

УДК 624.073.11:539.371

*Кандидаты техн. наук Г.Л. Ватуля,  
Е.Ф. Орел, С.Ю. Берестянская*

**ВЛИЯНИЕ ПОЖАРА НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ  
СОСТОЯНИЕ СТАЛЕБЕТОННЫХ ПЛИТ**

*Представил д-р техн. наук, профессор А.А. Плугин*

**Введение.** Сталобетонные конструкции являются более эффективными по сравнению с железобетонными благодаря многофункциональному использованию стального листа. Наибольший эффект от

внешнего армирования достигается в изгибаемых в двух направлениях плитах перекрытий и покрытий зданий. Плоский стальной лист работает в условиях двухосного растяжения, благодаря чему

повышается жесткость и несущая способность сталебетонных плит по сравнению с железобетонными при одинаковом расходе металла. Внедрение изгибаемых в двух направлениях сталебетонных плит затруднено ввиду недостаточной разработанности методов расчета и проектирования, особенно с учетом высокоинтенсивных термосиловых воздействий, так как конструкция в равной степени должна отвечать не только требованиям прочности, жесткости и трещиностойкости, но и требованиям противопожарной безопасности.

**Цель исследований.** Обзор накопленного материала показал, что характер деформирования и исчерпания несущей способности изгибаемых в двух

направлениях сталебетонных плит, которые подвергаются не только силовому, но и термосиловому воздействию, в том числе и в условиях пожара, исследован недостаточно. Поэтому целью исследований является разработка математического аппарата для расчета напряженно-деформированного состояния сталебетонных плит на силовые и температурные воздействия.

Настоящая статья, являясь развитием исследований [1-4], содержит основные положения теории сталебетонных плит, учитывающей, помимо силовых, и температурные воздействия. Используем условия равновесия элемента сталебетонной плиты, полученные в [3]:

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

Температурные изгибающие моменты в бетоне и стальном листе (рис. 1) определяются следующим образом:

$$M_T = M_T^b + M_T^s; \quad (2)$$

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

где  $T_0$  - начальная температура;  $\alpha_b, \alpha_s$  - коэффициенты объемного расширения бетона и стали.

Моменты  $M_x, M_y, M_{xy}$  связаны с жесткостными коэффициентами и кривизнами зависимостями [1]:

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

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

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

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

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

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

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

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

где  $A_s$  – площадь стального листа на единице длины;  $E_b, E_{bt}, \nu_b, \nu_{bt}$  – параметры деформирования сжатого и растянутого бетона;  $E_s, \nu_s$  – параметры деформи-

рования стального листа;  $\lambda_i$  – коэффициент податливости контакта листовой арматуры с бетоном;  $x_i, x_{ti}$  – высоты сжатой и растянутой зон.

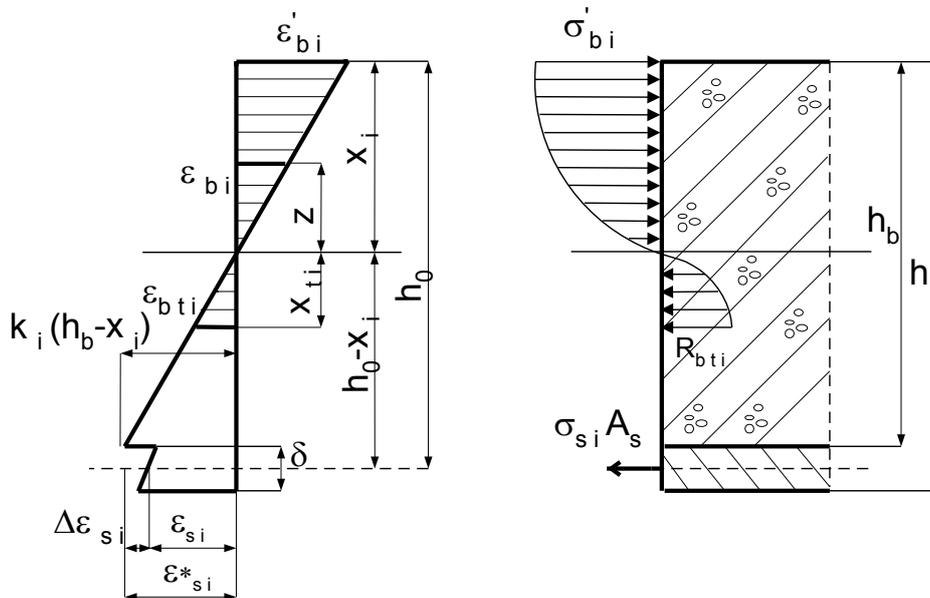


Рис. 1. Деформации в сечении сталебетонного элемента

Для решения задачи о напряженно-деформированном состоянии сталебетонной плиты необходимо знать распределение температурно-влажностного поля в ее сечении. Будем предполагать, что плита прогревается равномерно: а) со стороны стального листа; б) со стороны бетона; в) со

сторон стального листа и бетона одновременно. В случае равномерного прогрева задача о распределении температуры и влаги сводится к одномерной (рис. 2). Необходимость рассмотрения и влажностного поля связана с наличием влаги в порах бетона, при испарении

которой возникает подвижная граница парообразования [4].

В работах [3, 4] на основе анализа уравнения баланса масс в фазах, уравнений движения и уравнений баланса энергии

показано, что для микропористых сред с размерами пор  $r \leq 10^{-7}$  м типа плотных тяжелых бетонов с пористостью порядка 20-30 % тепломассообмен описывается следующей системой уравнений:

$$c\rho \partial T / \partial t = \partial / \partial x (\lambda \partial T / \partial x), \quad \partial \rho_3 / \partial t = (8r/3) \sqrt{R/2\pi M} \partial (\rho_3 \sqrt{T}) / \partial x, \quad (5)$$

где  $T$  – температура твердого каркаса вместе с паром, К;  $c$  – удельная теплоемкость бетона;  $\rho$  – плотность сухого твердого каркаса;  $\lambda$  – коэффициент

теплопроводности сухого каркаса;  $\rho_3$  – плотность пара;  $M$  – молярная масса пара;  $R$  – газовая постоянная;  $t$  – время.

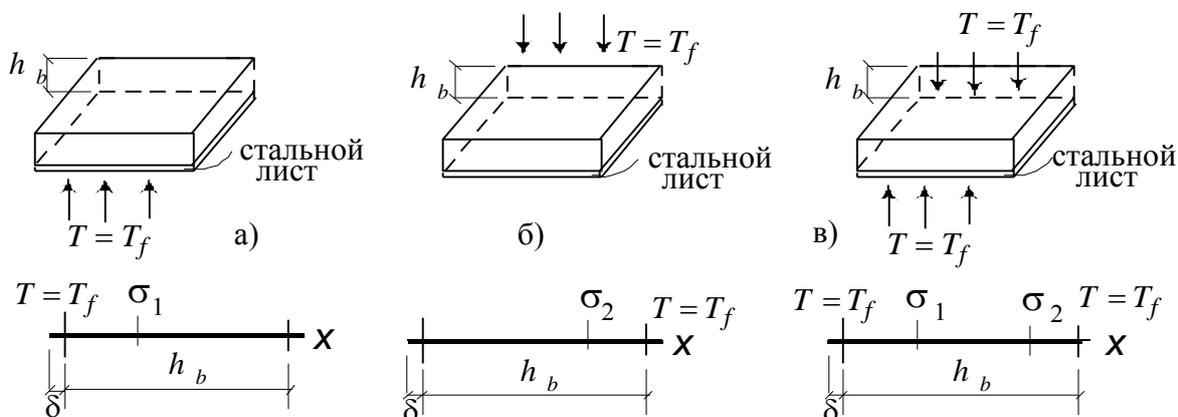


Рис. 2. Расчетная схема сталебетонной плиты: температурное воздействие со стороны стального листа (а); со стороны бетона (б); с обеих сторон (в)

Начальные и граничные условия для случая одностороннего нагрева со стороны стали (рис. 2,а) сформулированы в [3]. Они имеют следующий вид:

$$t = 0: \quad \rho_3 = \rho_{30}, \quad T = T_0; \quad (6)$$

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

где  $Q$  – полный тепловой поток к единице нагреваемой поверхности конструкции;  $Q_c$  – конвективный тепловой поток;  $Q_r$  – лучистый тепловой поток;  $\alpha_c$  – коэффициент конвективного теплообмена между

бетоном и холодной средой;  $\rho_f$  – плотность горячего пара.

На границе парообразования

$$x = \sigma_1: \quad -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = r_t \rho_{20} \frac{d\sigma_1}{dt}; \quad \left( k_3 \rho_3 \frac{\partial p}{\partial x} \Big|_{\sigma_1-0} - k_3 \rho_3 \frac{\partial p}{\partial x} \Big|_{\sigma_1+0} \right) = \rho_{20} \frac{d\sigma_1}{dt}, \quad (7)$$

где  $r_t$  – удельная теплота парообразования;  
 $p$  – давление пара испаряющейся  
 жидкости в порах;  $p = \rho_3 TR / (M\varphi_3)$ ;  
 $k_3$  – коэффициент фильтрации пара по

порам;  $\varphi_3$  – объемная доля пара;  $\rho_{20}$  –  
 плотность влаги в бетоне.

В случае нагрева со стороны бетона  
 граница парообразования движется со  
 стороны  $x = h_b$ , и граничные условия  
 имеют вид

$$x = 0: \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha_c (T_0 - T), \quad \rho_3 = \rho_{30}; \quad x = h_b: \quad \rho_3 = \rho_f; \quad Q = Q_c + Q_r, \quad (8)$$

$$x = \sigma_2: \quad -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = r_t \rho_{20} \frac{d\sigma_2}{dt}; \quad \left( k_3 \rho_3 \frac{\partial p}{\partial x} \Big|_{\sigma_2=0} - k_3 \rho_3 \frac{\partial p}{\partial x} \Big|_{\sigma_2+h} \right) = \rho_{20} \frac{d\sigma_2}{dt},$$

где  $\alpha_c$  – коэффициент теплообмена между  
 сталью и холодной средой.

В отличие от этих случаев, при  
 температурном воздействии на плиту с  
 обеих сторон (рис. 2,в) влага испаряется

также с обеих сторон, и поэтому  
 образуются две границы парообразования  
 $\sigma_1, \sigma_2$ . Это явление отражается в  
 граничных условиях, которые имеют  
 следующий вид:

$$t = 0: \quad \rho_3 = \rho_{30}, \quad T = T_0; \quad (9)$$

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

$$x = \sigma_1(t), \sigma_2(t): \quad -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = r_t \rho_{20} \frac{d\sigma}{dt}; \quad \left( k_3 \rho_3 \frac{\partial p}{\partial x} \Big|_{\sigma=0} - k_3 \rho_3 \frac{\partial p}{\partial x} \Big|_{\sigma+h} \right) = \rho_{20} \frac{d\sigma}{dt}.$$

Задача тепломассообмена для каждой  
 схемы теплового воздействия решается  
 путем разностной аппроксимации.

Зная распределение температурного  
 поля по толщине плиты, по зависимостям  
 (2) определяем температурные моменты, а  
 решением уравнения равновесия (1) с  
 учетом зависимостей (3) методом конечных  
 разностей при шаговом нагружении  
 определяем напряженно-деформированное  
 состояние сталебетонной плиты.

Огнестойкость определяется  
 временем  $t$ , за которое плита потеряет  
 несущую способность. В свою очередь  
 несущая способность характеризуется  
 следующими факторами, имеющими место  
 в какой-либо точке конечно-разностной

сетки: прочностью бетона; прочностью  
 стального листа; прочностью контакта [1].

Для численных расчетов была  
 использована сталебетонная плита  
 1000x1000 мм толщиной  $h_b=50$  мм из  
 бетона прочностью  $R_b=40$  МПа. Плита  
 армировалась плоским листом толщиной  
 $\delta=1$  мм из стали с физическим пределом  
 текучести  $\sigma_m=255$  МПа. Начальные  
 значения модуля упругости бетона и стали  
 $E_b=4,08 \times 10^4$  и  $E_s=2,06 \times 10^5$  МПа. Нагрузка  
 на плиту была принята равномерно  
 распределенная. Опирание по контуру  
 шарнирное. Объединение стального листа с  
 бетоном выполнялось наклонными  
 петлевыми анкерами и имело жесткость  
 $\xi=80$  кН/м<sup>3</sup> [1, 2].

Результаты расчетов приведены на рис. 3, 4. Из рис. 3 видно, что при температурном воздействии сверху обеспечивается требуемый предел огнестойкости согласно СНиП 2.01.02-85\* до нагрузки 60 % от разрушающей. При огневом воздействии со стороны стального листа и с обеих сторон несущая способность не обеспечивается даже при минимальной нагрузке. В этом случае необходимо предусматривать защиту конструкции от температуры. Как видно из рис. 4, тип защитного слоя значительно увеличивает огнестойкость сталебетонных плит при действии пожара со стороны стального листа. Так, например, огнестойкость плит при нагрузке  $10 \text{ кН/м}^2$  с защитным слоем из асбестоцементных плит  $h=50 \text{ мм}$  составляет 58 мин, а с защитным слоем из минераловатных плит  $h=40 \text{ мм}$  – 50 мин. Эти способы защиты могут быть рекомендованы для зданий, соответствующих II степени огнестойкости.

Огнестойкость сталебетонных плит при нагрузке  $10 \text{ кН/м}^2$  с защитным слоем из цементно-стружечных плит  $h=200 \text{ мм}$  составляет 75 мин, с защитным слоем из минераловатной плиты  $h=100 \text{ мм}$  – 104 мин, с защитным слоем из легкого бетона  $h=30 \text{ мм}$  – 75 мин. Эти способы защиты могут быть рекомендованы для зданий, соответствующих I степени огнестойкости.

**Выводы.** Таким образом, разработан математический аппарат, позволяющий оценить напряженно-деформированное состояние и несущую способность сталебетонных плит при силовых и температурных воздействиях, в том числе и при различных условиях пожара. Полученные результаты могут быть использованы для расчета сталебетонных перекрытий строительных сооружений.

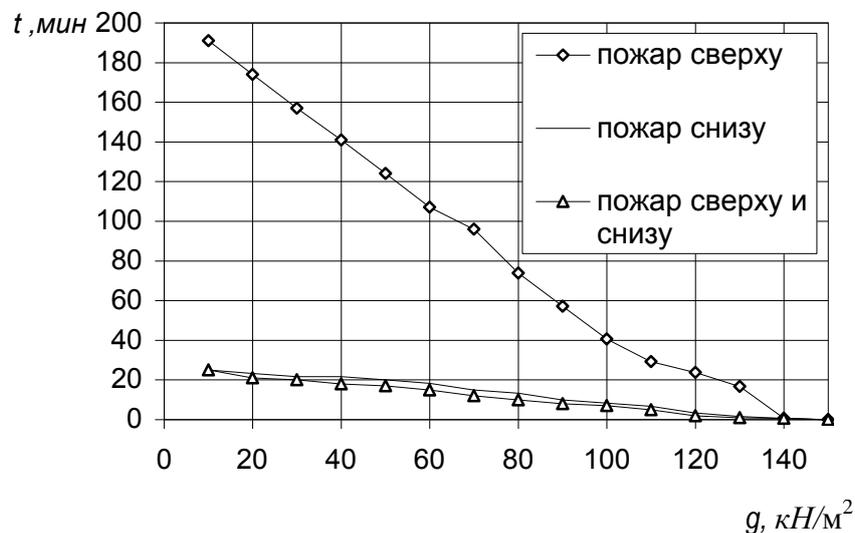


Рис. 3. Зависимость несущей способности сталебетонной плиты от схемы температурного воздействия

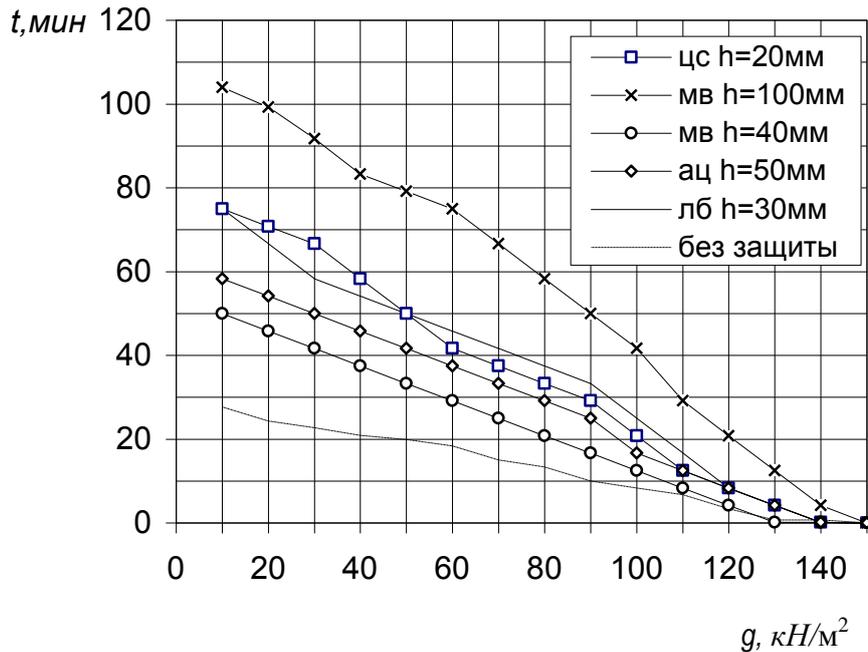


Рис. 4. Залежність несущої здатності від виду температурної захисту

### Список літератури

1. Основи розрахунку та проектування комбінованих і сталобетонних конструкцій [Текст] / Э.Д. Чихладзе, Г.Л. Ватуля, Ю.П. Китов [и др.]; под ред. Э.Д. Чихладзе. – К.: Транспорт України, 2006. – 104 с.
2. Ватуля, Г.Л. Моделирование работы сталобетонного перекрытия [Текст] / Г.Л. Ватуля, Е.Ф. Орел, Н.В. Смолянюк // Зб. наук. праць (галузево машинобудування, будівництво). – Полтава: ПолтНТУ. 2011. – Вип. 2 (30). – С. 80-85.
3. Огнестойкость бетонных и сталобетонных конструкций [Текст]: сб. трудов. – Харьков: ХарГАЖТ, 2000. – Вып.40. – 97 с.
4. Жакин, А.И. Теория теплообмена в пористых средах [Текст] / А.И. Жакин, Э.Д. Чихладзе, М.А. Веревичева // Изв. ВУЗов. Строительство. – 1998. – №1. – С. 111-116.

**Ключевые слова:** Сталобетонная плита, температурное воздействие, напряженно-деформированное состояние, несущая способность, огнестойкость.

### Аннотації

Проведено дослідження впливу різних схем вогневої дії та засобів теплового захисту на несучу здатність навантажених сталобетонних плит. Рекомендовано способи захисту сталового листа від дії високої температури.

Проведено исследование влияния различных схем огневого воздействия на несущую способность нагруженных сталобетонных плит. Рекомендованы способы защиты стального листа от действия высокой температуры.

The author provides the tests in order to evaluate the impact of variable heating modes on carrying capacity of loaded steel concrete slab. Safety methods in order to defend the steel sheet from high temperature influence are also proposed in the article.