

## ЧАСТКОВІ ТЕОРЕТИЧНІ ЗАДАЧІ РОБОТИ РЕБЕР ЖОРСТКОСТІ В ЄМНІСНИХ КОНСТРУКЦІЯХ

У статті розглянуто дві спеціальні теоретичні задачі стосовно роботи ребер жорсткості в сталевих ємнісних конструкціях для сипучих матеріалів. Перша задача присвячена визначенню ступеня сумісності роботи обшивки споруди із ребром, друга – оптимізації зовнішньої форми ребра. Обидві задачі мають важливе практичне значення, оскільки всі існуючі конструктивні схеми сталевих ємнісних споруд передбачають використання підсилюючих ребер жорсткості.

В статье рассмотрены две частные теоретические задачи относительно работы ребер жесткости в стальных емкостных конструкциях для сыпучих материалов. Первая задача посвящена определению степени совместности работы обшивки сооружения с ребром, вторая – оптимизации внешней формы ребра. Обе задачи имеют важное практическое значение, поскольку все существующие конструктивные схемы стальных емкостных сооружений предусматривают использование подкрепляющих ребер жесткости.

In the paper two special theoretical problems as for working of stiffening ribs in steel capacity structures for granular materials are presented. The first problem is devoted to determination of degree of joint work of the wall together with the rib; the second one – to optimization of external shape of the rib. Both the problems have important practical meaning because all the existing constructive schemes of steel capacity structures foresee the usage of stiffening ribs.

### 1. Конструктивні схеми сталевих ємнісних споруд

Сталеві ємнісні споруди, призначені для зберігання різноманітних сипучих матеріалів, використовуються дуже широко в багатьох галузях промисловості, сільського господарства, транспортній сфері. Їх розповсюдженість обумовлена надзвичайною різноманітністю та кількістю сипучих матеріалів, які є як початковою сировиною, так і кінцевою продукцією досить значної кількості технологічних процесів.

Незважаючи на подібне різноманіття, в конструктивному відношенні сталеві ємності традиційно виконуються за достатньо типовою конструктивною схемою [1 – 4]. Вона являє собою просторову оболонку із сталевих листів відносно невеликою товщини (4...16 мм), яка формує зовнішню форму споруди (рис. 1) Для можливості сприйняття технологічного навантаження від тиску сипучого матеріалу, що зберігається, оболонка підсилюється ребрами жорсткості, які додатково сприяють підвищенню жорсткості споруди. В свою чергу, ребра здебільшого виконуються зі стандартних прокатних профілів – кутників, швелерів, таврів та двутаврів. За значних навантажень ребра виконують зварними, переважно, таврового та двотаврового перерізів. Їх з'єднання із обшивкою також виконують за допомогою зварювання.

Проте, як свідчить накопичений досвід будівництва та експлуатації сталевих ємнісних

споруд, подібна конструктивна схема має низку недоліків, починаючи зі значної нерівномірності напружено-деформованого стану конструкції і закінчуючи невисокою технологічністю її виготовлення та низькою ремонтпридатністю. Результатом цього нерідко виявляються різноманітні відмови та аварійні ситуації, які суттєво підвищують рівень експлуатаційних витрат [5 – 7]. При цьому фахівці однозначно вказують на необхідність вдосконалення як методів розрахунку ребер жорсткості, так і їх конструкції, адже саме вони виявляються найнапруженішим елементом конструкції [8].

Вітчизняними фахівцями ряду проектних організацій були запропоновані різноманітні покращені конструктивні схеми. Вони передбачають, наприклад, використання розривних ребер жорсткості або їх непарне розташування. Однак їх ефективність, як свідчать результати комп'ютерного моделювання, залишається невисокою [9, 10].

В закордонній практиці для силосних сталевих ємностей було запропоновано дещо іншу конструктивну схему із використанням гофрованих листів (рис. 2). Вона не передбачає підкріплюючих ребер жорсткості і дозволяє уникнути низки недоліків, притаманних існуючій конструктивній схемі. Проте така конструктивна схема може використовуватись лише за невеликих навантажень. Для бункерних ємностей, в яких зберігаються здебільшого важкі сипучі

матеріали із щільністю понад  $1 \text{ т/м}^3$ , вона виявляється непридатною.

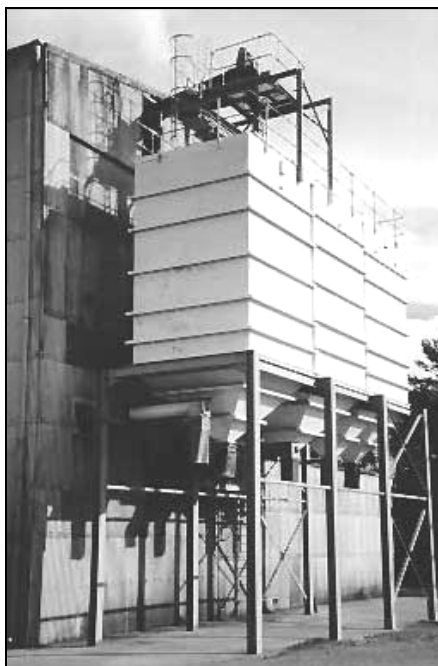


Рис. 1. Сталеві ємнісні конструкції традиційної конструктивної схеми



Рис. 2. Сталеві силосні ємності із гофрованих листів

Зважаючи на це, автором була розроблена і запатентована більш досконала панельна конструктивна схема [11, 12]. Вона передбачає у своєму складі внутрішній плоский та зовнішній гофрований сталеві листи, а також контурні об'язувальні елементи (рис. 3).

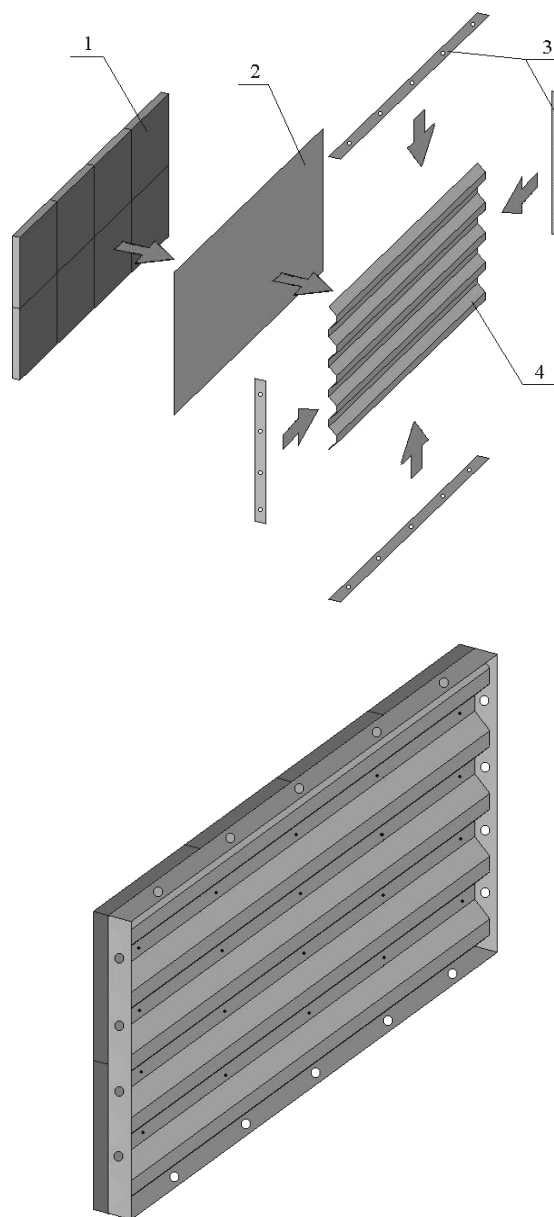


Рис. 3. Конструктивна схема панелі:  
 1 – футерувальний шар; 2 – внутрішній лист;  
 3 – об'язувальний елемент;  
 4 – зовнішній профільований лист

Її ефективність, як свідчать результати комп'ютерного моделювання [13, 14], вища ніж традиційної схеми. Така схема має низку конструктивних і технологічних переваг та може бути використана для ємностей будь-якого типу.

## 2. Розрахунок ребер жорсткості

В усіх наведених вище конструктивних схемах сталевих ємнісних споруд для сипучих матеріалів одним з основних конструктивних елементів є ребра жорсткості. Вони можуть мати різну зовнішню форму та розташовуватись із різним кроком по висоті, однак саме вони визначають напружено-деформований стан конструкції в цілому. Тому від їх якісного та точного розрахунку залежить матеріаломісткість, надійність та довговічність самої споруди.

Між тим, існуючі методики підбору перерізу ребер жорсткості засновані на використанні плоских розрахункових схем. Ребро жорсткості розглядається при цьому як окрема балка, що вимагає використання при розрахунку деяких припущень. Одним з ключових питань при цьому є ступень сумісності роботи обшивки з ребром жорсткості. Відповідно до існуючих рекомендацій, вона має дорівнювати величині 30 товщин обшивки [3, 4], хоча в більш ранніх виданнях рекомендувалась величина 60 товщин [1]. Відповідне теоретичне обґрунтування авторами не наводиться, отже виникає питання щодо дійсної роботи цього конструктивного вузла.

При використанні ребер замкненого профілю ключовим питанням є вибір їх форми. Його дослідженню присвячені досить відомі роботи [15 – 17], однак по відношенню до ємнісних конструкцій це питання залишається відкритим.

Автором були розглянуті ці дві ключові задачі, які, незважаючи на відносну простоту, мають важливе практичне значення. Вони обидві представлені в даній публікації, оскільки мають відношення до одного виду конструкцій.

### 3. Визначення ступеня сумісності роботи обшивки з ребром жорсткості

Дана задача формулюється наступним чином. Нехай є пластина товщиною  $t$ , підкріплена ребром жорсткості (для конкретності на рис 4 представлено таврове ребро). При прикладенні навантаження до її внутрішньої поверхні пластина разом із ребром жорсткості вигинається, причому частина пластини працює сумісно із ребром жорсткості. Таким чином, виникає питання, яка саме частина пластини виявляється при цьому задіяною. Конструктивно цю частину прийнято визначати у кількості товщин пластины  $k \cdot t$ , де  $k$  – і є ця частина.

Для визначення параметру  $k$  була використана наступна методика. Його величина може бути знайдена, якщо відомо положення нейтра-

льної осі  $OZ$  при згині ребра разом із частиною пластины. Вона поділяє поперечний переріз сформованої таким чином балки (на рис. 4 показано більш темним кольором) в загальному випадку на дві частини – ліву стиснуту і праву розтягнуту. Відстані до крайніх волокон цих частин визначаються відповідно, як  $c_1$  і  $c_2$ .

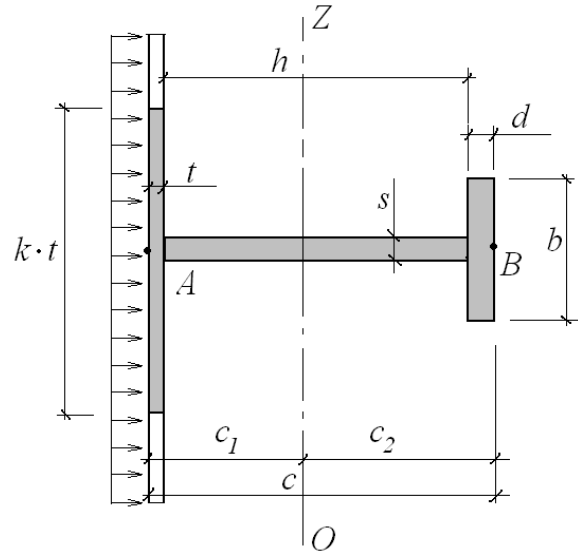


Рис. 4. Сумісна робота пластины із ребром жорсткості

Координата центра ваги  $c_1$  може бути обчислена за виразом:

$$c_1 = \frac{0,5 \cdot k \cdot t^3 + h \cdot s \cdot (0,5 \cdot h + t)}{k \cdot t^2 + h \cdot s + b \cdot d} + \frac{b \cdot d \cdot (0,5 \cdot d + h + t)}{k \cdot t^2 + h \cdot s + b \cdot d}, \quad (1)$$

де всі умовні позначення розмірів наведені за рис. 4.

З цього виразу можна отримати вираз для визначення параметру  $k$ :

$$k = \frac{h \cdot s \cdot (0,5 \cdot h + t - c_1)}{t^2 \cdot c_1 - 0,5 \cdot t^3} + \frac{b \cdot d \cdot (0,5 \cdot d + h + t + c_1)}{t^2 \cdot c_1 - 0,5 \cdot t^3}. \quad (2)$$

В цьому виразі залишається одна невідома величина – відстань до центру ваги  $c_1$ . Її можна визначити, знаючи рівень напружень в точках  $A$  і  $B$  перерізу –  $\sigma_A$  та  $\sigma_B$ . Саме їх комбінація визначить величину параметру  $k$ .

В свою чергу, напруження  $\sigma_A$  та  $\sigma_B$  можна знайти, використавши чисельні розрахунки за допомогою одного з досить поширених сучасних методів будівельної механіки – методу скі-

нчення елементів. Його практична реалізація проводилась на базі проектно-обчислювального комплексу SCAD for Windows [18, 19].

Побудована скінченно-елементна модель являла собою пластину, підкріплену ребрами жорсткості (рис. 5). По двох вертикальних гранях були поставлені шарнірно-нерухомі умови обпирання. В якості навантаження приймалось рівномірне розподілене по всій внутрішній площині пластини навантаження одиничного значення.

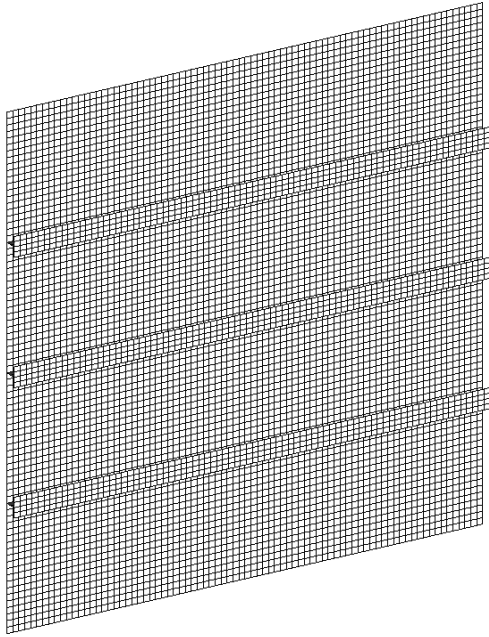


Рис. 5. Розрахункова модель пластини, підкріпленої ребром жорсткості

Основна складність при визначенні напружень в точках  $A$  і  $B$  полягала в тому, що вони містили в собі як згинальну складову, причому у двох площинах, так і складову від розтягу. Для обчислення ж параметру  $k$  потрібна тільки згинальна складова в площині розташування ребра жорсткості. Тому був використаний наступний підхід.

В точках  $A$  і  $B$  відповідно до розрахунків визначались згинальні моменти  $M_A$  і  $M_B$ . Далі в кожній з цих точок відповідно до виразів (3) і (4) визначалась складова від згину в площині розташування ребра жорсткості  $M_y^{lin}$  за виразом (5):

$$M_x = -D \cdot \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \mu \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) = M_x^{lin} + \mu \cdot M_y^{lin}; \quad (3)$$

$$M_y = -D \cdot \left( \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \mu \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) = M_y^{lin} + \mu \cdot M_x^{lin}; \quad (4)$$

$$M_x^{lin} = \frac{M_x - \mu \cdot M_y}{1 - \mu^2}. \quad (5)$$

де  $\mu$  – коефіцієнт Пуассона.

Знайдені таким чином величини моментів відповідають тільки згину в площині ребра жорсткості для точок  $A$  і  $B$ , відповідно  $M_{Ax}^{lin}$  і  $M_{Bx}^{lin}$ .

Далі, розглядаючи згин умовної балки, утвореної ребром жорсткості з частиною обшивки, можна записати вирази для визначення в точках  $A$  і  $B$  напружень за виразами (6) і (7), відповідно:

$$\sigma_A = \frac{M_{Ax}^{lin}}{I_z} \cdot c_1; \quad (6)$$

$$\sigma_B = \frac{M_{Bx}^{lin}}{I_z} \cdot c_2, \quad (7)$$

де  $I_z$  – момент інерції умовної балки.

Враховуючи, що  $c_1 + c_2 = c$ , з виразів (6) і (7) можна отримати вираз для визначення відстані  $c_1$  у вигляді:

$$c_1 = \frac{\sigma_A \cdot M_{Bx}^{lin}}{\sigma_A \cdot M_{Bx}^{lin} + \sigma_B \cdot M_{Ax}^{lin}} \cdot c. \quad (8)$$

Підставляючи знайдену таким чином відстань  $c_1$  у вираз (2), отримаємо шукане значення параметру  $k$ , який у фізичному відношенні вказує на кількість товщин обшивки, які беруть участь у згині в площині ребра жорсткості разом з цим ребром.

Змінюючи в ході чисельних розрахунків крок розташування ребер жорсткості і товщину пластинки за незмінних геометричних параметрів ребра жорсткості, умов закріплення і величини прикладеного навантаження, були визначені величини параметру  $k$ , представлені в табл. 1.

Таблиця 1

Отримані значення параметру  $k$

		Крок ребер жорсткості, см		
		80	120	150
Товщина обшивки, см	0,4	21	41	55
	0,6	40	68	90
	0,8	58	95	123
	1,0	76	121	154
	1,2	90	145	183
	1,4	110	166	212
	1,6	122	190	238

Відмітимо, що вказані параметри варіювались у діапазонах, які найбільш часто використовуються в практиці проектування ємнісних конструкцій. Значення параметру  $k$  визначались для середньої частини оребреної пластини, де при шарнірному обпиранні виникають найбільші згинальні моменти.

Для випадку співвідношення параметрів, виділеному у табл. 1 більш темним кольором, в ході експериментальних досліджень [20] були отримані значення в діапазоні 109...119, що досить добре узгоджується із теоретичними результатами, отриманими вище.

Таким чином, слід вважати, що мінімальне значення параметру  $k = 30$ , рекомендоване діючою методикою проектування ємнісних споруд за невеликої товщини стінки ємності виявляється таким, що не іде у запас міцності. Причому перебільшення складає майже 1,5 рази. Це є досить небезпечним фактором, який може призводити до виникнення аварійних ситуацій.

Зазначимо також, що представлений підхід може бути використаний для проведення аналогічних розрахунків і для ребер жорсткості іншої симетричної форми.

#### 4. Оптимізація форми ребра жорсткості

Дана задача формується наступним чином. Нехай є пластина товщиною  $t$ , підкріплена ребром жорсткості замкненого профілю (для конкретності на рис. 6 представлено ребро у вигляді трапеції). При прикладенні навантаження до її внутрішньої поверхні пластина разом із ребром жорсткості вигинається. При цьому пластина розглядається як конструктивно незмінний елемент, тому на остаточний результат її неврахування ніяким чином не позначиться.

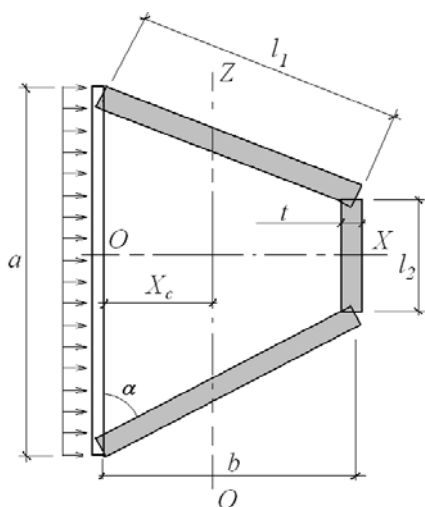


Рис. 6. Ребро жорсткості у вигляді трапеції

Фізично задача формується у вигляді відшукування таких розмірів окремих елементів ребра жорсткості, за яких площа його поперечного перерізу, а значить і маса всього ребра, були б мінімальні за умови сталої величини згинального моменту інерції поперечного перерізу ребра в площині дії навантаження. Товщина ребра при цьому є постійною величиною, що фізично відповідає випадку, коли ребро виготовляється, наприклад, штампуванням з плоского листа. Обмеження щодо згинального моменту інерції прийнято, оскільки саме згинальні зусилля є в багатьох випадках визначальними з точки зору несучої спроможності конструкції в цілому.

Математично задача може бути сформульована наступним чином. Спочатку знайдемо величину відстані до центру ваги поперечного перерізу  $X_c$ , яка визначається виразом:

$$X_c = \frac{(l_1^2 + l_1 \cdot l_2) \cdot \sin \alpha}{2 \cdot l_1 + l_2}, \quad (9)$$

де прийняті позначення геометричних розмірів окремих частин поперечного перерізу ребра відповідають рис. 6.

Далі може бути знайдений центральний момент інерції, який у розглянутому випадку одночасно буде і головним, за виразом:

$$I_{zc} = \frac{2 \cdot A_0 \cdot t \cdot l_1^3 \cdot \sin^2 \alpha - 3 \cdot t \cdot l_1^4 \cdot \sin^2 \alpha}{3 \cdot A_0}, \quad (10)$$

де  $A_0$  – умовна площа, яка визначається відношенням площі  $A$  поперечного перерізу до товщини її елементів за виразом  $A_0 = A/t$ .

Тепер відшукаємо спеціальні рішення за умов, якщо незмінною є довжина верхньої та нижньої граней ребра  $l_1$  або кут їх нахилу  $\alpha$ . Ці два критерії визначають форму поперечного перерізу ребра жорсткості.

В першому випадку математична умова буде мати вигляд виразу (11):

$$\frac{\partial I_{zc}}{\partial l_1} = 0. \quad (11)$$

Знайдене рішення буде мати вигляд виразів (12) і (13):

$$l_1 = \frac{A}{2 \cdot t}; \quad (12)$$

$$l_2 = 0. \quad (13)$$

Фізично ці вирази означають, що довжина вертикальної частини трапецеїдального ребра

жорсткості має дорівнювати нулю. Тобто за своєю геометричною формою ребро стає виродженим і приймає форму трикутника. Згідно із сформульованою задачею при цьому згинальний момент інерції такого перерізу буде максимальний при фіксованій площі.

У другому випадку математична умова буде мати вигляд виразу (14):

$$\frac{\partial I_{zc}}{\partial(\sin \alpha)} = 0. \quad (14)$$

Відповідно до цієї умови можна отримати два рішення. Перше буде мати вигляд виразів (15) і (16):

$$l_1 = \frac{2 \cdot A}{3 \cdot t}; \quad (15)$$

$$l_2 = -\frac{A}{3 \cdot t}. \quad (16)$$

Таке рішення не має фізичного змісту, оскільки довжина бокової сторони ребра жорсткості не може бути від'ємною величиною.

Друге рішення визначиться виразом:

$$\alpha = 0. \quad (17)$$

Воно виявляється виродженням і також не має фізичного змісту. Таким чином, найбільш раціональним відповідно до умов сформульованої задачі слід визнати ребро жорсткості з трикутною геометричною формою поперечного перерізу.

Зазначимо також, що оскільки в якості вихідних умов було прийнято сталу товщину елементів поперечного перерізу ребра жорсткості, то порівнявши вирази для визначення площі поперечного перерізу ребра (18) і його зовнішнього периметру (19), можна прийти до наступного висновку:

$$A = 2 \cdot l_1 \cdot t + l_2 \cdot t; \quad (18)$$

$$P = 2 \cdot l_1 + l_2. \quad (19)$$

Визначена вище оптимальна трикутна форма поперечного перерізу ребра жорсткості з точки зору згинальної міцності виявляється водночас оптимальною і з точки зору площі бокової поверхні. Така умова має неабияке практичне значення, оскільки виявляється досить важливою при агресивному зовнішньому середовищі, в якому передбачається експлуатація ємнісної конструкції. Адже площа поверхні, яка буде взаємодіяти з таким середовищем, виявляється найменш можливою.

Зроблений висновок є справедливим тільки при постійній товщині ребра, тому більш доцільними є штамповані, а не зварні з різних листів ребра.

## 5. Основні висновки

Підсумовуючи отримані результати вирішення двох теоретичних задач стосовно роботи підсилюючих ребер жорсткості в сталевих ємнісних конструкціях для зберігання сипучих матеріалів, автор прийшов до наступних висновків.

1. Проведення розрахунків ребер жорсткості згідно з діючими рекомендаціями може призводити до помилок при врахуванні ступеню сумісності їх роботи разом із обшивкою конструкції. Особливо це виявляється небезпечним за невеликої товщини обшивки – до 4 мм включно.

2. Для запобігання помилці такого роду рекомендується не включати обшивку в сумісну роботу з ребром жорсткості у випадку аналітичного розрахунку.

3. Для отримання більш точної картини напружено-деформованого стану вузла з'єднання ребра жорсткості із обшивкою слід використовувати методи комп'ютерного моделювання, зокрема метод скінченних елементів.

4. Найбільш раціональною формою ребра жорсткості замкненого профілю є трикутна форма. Вона забезпечує найнижчу матеріаломісткість.

5. Ребра жорсткості замкненого профілю доцільно виготовляти таким способом (наприклад, штампуванням), щоб забезпечувалась однакова товщина всіх його елементів. При цьому таке ребро буде мати крім найнижчої матеріаломісткості, ще й найнижчу площу бокової поверхні, яка контактує із зовнішнім середовищем. Це виявляється особливо важливим у випадку агресивного середовища, в якому працюють багато ємнісних споруд промислових підприємств.

## БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Лессиг, Е. И. Листовые металлические конструкции [Текст] / Е. И. Лессиг, А. Ф. Лилеев, А. Г. Соколов. – М.: Стройиздат, 1970. – 488 с.
2. Справочник проектировщика. Металлические конструкции [Текст] / под ред. Н. П. Мельникова. – [2-е изд.] – М.: Стройиздат, 1980. – 776 с.
3. Руководство по расчету и проектированию железобетонных, стальных и комбинированных бункеров [Текст] / Ленпромстройпроект. – М.: Стройиздат, 1983. – 200 с.

4. Справочник проектировщика. Металлические конструкции: в 3 т. [Текст] / под ред. В. В. Кузнецова. – М.: Изд-во АСВ, 1998. – Т. 2: Стальные конструкции зданий и сооружений. – 1998. – 526 с.
5. Технические решения по ликвидации дефектов бункеров склада товарного глинозема Николаевского глиноземного завода [Текст] / Уральский электромеханический ин-т инж. ж/д трансп. – Свердловск, 1982. – 20 с.
6. Криворожский государственный горно-металлургический комбинат «Криворожсталь». Доменная печь № 9. Бункерная эстакада. Обследование и оценка технического состояния металлоконструкций : отчет о НИР, в 3 т. [Текст] / ОАО Проектный институт «Днепрпроектстальконструкция». – Д., 1997. – 226 с.
7. Банников, Д. О. Основные причины аварий жестких стальных бункеров и низких силосов [Текст] / Д. О. Банников, М. И. Казакевич // Металеві конструкції. – 2002. – Т. 5, № 1. – С. 59-66.
8. Ягофаров, Х. Основы теории проектирования листовых металлических конструкций. Пирамидально-призматический бункер [Текст] / Х. Ягофаров, Н. Н. Собакин. – Екатеринбург: УрГУПС, 2006. – 234 с.
9. Банников, Д. О. Расчет пирамидально-призматических бункеров методом конечных элементов [Текст] / Д. О. Банников, М. И. Казакевич. – Д.: Наука и образование, 2003. – 150 с.
10. Банников, Д. О. Сопоставительный анализ конструктивных схем стальных бункерных емкостей [Текст] / Д. О. Банников, М. И. Казакевич // Металеві конструкції. – 2007. – Т. 13, № 3. – С. 163-172.
11. Декл. пат. 69817 А Україна, МПК<sup>7</sup> Е 04 Н 7/30. Металева ємність для сипучих матеріалів із окремих панелей [Текст] / Д. О. Банніков, М. І. Казакевич; заявник та патентовласник Дніпропетр. нац. ун-т заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – № 200331211224; заявл. 09.12.03; опубл. 15.09.04, Бюл. № 9.
12. Декл. пат. 70576 А Україна, МПК<sup>7</sup> Е 04 Н 7/30. Вузол з'єднання стінових панелей металевих ємностей для сипучих матеріалів [Текст] / Д. О. Банніков, М. І. Казакевич; заявник та патентовласник Дніпропетр. нац. ун-т заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – № 20031211267; заявл. 09.12.03; опубл. 15.10.04, Бюл. № 10.
13. Банников, Д. О. Новая конструкция бункерной емкости из стальных панелей [Текст] / Д. О. Банников, М. И. Казакевич, Л. М. Рабер // Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'. – 2007. – № 6. – С. 98-102.
14. Банніков, Д. О. Напружено-деформований стан сталеві панелі бункерної ємності [Текст] / Д. О. Банніков // Зб. наук. робіт ДНУ: Методи розв'язання прикладних задач механіки деформівного твердого тіла. – Д.: Наука і освіта. – 2006. – Вип. 7. – С. 3-10.
15. Брудка, Я. Стальные складчатые конструкции в строительстве [Текст] / Я. Брудка, Р. Гарнцарек, К. Милачевски; пер. с польск. – К.: Будівельник, 1989. – 152 с.
16. Расчет прочности ребристых оболочек инженерных конструкций [Текст] / И. В. Андрианов и др. – К.-Донецк: Вища шк., 1986. – 104 с.
17. Енджиевский, Л. В. Нелинейные деформации ребристых оболочек [Текст] / Л. В. Енджиевский. – Красноярск: Изд-во Краснояр. ун-та, 1982. – 296 с.
18. SCAD для пользователя [Текст] / В. С. Карпиловский и др. – К.: ВВП Компас, 2000. – 332 с.
19. Формирование сечений и расчет их геометрических характеристик [Текст] / В. С. Карпиловский и др. – К.: ВВП Компас, 2000. – 80 с.
20. Экспериментальное исследование стенок бункеров на моделях : отчет о НИР по теме № 9 148-51-81 (заключит.) [Текст] / Госуд. проектн. ин-т строит. металлоконструкций «Днепрпроектстальконструкция». – Д., 1982. – 413 с.

Надійшла до редколегії 10.03.2009.