

УДК 532.5:519.6

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.170.2017.111295>

ДО ПИТАННЯ РОЗРАХУНКУ ТОНКОСТІННИХ КОНСТРУКЦІЙ СИЛОСНИХ СПОРУД ІЗ ВИСОКОМІЦНИХ СТАЛЕЙ

Доктори техн. наук О. І. Лапенко (НАУ), А. В. Махінько (ТОВ «Етуаль»),
канд. техн. наук Н. О. Махінько (НАУ)

К ВОПРОСУ РАСЧЕТА ТОНКОСТЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ СИЛОСНЫХ СООРУЖЕНИЙ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ

Доктора техн. наук А. И. Лапенко (НАУ), А. В. Махинько (ООО «Этуаль»),
канд. техн. наук Н. А. Махинько (НАУ)

TO THE QUESTION OF STRUCTURAL ANALYSIS OF SILO STRUCTURES MADE OF HIGH-STRENGTH STEELS

Doct. of techn. sciences A. Lapenko, A. Makhinko, Ph.D. in Engineering N. Makhinko

У статті подано результати розрахунку конструкцій силоса діаметром 22 м, виконаних зі сталі підвищеної міцності S550 GD з наступним детальним аналізом несучої здатності основних елементів. Обґрунтовано рішення щодо недоцільності застосування конструкційних сталей з умовною границею текучості з точки зору забезпечення надійності й безпеки конструкцій силосних ємностей, а також фактори, які це обумовлюють.

Ключові слова: силос, несуча здатність, напружено-деформований стан, тиск зерна, сталь S550GD.

В статье приведены результаты расчета конструкций силоса диаметром 22 м, выполненных из стали повышенной прочности S550GD с последующим детальным анализом несущей способности основных элементов. Обосновано решение о нецелесообразности применения конструкционных сталей с условной границей текучести с точки зрения обеспечения надежности и безопасности конструкций силосных емкостей, а также факторы, которые это обуславливают.

Ключевые слова: силос, несущая способность, напряженно-деформированное состояние, давление зерна, сталь S550GD.

Silos are the tall containers used to store bulk solids. The article presents results of structural analysis of silo with diameter of 22 m, constructed from high-strength steel S550GD. The research results are of both sci-entific and practical interest. In this study, the mathematical model of the silo was used in the SCAD 21.1 software complex. The silos section was modeled with flat shell finite elements. Vertical stiffeners and roof was modeled with finite bar. An analysis of results of calculations showed that silos element will have strengths reserve. The sheets thicknesses and vertical stiffeners can be reduced. Shown the inappropriateness of applying high strength steel in this field construction. This is evidenced in the case below. The value of safety factor value is follow to one. The structure reliability from such high-strength steels is low. The structure failure takes place quickly, and plastic deformations do not develop. The stress-strain state of structures depends on stress concentration hole.

Keywords: Silo, bearing capacity, stress-strain state, pressure of grain, steel S550GD.

Вступ. Наша країна є частиною глобального зернового ринку із позитивною тенденцією щорічного зростання. Сезонний характер виробництва зерна і постійна висока споживча необхідність викликають потребу його зберігання протягом тривалого терміну. Лише правильне складування сировини у сховищах дає можливість поставляти якісне зерно, відповідно до суворих правил країн-імпортерів. Для забезпечення цих вимог найбільш масово та широко аграріями використовуються сталеві оцинковані силоси. Ці споруди дають змогу здійснювати високотехнологічне переміщення зерна, його кондиціонування та переробку з мінімальним втручанням персоналу. Проте для збільшення рентабельності та зниження вартості конструкції даного виду науковці постійно перебувають у творчому пошуку оптимальної залежності між висотою та радіусом конструкції, з одного боку, і товщиною ребер жорсткості та стінових панелей – з іншого.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останніми роками розрахунки силосних конструкцій мають значний попит серед заводів-виробників. Щоправда, лише малий відсоток цих результатів залишає слід у загальному науковому доробку. Це пов'язано з великою ринковою конкуренцією, адже одного разу вдало реалізований проект може бути розтиражований на значній території. Серед наукових праць, присвячених проблемі розрахунку сталевих круглих силосів, слід відмітити [1, 2, 3].

Визначення мети та задачі дослідження. Одним із інноваційних та перспективних шляхів при проектуванні металевих конструкцій є застосування сучасних сталей підвищеної міцності. Це є логічним кроком реалізації актуальної тенденції впровадження ресурсозберігаючих технологій. Щоправда, лише наукове обґрунтування може бути підставою для вирішення, наскільки виваженим та стратегічно доцільним є такий крок.

Стосовно окреслених передумов була поставлена практична задача оцінки несучої здатності сталевих елементів силоса за допомогою методу скінченних елементів (МСЕ) при виконанні конструкції зі сталі підвищеної міцності S550GD.

Основна частина дослідження. Для розрахунків було обрано сталевий силос типу діаметром 22 м, що являє собою сталеву ємність циліндричної форми, яка влаштовується на плоску бетонну основу. Конструктивно силос виконано у вигляді циліндричної оболонки, підкріпленої зовнішніми ребрами жорсткості. Оболонка складається з профільованих хвилястих оцинкованих панелей номінальною висотою 1152 мм. Товщина сталевих листів, з яких виготовлені панелі, має чотири основні розміри – 1.5, 2.0, 2.5 та 3.0 мм. Товщина стінки силоса, залежно від висоти розташування панелей та величини горизонтального тиску сипкого матеріалу (зерна), набирається з однієї чи декількох панелей і з висотою зменшується від 4,5 мм до 3,5 мм. Окремі панелі з'єднуються між собою за допомогою болтів з ущільнювальними елементами. Для забезпечення вертикальної стійкості панелі підкріплені вертикальними ребрами жорсткості з гнутого профілю трапецеїдальної форми розмірами 280×120 мм. Опори ребер жорсткості закріплюються до залізобетонного кільцевого фундаменту за допомогою анкерних болтів. Товщина поперечного перерізу ребер зменшується з висотою в межах від 2.0 до 6.0 мм.

Покрівля силоса являє собою складну просторову конструкцію, складену із тонкостінних гнутих елементів (прогонів та кільцевих ребер жорсткості) і трапецієподібних секторів на болтах із ущільнювальними прокладками. Сектори виготовлені з оцинкованої сталі і мають кутовий крок 15°. Прогони та кільцеві ребра жорсткості з одного боку кріпляться до краю циліндричного корпусу силосної ємності за допомогою спеціального ущільнювального бандажа, з іншого – до

центрального кільця. Покрівля має ухил 30° . Над покрівлею силоса розташовується надсилосна галерея, що складається із горизонтального моста і двох стійок, які кріпляться безпосередньо до корпусу силоса.

Виготовлення вертикальних ребер жорсткості та листів корпусу силоса передбачається виконувати зі сталі підвищеної міцності S550GD (номер сталі 1.0531). Відповідно до ДСТУ EN 10346 [8] сталь S550GD має такі механічні властивості: умовна границя текучості $R_{yn,0.2} = 550$ МПа, тимчасовий опір $R_{um} = 560$ МПа. Відповідно до положень п. 8.1.1 та п. 10.1.3 [5] розрахунок листів корпусу та вертикальних ребер жорсткості силосних ємностей необхідно виконувати на міцність при додатковому коефіцієнті надійності за матеріалом $\gamma_u = 1.3$ із використанням розрахункового опору R_u , що визначається за тимчасовим опором при розтязі R_{um} (п. 5.4.1 [5]). Окрім цього, відповідно до п. 7.1 [5], при визначенні розрахункового опору R_u необхідно враховувати коефіцієнт надійності за матеріалом $\gamma_m = 1.05$ із табл. 7.2 [5].

Збір розрахункових навантажень на силос виконано відповідно до державних стандартів, чинних на території України:

- характеристики сипкого матеріалу (зерна) відповідно до ДБН В.2.2-8-98 (додаток А, табл. А.1) [7];

- характеристики атмосферних навантажень у місці можливого будівництва відповідно до ДБН В.1.2-2:2006 (розділи 8, 9 із урахуванням зміни № 1) [6];

- характеристики міцності матеріалу силоса (сталь) відповідно до ДСТУ EN 10346 [11] та з урахуванням вимог ДБН В.2.6-198:2014 [5].

Математичну (комп'ютерну) модель силоса типу МСВУ 220.15.В12 (див. рисунок) створено у кінцево-елементному програмному комплексі SCAD 21.1. Корпус силоса змодельований плоскими оболонковими кінцевими елементами типу 44

«чотирикутний елемент оболонки». Вертикальні ребра жорсткості та елементи покрівлі змодельовані стержневим кінцевим елементом типу 10 – «універсальний просторовий стержневий скінченний елемент».

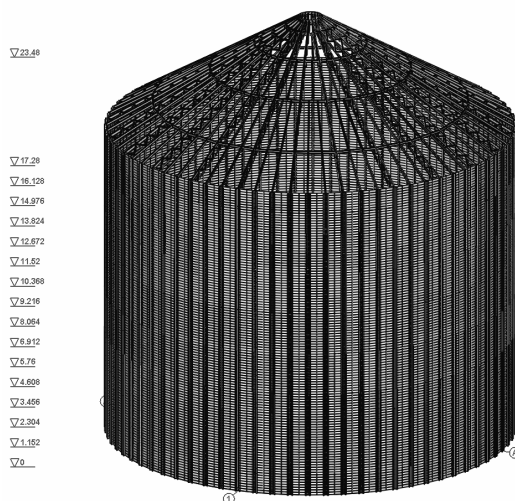


Рис. Загальний ізометричний вигляд комп'ютерної моделі силоса марки МСВУ 220.15.В12

Коректність складання розрахункової моделі силоса й відповідність результатів розрахунку дійсній роботі конструкцій на кожному кроці контролювалось за допомогою таких перевірок:

- розмірності вхідних та вихідних величин;
- характеру залежності результату від зміни деяких вхідних даних, включаючи перевірку таких властивостей, як очікування симетрії (асиметрії) або нечутливості до деяких параметрів;
- поведінки системи при екстремальних значеннях параметрів;
- дотримання висновків, які впливають із теорем взаємності.

За умов симетричного прикладання навантаження стіни сталевих силосів, підкріплених вертикальними ребрами жорсткості, працюють на розтяг і перевіряються на міцність відповідно до п. 14.1.1 – 14.1.3 [5] з коефіцієнтом умов роботи конструкцій $\gamma_c = 1.0$. Також

вважається, що стіни силоса не сприймають згинальні моменти і напруження вздовж твірної циліндричної частини силосної ємності. Остання обставина пояснюється наявністю щільно поставлених вертикальних ребер жорсткості, які й сприймають зусилля від сил тертя між продуктом зберігання та листами корпусу. Величина розрахункового кільцевого поздовжнього зусилля розтягу на одиницю висоти від горизонтальних тисків сипких матеріалів у стінах круглих сталевих силосів з урахуванням додаткових зусиль від температурних перепадів може бути визначена за формулою [7]:

$$N_{kp} = \frac{D_s}{2 \cdot \gamma_c} [p_{h,\Sigma}(z) + p_t(z)], \quad (1)$$

де D_s – діаметр силосної ємності, $D_s = 22000$, мм; $p_{h,\Sigma}(z)$ – сумарний горизонтальний тиск на стінки силоса; $p_t(z)$ – граничне розрахункове значення горизонтального тиску на стінки силоса від перепаду температури.

Критичний фактор сталевого листа корпусу силоса визначається як:

$$K_R = \frac{N_{kp}}{R_u \cdot t_w} \cdot \gamma_u \cdot \gamma_{neto} \leq 1, \quad (2)$$

де R_u – розрахунковий опір сталі за тимчасовим опором, $R_u = R_{un} / \gamma_m \approx 533$ кН/см²;

t_w – товщина листа корпусу силоса на заданому рівні; γ_{neto} – коефіцієнт ослаблення поперечного перерізу отворами болтових з'єднань, $\gamma_{neto} = 1.25$.

Напруження стиску у сталевих листах циліндричної частини силоса від вертикального тиску $p_f(z)$ сипкого матеріалу не перевищують 2 кН/см². Це пояснюється тим, що вертикальний тиск $p_f(z)$ повністю сприймається вертикальними ребрами жорсткості силосної ємності. Дана обставина робить зайвою перевірку стійкості та міцності на стиск листів корпусу силосів.

Результати розрахунків наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Критичні фактори листів корпусу силоса

Ярус	t_w	K_R	Ярус	t_w	K_R
Початкові товщини листів корпусу			Скореговані товщини листів корпусу		
1	3.5	0.10	1	3.0	0.12
2	1.5	0.40	2	1.0	0.60
3	1.5	0.54	3	1.0	0.81
4	2.0	0.50	4	1.5	0.67
5	2.0	0.59	5	1.5	0.79
6	2.0	0.67	6	2.0	0.67
7	2.5	0.60	7	2.0	0.75
8	2.5	0.66	8	2.0	0.83
9	3.0	0.60	9	2.5	0.72
10	3.0	0.65	10	2.5	0.78
11	3.5	0.59	11	3.0	0.69
12	4.0	0.55	12	3.0	0.73
13	4.0	0.58	13	3.0	0.77
14	4.0	0.61	14	3.0	0.81
15	4.5	0.56	15	3.5	0.72

Аналіз даних дає підстави стверджувати, що листи корпусу силосних ємностей у разі застосування сталі підвищеної міцності S550GD [11] матимуть певні резерви міцності, а їх товщини можуть бути скореговані у меншій бік. Проте слід пам'ятати, що загальна жорсткість корпусу силоса зменшиться, а прийняті з умов міцності товщини потребують додаткової перевірки за критерієм зминання металу з'єднаних елементів. Також заостримо увагу на тому, що, по-перше, результати розрахунків проведено щодо листів ідеальної геометричної форми, виконаних без дефектів й пошкоджень, по-друге, швидкість прямування критичного фактора до одиниці надзвичайно чутлива до зменшення товщини. Так, наприклад, зміна товщини листів 4 ярусу із 1.5 мм ($K_R = 0.67$) до 1.0 мм ($K_R = 1.0$) призводить до зменшення міцності листа на 33 %, а зменшення товщини листів 6 ярусу із 2.0 мм ($K_R = 0.67$) до 1.5 мм ($K_R = 0.9$) – до зменшення міцності на 26 %. Тобто критичний фактор прямує до одиниці швидше для листів малої товщини.

Болти, які з'єднують листи корпусу циліндричної частини силоса між собою, передбачені діаметром $d_b = 10$ мм при діаметрі отвору $d = 12$ мм [12], тобто болти класу точності В, С. Проте у нормах п. 16.2.3 [5] задекларовано, що «болти класів точності В і С у багатоболтових з'єднаннях слід застосовувати для конструкцій зі сталі з границею текучості до 390 МПа». Для конструкцій зі сталі з границею текучості понад 390 МПа передбачається застосування болтів підвищеної точності класу А. У зв'язку з цим було розглянуто два випадки:

- 1) болт М10 $d_b = d = 10$ мм;
- 2) болт М12 $d_b = d = 12$ мм.

Листи корпусу силосної ємності з'єднуються між собою в кільцевому напрямі декількома рядами болтів: листи першого ярусу – двома рядами; листи 2-

15 ярусів – трьома рядами, листи 16 ярусу – чотирма рядами. Кожний ряд на 1 пог. м містить 17 болтів. Розрахункові зусилля N_p , які сприймають болтові з'єднання різних ярусів, наведено у табл. 2. Сумарна кількість болтів, що припадає на 1 м. п. стику листів при дво-, три- та чотирирядному розташуванні останніх, відповідно становить: $n_p = 34$, $n_p = 51$ та $n_p = 68$. Перевірку несучої здатності болтових з'єднань виконано відповідно до вимог п. 16.2.10 [7] за формулою:

$$k_p = \frac{N_p}{\min\{N_{bs}, N_{bp}\}} \leq n_p, \quad (3)$$

де $\min\{N_{bs}, N_{bp}\}$ – мінімальне значення несучої здатності болтового з'єднання на зріз або зминання.

Розрахунки для двох діаметрів болтів показали, що для листів корпусу силосної ємності майже всіх ярусів не виконується умова міцності болтового з'єднання на зминання. У зв'язку з цим трирядне розташування болтів має бути замінено на чотирирядне, навіть для тих ярусів, для яких перевірка несучої здатності формально виконується. Величині діаметра болта при цьому належить опосередкована роль, а тому як основний болт можна використовувати будь-який М10 або М12. Проте нами рекомендується використання болтів М12, якщо це не тягне за собою великих економічних витрат. Альтернативний крок – це збільшення товщини листів корпусу силосної ємності, але тоді зовсім втрачається сенс застосування сталі підвищеної міцності S550GD.

Вертикальні ребра жорсткості працюють на стиск із згином у двох площинах. Проте в кільцевому напрямі моменти, по-перше, невеликі за абсолютною величиною і, як правило, виникають при несиметричному завантаженні силосної ємності (вітрове навантаження, навантаження від

термопідвісок, нерівномірний розподіл снігового навантаження по покрівлі, позацентрове спірання стійок надсилосної галереї). По-друге, втраті стійкості ребра перешкоджають листи корпусу силосної ємності. Таким чином, вертикальне ребро жорсткості можна розглядати як позацентрово стиснутий стержень, підкріплений у площині втрати стійкості пружною основою кінцевої жорсткості. Роль пружної основи у даному випадку відіграє стінка силосної ємності (у поєднанні із сипким матеріалом), яка водночас і вигинає вертикальне ребро із своєї площини, і перешкоджає (за рахунок сумісності деформацій у місцях кріплення листів корпусу) занадто великим горизонтальним переміщенням внаслідок великої поздовжньої жорсткості. На підставі цього можна висунути допущення, що в класичному розумінні вертикальне ребро не може втратити стійкість відносно

осі V , оскільки цьому буде передувати вичерпання несучої здатності листів корпусу силосної ємності або вузлів кріплення листів корпусу до ребер.

Навантаження, яке діє на кожне вертикальне ребро, визначається на основі кінцево-елементного розрахунку силосної ємності.

Перевірку міцності вертикальних ребер жорсткості виконуємо згідно з настановами п. 10.1.1 [5] за формулою:

$$\frac{N_i}{A_n \cdot R_u \cdot \gamma_c} + \frac{M_i}{W_n \cdot R_u \cdot \gamma_c} \leq 1, \quad (4)$$

де N_i і M_i – зусилля у вертикальних ребрах жорсткості силоса.

Результати розрахунку у вигляді коефіцієнта використання несучої здатності (критичного фактора K_R) подано у табл. 2.

Таблиця 2

Критичні фактори вертикальних ребер жорсткості

Ярус	t_w	K_R	Ярус	t_w	K_R
Початкові товщини ребер жорсткості			Скореговані товщини ребер жорсткості		
1	2.0	0.39	1	2.0	0.39
2	2.0	0.43	2	2.0	0.43
3	3.0	0.33	3	2.0	0.49
4	3.0	0.39	4	2.0	0.58
5	4.0	0.36	5	3.0	0.47
6	4.0	0.43	6	3.0	0.55
7	4.0	0.50	7	3.0	0.66
8	4.0	0.59	8	3.0	0.77
9	5.0	0.55	9	4.0	0.69
10	5.0	0.63	10	4.0	0.79
11	6.0	0.61	11	5.0	0.72
12	6.0	0.69	12	5.0	0.82
13	6.0	0.77	13	6.0	0.77
14	6.0	0.86	14	6.0	0.86
15	6.0	0.96	15	6.0+3.0	0.96

Із таблиці можна бачити, що критичний фактор вертикальних ребер не

набуває великих значень, за винятком ребер нижнього ярусу в зоні крайового

ефекту, для яких значення критичного фактора близькі до одиниці. Проте ребра нижнього ярусу додатково підсилюються накладкою товщиною 3 мм. Таким чином, сумарна товщина ребер становить 9 мм, що повністю задовольняє вимоги несучої здатності. Товщину ребер жорсткості інших ярусів можна зменшити до величин, вказаних у табл. 2. Поруч наведений критичний фактор, який буде відповідати скорегованим товщинам. Зменшувати товщини ребер на більшу величину (особливо середніх і верхніх ярусів, де спостерігаються помітні резерви несучої здатності) недоречно та небезпечно, оскільки це веде до суттєвого зменшення жорсткості силосної ємності у цілому.

Висновки з дослідження і перспективи, подальший розвиток у даному напрямку. В результаті проведеного дослідження та виконання перевірних розрахунків силоса, виконаного зі сталі підвищеної міцності, можна зробити певні висновки.

Сталь S550GD належить не до маловуглецевих, а до конструкційних сталей з умовною границею текучості. Використання у будівництві маловуглецевих сталей із фізично наявною, а не умовною, ділянкою текучості, відповідає тому тезису, що вичерпання несучої здатності конструкції відбувається при появі пластичності і що пластичним деформаціям належить провідна роль у роботі конструкції, – несуча здатність конструкції в процесі експлуатації обмежена не міцністю її матеріалу, а деформаціями, які роблять можливим експлуатацію конструкції.

Для високоміцних сталей коефіцієнт використання матеріалу $k_{yu} = R_y / R_u$, який характеризується відношенням границі текучості R_y до тимчасового опору R_u (границі міцності), майже дорівнює одиниці $k_{yu} \approx 0.98$. Надійність конструкцій, виконаних із високоміцних сталей із таким значенням коефіцієнта k_{yu} , доволі низька. Це пояснюється тим, що, по-перше, руйнування конструкцій відбувається крихко (швидко, можна сказати, миттєво), по-друге, напружено-деформований стан конструкцій надзвичайно сильно залежить від наявності концентраторів напружень у вигляді отворів, викривлень форми елементів (у тому числі за рахунок гнуття), дефектів виготовлення, тобто будь-яких факторів, що надають конструкції форму, несприятливу для протікання силових потоків.

Товщини листів корпусу та вертикальних ребер жорсткості можна зменшити до величин, вказаних відповідно у табл. 1 та 2. Міцність цих конструкцій буде забезпеченою. Проте слід пам'ятати, що, по-перше, несуча здатність листів корпусу надзвичайно чутлива до зміни товщини навіть на 0.5 мм, по-друге – зменшення товщин вертикальних ребер жорсткості менше величин, вказаних у табл. 2 (навіть при порівняно високих показниках критичного фактора), призводить до суттєвого погіршення жорсткісних характеристик силоса.

На підставі наведеного можна сформулювати резюме: нами не рекомендується застосування сталі підвищеної міцності S550GD для несучих конструкцій силосних ємностей.

Список використаних джерел

1. Банніков, Д. О. Вертикальні жорсткі сталеві ємності: сучасні концепції формоутворення [Текст] / Д. О. Банніков. – Дніпропетровськ: Моноліт, 2009. – 186 с.
2. Ding S. Prediction of flow patterns during silo discharges using a finite element approach and its preliminary experimental verification / S. Ding, H. Li, Y. Ooi, J.M. Rotter. – Particuology. - 2015. – Vol. 18. – P. 42-49.

3. Rotter J.M. Flow and pressures in silo structural integrity assessments / J.M. Rotter. – Proceedings of the International Symposium: Reliable Flow of Particulate Solids III, Porsgrunn, Norway. – 1999. – P. 281–292.
4. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ [Текст]: ДБН В.1.2-14:2009. – [Чинний від 2009-12-01]. – К. : Мінрегіонбуд України, 2009. – 37 с. – (Державні будівельні норми України).
5. Сталеві конструкції. Норми проектування [Текст]: ДБН В.2.6-198:2014. – [Чинний від 2015-01-01]. – К. : Мінрегіон України, 2014. – 199 с. – (Державні будівельні норми України).
6. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування [Текст]: ДБН В.1.2-2:2006. – [Чинний від 2007-01-01]. – К. : Мінрегіон України, 2006. – 78 с. – (Державні будівельні норми України).
7. Підприємства, будівлі і споруди по зберіганню та переробці зерна [Текст]: ДБН В.2.2-8-98. – [Чинний від 1998-07-01]. – К. : Держбуд України, 1998. – 41 с. – (Державні будівельні норми України).
8. Конструкції сталеві будівельні. Вимоги до виготовлення [Текст]: ДСТУ Б В.2.6-199:2014. – [Чинний від 2015-07-01]. – К. : Мінрегіон України, 2015. – 59 с. – (Національний стандарт України).
9. Конструкції металеві будівельні. Вимоги до монтажу [Текст]: ДСТУ Б В.2.6-200:2014. – [Чинний від 2015-07-01]. – К. : Мінрегіон України, 2015. – 46 с. – (Національний стандарт України).
10. Сталі. Визначення й класифікація [Текст]: ДСТУ EN 10020:2000. – [Чинний від 2009-04-01]. – К. : Держспоживстандарт України, 2009. – 10 с. – (Національний стандарт України).
11. Вироби плоскі сталеві з покриттям, нанесеним методом безперервного гарячого занурювання [Текст]: ДСТУ EN 10346:2014. – [Чинний від 2015-04-01]. – К.: Мінекономрозвитку України, 2015. – 24 с. – (Національний стандарт України).
12. Металоконструкції силосу діаметром 22.0 м типу МСВУ 220.15.В12 із галереєю ГН 220, що спирається на силос [Текст]: технічна документація. – Лубни, 2017. – 207 с.

Лапенко Олександр Іванович, д-р техн. наук, професор кафедри комп'ютерних технологій будівництва Національного авіаційного університету. Тел.: (066) 200-67-27. E-mail: my-partner@ukr.net.

Махінко Антон Володимирович, д-р техн. наук, будівельна компанія «Етуаль». Тел.: (050)327-27-85. E-mail: pasargada1981@gmail.com.

Махінко Наталія Олександрівна, канд. техн. наук, кафедра комп'ютерних технологій будівництва Національного авіаційного університету. Тел.: (050)304-50-72. E-mail: pasargada1985@gmail.com.

Lapenko Alexandr, Doct. of techn. sciences, Department of Computer Technology Building, National Aviation University. Tel.: (066)200-67-27. E-mail: my-partner@ukr.net.

Makhinko Anton, Doct. of techn. sciences, Construction Company "Etual". Tel.: (050)327-27-85. E-mail: pasargada1981@gmail.com.

Makhinko Natalia, Ph.D. in Engineering, Department of Computer Technology Building, National Aviation University. Tel.: (050)304-50-72. E-mail: pasargada1985@gmail.com.

Стаття прийнята 21.06.2017 р.