериментальными исследованиями Милованова А.Ф. Показана эффективность использования сталебетонных плит с различными способами защиты. Оценена стоимость 1 м² сталебетонной плиты с противопожарной защитой.

Ключевые слова: сталебетонная плита, плоское напряженное состояние, несущая способность, напряженно-деформированное состояние, стандартный пожар, температурные воздействия, температурная защита, предел огнестойкости.

SUMMARY

Berestyanskaya S.Y. Stressed-Deformed State of Steel-Concrete Slabs Under Power and Temperature Influences. – Manuscript.

Master's thesis on speciality (specialty, specialist) 05.23.01 – construction structures, buildings and constructions. Kharkov State Engineering University of Construction And Architecture, Kharkov, 2002.

Thesis is devoted to the development of mathematical device for calculating stressed-deformed state of steel-concrete slabs under power and temperature influences.

The method of calculating of bended in two directions steel-concrete slabs under power and temperature influences including standard fire conditions taking into account concrete nonlined deformation and crack forming under flat stressed states, plastic deformations of steel sheet exceeding limit elasticity and resilience of connecting sheet with concrete was developed and experimentally well founded. The system of equations describing stressed-deformed steel-concrete slab small element state under diametrical load and temperature influences was obtained. Analysis of numerical stab calculations with different material durable and geometrical characteristics and temperature protection and influences schemes was carried out.

Key words: steel-concrete slab, flat-stressed state, carrying capacity, stressed- deformed state, standard fire, temperature influences, temperature protection, fireproof limit.

Підписано до друку 24.12.2002р.

Формат паперу 60x84 1/16. Папір писальний

Условн.-печ. лист. 1,0. Уч.-изд. лист. 1,25.

Зам. № 756 Наклад 100 прим. Безкоштовно.

Вид. УкрДАЗТ. Свідоцтво № 112 від 06.07.2000 р.

61050, м. Харків - 50, м. Фейєрбаха, 7

Тип. УкрДАЗТу, 61050, м. Харків - 50, м. Фейєрбаха, 7