

УДК 624.075:624.016

**СТІЙКІСТЬ ТОНКОСТІННИХ СТАЛЕВИХ ЕЛЕМЕНТІВ
СТАЛЕЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ**

Д.т.н., проф. Семко О.В., Авраменко Ю.О.

*Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка,
м. Полтава*

Постановка проблеми. Протягом останніх років тонкостінні сталеві пластинки й оболонки є об'єктом численних і різноманітних досліджень [1, 2]. Такі пластинки й оболонки являють собою основні несучі елементи відповідальних інженерних конструкцій і споруд, що застосовуються в сучасному будівництві. В поєднанні з обмеженнями по питомій вазі і необхідністю забезпечення достатнього рівня надійності, представляють підвищені вимоги до використання таких конструкційних матеріалів. Найбільш повно цим вимогам відповідають композитні матеріали, широкі можливості варіювання внутрішньої структури яких надають ефективний інструмент цілеспрямованого управління параметрами композитних тонкостінних систем і відкривають шлях до створення раціональних легких конструкцій, що найкращим чином відповідають всім особливостям режиму їх експлуатації [4].

Впровадження композитних матеріалів в тонкостінні сталеві несучі елементи конструкцій і їх широке використання в різноманітних галузях сучасного будівництва виявили необхідність врахування нових факторів і поставили принципово нові завдання як до композитних матеріалів, так і конструкцій на їх основі [5].

Зв'язок з науковими і практичними завданнями та аналіз останніх досліджень і публікацій. Розрахунку напружено-деформованого стану, пружної стійкості тонкостінних оболонок та пружного і в'язкопружного заповнювача, що міститься в них, присвячені праці [1, 2]. Крім того, ці питання в тій чи іншій мірі розглядаються в навчальній літературі та монографіях по двигунам на твердому паливі [3]. При цьому з великого розмаїття форм оболонок, заповнювача, їх механічних властивостей, діючих навантажень вибираються параметри, характерні для твердопаливних двигунів.

Аналіз отриманих результатів показав, що зазначений підхід до місцевої стійкості сталевих елементів конструкції може бути застосований для безпосереднього розрахунку будівельних конструкцій, оскільки взаємодія оболонок і пружного масиву формулюються математично по-різному: від моделі Вінклера, для пружної основи, до постановки з урахуванням різниці серединної поверхні оболонки і поверхні контакту її з середовищем і початкового напружено-деформованого стану.

Таким чином, значні труднощі при вирішенні поставленої задачі зводиться до спільного інтегрування рівнянь теорії оболонок і тривимірної теорії пружності при виконанні певних умов на поверхні контакту середовищ та умов закріплення країв.

Формулювання цілей полягає у розробці теоретично обґрунтованого та експериментально перевіреного аналітичного апарату з розрахунку місцевої стійкості сталевих елементів сталезалізобетонних конструкцій.

Виклад основного матеріалу дослідження. Розрахунок таких конструкцій на стійкість повинен вестися з урахуванням різних видів випинання конструкції в цілому і її окремих елементів. Для аналізу місцевої стійкості сталевих елементів сталезалізобетонних конструкцій були обрані сталеві тонкостінні конструктивні елементи з суцільним заповнювачем навантажені симетрично серединної поверхні.

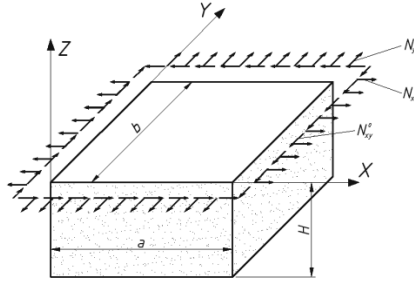


Рис 1. Початковий напружений стан пластини на пружній основі.

Заповнювач досліджуваних конструкції необхідно розглядати як тіло трьох вимірів. У такій точній постановці був виконаний ряд досліджень стійкості [2, 4, 7, 9].

Дослідження таких конструкцій на стійкість загального та місцевого типу являють собою дві самостійні області, в кожній з яких застосовують свої припущення. Дуже часто прямокутна пластинка відіграє роль складової частини тонкостінного стрижня і працює при цьому на стиск в одному напрямку. Практична важливість дослідження такої роботи пластини привела до необхідності створення спрощеної інженерної методики розрахунку, яка заснована на аналізі методів вирішення основного рівняння нейтральної рівноваги.

$$Z_0 = -N_x^0 \omega_{xx} - 2N_{xy}^0 \omega_{xy} - N_y^0 \omega_{yy} \quad (1)$$

Труднощі вирішення задач стійкості пов'язані в основному із задоволенням умов на обмежуючих конструкцію поверхнях і вирішенням складних трансцендентних рівнянь щодо критичних навантажень.

Все це потребує відмовитися від традиційних розрахункових схем і розробки уточнених математичних моделей деформування тонкостінних сталевих елементів підкріплених бетоном. Отже, виходячи з припущення про лінійне розподіл переміщень по товщині заповнювача, ми отримали рівняння стійкості тонкостінної пластинки на пружній основі з урахуванням заповнювача при взаємодії з пластиною чи оболонкою, тобто без обліку нормальних і дотичних напружень в заповнювачі. Тобто з урахуванням зазначеного відносно прогину пластинки ω можливо записати:

$$K_1 K_2 L_1(\omega) - L_2(K_1 \omega_{,xx} + K_2 \omega_{,yy}) + \nabla_0^4 Q_z - \nabla_0^4 (N_x^0 \omega_{,xx} + 2N_{xy}^0 \omega_{,xy} + N_y^0 \omega_{,yy}) = 0. \quad (2)$$

де L_1, L_2, ∇_0^4 – диференціальні оператори теорії оболонки, враховуючи анізотропію пластинки D_{ij} .

Враховуючи розбиття таких конструкцій на пластинчаті елементи, були розглянуті найпоширеніші випадки обпирання пластинки по контуру, що стиснута в одному напрямку, з відповідними граничними крайовими умовами навантажених сторін.

З систем однорідних алгебраїчних рівнянь, враховуючи деформацію пластинки з жорстко зв'язаною з нею пружною основою, були отримані вирази для визначення критичного навантаження (див. табл.1), що були підтверджені експериментальними дослідженнями.

Табл. 1

Визначення граничного навантаження тонкостінної сталеві пластинки на пружній основі з різними крайовими умовами

Метод закріплення навантажених країв	Формула визначення критичного навантаження
Шарнірне обпирання	$N_{sp} = \min_{(i)} \left\{ \frac{a^2 b}{k^2 \pi^2} \left[F \left(\frac{k\pi}{a}, \frac{\pi}{b} \right) + q_{z\cdot 1} \right] \right\}$
Жорстке затиснення	$N_{sp} = \frac{a^2 b}{3\pi^2} \min_{(k)} \left\{ \frac{1}{k^2} \left[F_1 \left(\frac{k\pi}{a}, \frac{2\pi}{b} \right) + 2q_{z\cdot 0} + 2q_{z\cdot 2} \right] \right\}$
Вільне обпирання	$N_{sp} = \min_{(i)} \left\{ \frac{a^2 b}{k^2 \pi^2} \left[F \left(\frac{k\pi}{a} \right) + q_{z\cdot 0} \right] \right\}$

Критичне навантаження N_{sp} знаходиться мінімізацією правої частини виразу по відношенню до $k=1, 2, 3, \dots$, а функція навантаження має вигляд:

$$F \left(\frac{k\pi}{a}, \frac{n\pi}{b} \right) = \left[K_1 \left(\frac{k\pi}{a} \right)^2 + K_2 \left(\frac{n\pi}{b} \right)^2 \right] \frac{\Delta_{kn}^{(1)}}{\Delta_{kn}^{(2)}} + K_2 \varepsilon_2 \frac{\Delta_{kn}}{\Delta_{kn}^{(2)}} \quad (3)$$

$$F_1 \left(\frac{k\pi}{a}, \frac{2\pi}{b} \right) = \left[3K_1 \left(\frac{k\pi}{a} \right)^2 + K_2 \left(\frac{2\pi}{b} \right)^2 \right] \frac{\Delta_k^{(3)}}{\Delta_k^{(4)}} + 3K_1 \varepsilon_2 \frac{\Delta_k^{(5)}}{\Delta_k^{(4)}} \quad (4)$$

де K_1, K_2 - жорсткісні параметри, що характеризують поперечні зсуви.

Значення складових $\Delta_{kn}, \Delta_{kn}^{(1)}, \Delta_{kn}^{(2)}$ знаходиться за наступними формулами, враховуючи сумісну деформацію пластинки з пружною основою:

$$\begin{aligned}
 \Delta_{kn} &= \alpha_k^4 + 2(2\mu_1 + \nu_1)\alpha_k^2\beta_n^2 + \mu_{21}\beta_n^4; \quad \Delta_{kn}^{(1)} = \alpha_k^4 + (1 - \nu_1\nu_2 - 2\nu_2\mu_2)\alpha_k^2\beta_n^2 + \mu_1\beta_n^4; \\
 \Delta_{kn}^{(2)} &= \Delta_{kn}^{(1)} + (\varepsilon_2 + \varepsilon_1\mu_2)\alpha_k^2 + (\varepsilon_1 + \varepsilon_2\mu_1)\beta_n^2 + \varepsilon_1\varepsilon_2; \\
 \Delta_{kn}^{(3)} &= 3D_1D_3\left(\frac{k\pi}{a}\right)^4 + [(3 - \nu_1\nu_2)D_2 - 2\nu_2D_3]D_1\left(\frac{2k\pi^2}{ab}\right) + D_2D_3\left(\frac{2\pi}{b}\right)^4; \\
 \Delta_{kn}^{(4)} &= \Delta_{kn}^{(3)} + 3(D_1K_2 + D_3K_1)\left(\frac{k\pi}{a}\right)^2 + (D_3K_2 + 3D_2K_1)\left(\frac{2\pi}{a}\right)^2 + 3K_1K_2; \\
 \Delta_{kn}^{(5)} &= 3D_1\left(\frac{k\pi}{a}\right)^4 + 2(\nu_2D_1 + D_3)\left(\frac{2k\pi^2}{ab}\right) + D_2\left(\frac{2\pi}{b}\right)^4.
 \end{aligned} \tag{5}$$

де, враховуючи ізотропію пластинки:

$$\mu_1 = \frac{G(1 - \nu^2)}{E} \tag{6}$$

D_1 – циліндрична жорсткість пластинки;

ν та E – коефіцієнт Пуассона і модуль пружності матеріалу пластини;
 q_{zkn} – складова, що враховує реакцію пружного заповнювача.

$$q_z = 2G_s\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}\frac{f_1 + \chi g_1}{f_2 + \chi g_2} \tag{7}$$

де G_s – модуль зсуву пружної основи;

ν та E – коефіцієнт Пуассона і модуль пружності матеріалу основи;

$$f = (1 - 2\nu_s)sh^2\eta^* + \gamma_+\gamma_-H^2 + 2(1 - \nu_s)(1 - 2\nu_s)(1 - \gamma_+/\gamma_-);$$

$$f_1 = (1 - \nu_s)(sh2\eta^* - 2\gamma_-H);$$

$$f_2 = (3 - 4\nu_s)ch^2\eta^* + \gamma_+\gamma_-H^2 + (1 - 2\nu_s)[3 - 4\nu_s - 2(1 - \nu_s)\gamma_+/\gamma_-];$$

$$g_1 = sh^2\eta^* - \gamma_+\gamma_-H^2 + 2(1 - \nu_s)(1 - 2\nu_s)(\gamma_+/\gamma_- + \gamma_-/\gamma_+ - 2); \tag{8}$$

$$g_2 = (1 - \nu_s)(sh2\eta^* + 2\gamma_-H);$$

$$\chi = -2G_s\frac{2\alpha\beta d_w - \alpha^2 d_x - \beta^2 d_y + 2G_s\gamma_+^3 th\eta^*}{B\gamma_+^2 d_{op} - G_s(2\alpha\beta d_w + \alpha^2 d_x + \beta^2 d_y)\gamma_+ th\eta^*};$$

Таким чином, задача зводиться до ітераційного уточнення виразів наведених у табл. 1, тобто зниження несучої здатності залежно від параметрів хвилеутворення.

Підводячи підсумок, всі значення критичних навантажень представлені у таблиці 2.

Табл.2

Порівняння несучої здатності

Зразки серії	Несучаздатність, кН		
	Легкі сталеві тонкостінні елементи		
	Експериментальні значення	За теорією пружності	За запропованою теорією
ПОВ	2,5	3,04	3,34
ПОШ	14,05	17,57	17,54
ПОЗ	43,50	42,96	37,52
	Тонкостінні сталеві елементи, підкріплені легким полімербетоном		
ПБВ	29,50	-	28,23
ПБШ	41,50	-	52,34
ПБЗ	78,50	-	74,87

Примітка: ПОВ та ПБВ, ПОШ та ПБШ, ПОЗ та ПБЗ – вільний край, шарнірне обпирання, затиснення відповідно.

Обговорення результатів. Різниця критичного навантаження для зразків серії ПОВ та ПБВ склала не більше 8,9 %; для зразків серії ПОЗ та ПБЗ близько 14 %, оскільки в теоретичному розрахунку не були враховані незначні ребра жорсткості для моделювання защемлення поздовжніх сторін; значна відмінність в критичному навантаження для зразків серії ПОШ та ПБШ обумовлена тим, що в експериментальних дослідженнях досить важко отримати ідеальний шарнір, очевидно, що для зразків з бетонною складовою це відхилення виявляється меншим.

Висновки. В результаті теоретично-експериментальних досліджень місцевої стійкості тонкостінних сталевих елементів, підкріплених легким бетоном було встановлено вплив різних граничних умов пластинчатого елемента конструкції, та їх вплив на несучу здатність, що потрібно враховувати при проектуванні.

ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Андреев А.Н. Многослойные анизотропные оболочки и пластины: Изгиб, устойчивость, колебания / А.Н. Андреев, Ю.В. Немировский - Новосибирск: Наука, 2001. - 288с.
2. Зубчанинов В.Г. Основы теории упругости и пластичности / В.Г. Зубчанинов - М.: Высшая школа, 1990 - 368с.
3. Ильгамов М.А. Расчет оболочек с упругим наполнителем / М.А. Ильгамов, В.А. Иванов, Б.В. Гулин М.: Изд. «Наука», 1987. – 133 с.
4. Стрелецкий Н.Н. Сталезелобетонные конструкции в нашей стране / Н.Н. Стрелецкий // Металлические конструкции: Работы школы Н.С. Стрелецкого. – М., 1995. – С. 126 - 132.
5. Vogdt F. Conceptual and Structural Design of Building Made of Lightweight and Infra-lightweight Concrete. / Vogdt F., Schlaich M., Hillemeier B. // Berlin, 2010. – 105 pp.