

ГЕОМЕТРИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕРЕРІЗІВ ТОНКОСТІННИХ ЕЛЕМЕНТІВ СИЛОСНИХ ЄМНОСТЕЙ В ЗАДАЧАХ РОЗРАХУНКУ НАДІЙНОСТІ

Н.О. Махінько, к.т.н.,
Національний авіаційний університет
pasargada1985@gmail.com, ORCID: 0000-0001-8120-6374

Анотація. Стаття присвячена вдосконаленню імовірнісного розрахунку стрижневих елементів сталевих ємностей зберігання. Зокрема, увага приділена встановленню аналітичних формульних залежностей основних геометричних характеристик тонкостінних перерізів, як функції одного з генеральних розмірів. Дана потреба обумовлена реалізацією можливості виконання розрахунку надійності даного типу споруд. Для вираження геометричних співвідношень були введені фіксовані співвідношення між розмірами ділянок поперечного перерізу. Це є абсолютно виправданим кроком, оскільки дані величини назначаються виходячи з технологій виробництва профілів. Отримані практичні розрахункові формули для визначення даних параметрів для найбільш поширених тонкостінних профілів, які застосовуються при виготовленні даного класу споруд. Дані залежності можуть бути використані, як для безпосереднього детермінованого розрахунку аналітичним чи автоматизованим шляхом, так і у випадку вирішення імовірнісних задач.

Ключові слова: ємності зберігання, тонкостінні профілі, характеристики перерізу, моменти інерції, моменти опору, радіуси інерції.

Вступ. Проектування та спорудження сталевих ємностей для зберігання зернових продуктів тривалий час залишається актуальним питанням в сфері розвитку українського сільськогосподарського сектору. При цьому попитом користуються, як «банки» невеликого об'єму для потреб фермерських господарств, так і ємності великих діаметрів, з багаторазовими циклами завантажень, в складі силосних груп потужних агрохолдінгів. Певна річ, виробники та постачальники елеваторного обладнання, гарантують високі міцнісні характеристики власного модельного ряду ємностей, з дотриманням вимог української нормативної бази і мінімальною металоємністю. Рекламні буклети підтверджують це, наводячи різні технічні величини – значення максимальних можливих навантажень, характеристики марок сталі, товщину цинкового покриття, крок хвилі стінової панелі, унікальні профілі ребер жорсткості, класи міцності болтів та ін., а також прикладаючи відповідні сертифікати якості українського та міжнародного зразка. Проте безпечна експлуатація ємностей зберігання, хоча і забезпечується розрахунком на міцність, має бути підтверджена належним рівнем надійності та безпеки споруди. Тільки при забезпеченні вимог до надійності, конструктивне вирішення ємності зберігання може бути виправдане.

Аналіз останніх джерел досліджень і публікацій. Питання надійності будівельних конструкцій являється фундаментальним для будівельної галузі та представлено величезною кількістю наукових праць [1, 2]. Визначення геометричних характеристик перерізів є базовою задачею загальноінженерного курсу опору матеріалів [3, 4], на якій базуються всі розрахунки на міцність та жорсткість. Вона може вирішуватися аналітично, так і за допомогою спеціалізованих програм [5, 6]. Поява нових конструктивних форм перерізів та ряд супутніх задач, активізували дослідження в даній області [7-9].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Одне з основних місць при розрахунках надійності стрижневих елементів ємностей зберігання займає процедура визначення геометричних характеристик їх поперечних перерізів. В першу чергу це пов'язано з різноманіттям форм та розмірів перерізів, для котрих розробляються спеціальні таблиці за типом сортаменту. Визначення геометричних характеристик в спеціалізованих програмних продуктах, наприклад «Консул», «Тонус» або «КС-САПР», «КТС-САПР» не завжди зручно,

особливо на етапі проектного розрахунку, коли конструктор кожен новий типорозмір перерізу повинен викреслювати знову. Тому використання формульної процедури на даному етапі є більш доречним. По-друге для стиснутих та стиснуто-зігнутих елементів у вітчизняних нормах проектування [10] при перевірці місцевої та загальної стійкості елементів регламентується методика розрахунку приведених геометричних характеристик. Аналогічна процедура декларується і в нормах Eurocode [11], зокрема для даних характеристик застосовується назва «ефективний переріз». Прості аналітичні процедури на цьому етапі розрахунку також будуть в нагоді. Зрештою, при виконанні імовірнісних розрахунків конструкцій, особливо у задачах визначення оптимальної надійності, яка залежить від розмірів поперечного перерізу елементів, його основні геометричні характеристики повинні бути задані як функція розмірів. Саме тому початковим етапом вирішення даної задачі є встановлення наближених геометричних залежностей для основних геометричних характеристик поперечного перерізу.

Постановка завдання. Для вирішення питань, пов'язаних із розрахунком надійності стрижневих тонкостінних елементів необхідно сформулювати аналітичні залежності для визначення основних геометричних характеристик поперечного перерізу. Дані вирази повинні мати математично просте формулювання та забезпечувати можливість подальшого розв'язання імовірнісних задач.

Матеріали та методика досліджень. В статті здійснене дослідження різних типів поперечних перерізів стрижневих елементів вертикальних сталевих ємностей зберігання та встановлення аналітичних залежностей їх основних геометричних характеристик на основі класичних прийомів опору матеріалів.

Основний матеріал і результати. Стрижневі елементи ємностей зберігання практично завжди виконуються з тонкостінних профілів різного поперечного перерізу. Такими елементами виступають вертикальні чи горизонтальні ребра жорсткості корпусу, прогони чи кільцеві ребра покрівлі, допоміжні стійки для кріплення технологічного устаткування, тощо. Виконані вони, як правило, з кутика або швелера з відгинами полок або без них, а також комбінації цих профілів, « Ω », « Z » і « Σ »-профілі, тощо (рис. 1).

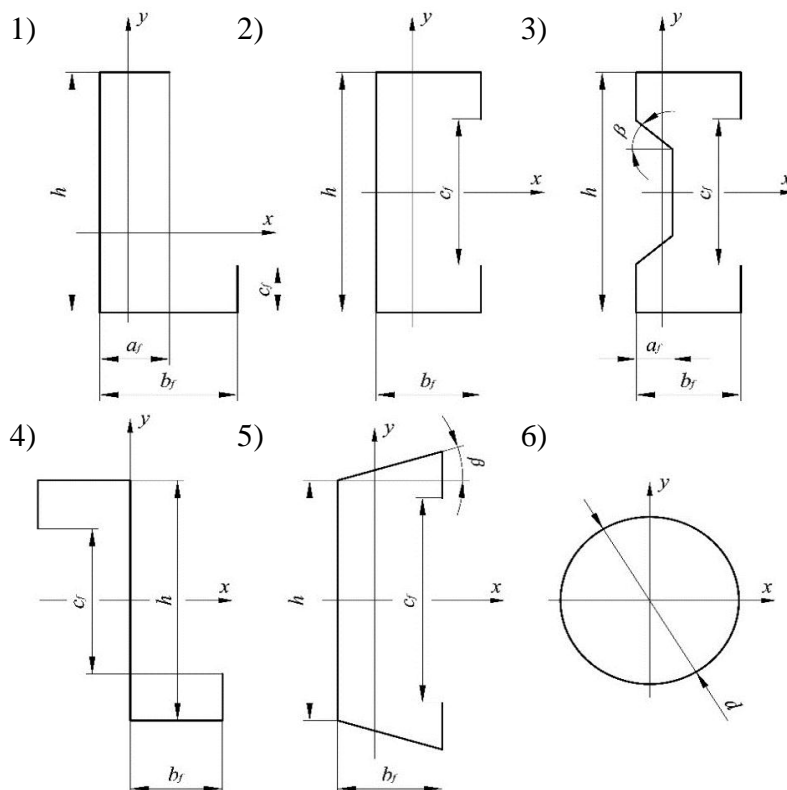


Рис. 1. Найбільш поширені поперечні перерізи тонкостінних профілів стрижневих елементів ємностей зберігання: 1-6 – типи перерізів

Виготовляються дані елементи шляхом згинання або прокатування сталевго листа.

Автором при дослідженнях роботи циліндричних силосів [12] вже були отримані наближені формули із визначення площі поперечного перерізу A_p та моменту інерції J_p вертикальних ребер жорсткості в великому діапазоні товщин.

$$A_p = h_p t_p k_A, \quad J_p = h_p^3 t_p k_J. \quad (1)$$

$$k_A = \gamma_2 + 2 \left(\frac{1}{\operatorname{tg} \beta_p} + \frac{1}{\sin \beta_p} \right), \quad (2)$$

$$k_J = \gamma_1 k_y^2 + (1 - k_y)^2 \left(\gamma_2 - \gamma_1 + \frac{2}{\operatorname{tg} \beta_p} \right) + \frac{1}{6 \sin \beta_p}, \quad (3)$$

$$k_y = \frac{(\gamma_2 - \gamma_1) \sin \beta_p + 1 + 2 \cos \beta_p}{\gamma_2 \sin \beta_p + 2(1 + \cos \beta_p)}, \quad (4)$$

де ℓ_p та t_p – відповідно довжина та товщина ребра жорсткості; a_p – ширина звуженої частини ребра (рис. 2); β_p – кут нахилу бокових граней; $\gamma_1 = a_p / h_p$, $\gamma_2 = \ell_p / h_p$ – співвідношення габаритних розмірів ребер; k_y – безрозмірний параметр, що визначає положення центра ваги ребра від його основи $y_p = h_p k_y$.

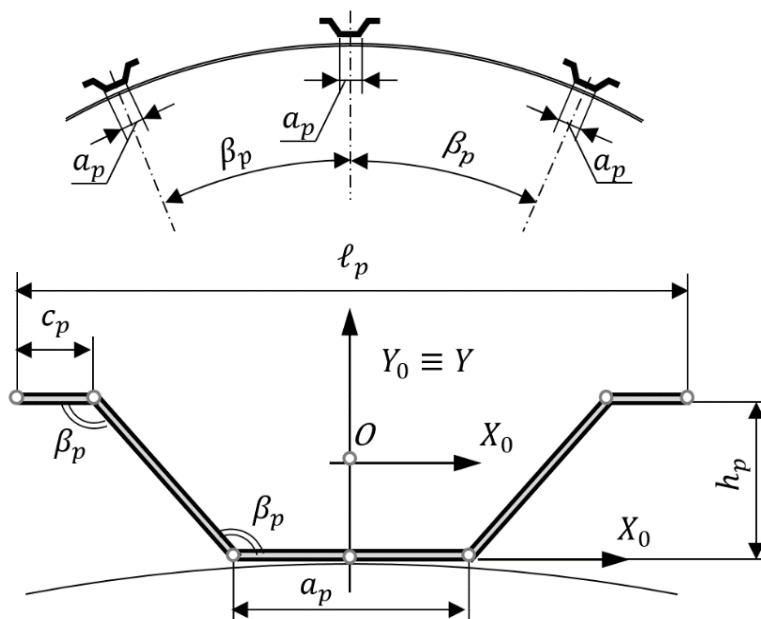


Рис. 2. Схема для визначення геометричних характеристик вертикального ребра циліндричного силосу

Для обчислення моментів інерції перерізу вертикальних ребер жорсткості ємності зберігання можна скористатися виразом:

$$W_{\max} = J_p / (y_p + 0.5t_p), \quad W_{\min} = J_p / (h_p - y_p + 0.5t_p), \quad (5)$$

або наближеною залежністю, яка більш придатна до практичного використання:

$$W_{\max} = h_p^2 t_p k_J / k_y, \quad W_{\min} = h_p^2 t_p k_J / (1 - k_y) \quad (6)$$

Представимо дані залежності для більш широкого кола перерізів тонкостінних елементів сталевих ємностей зберігання.

До основних геометричних характеристик поперечних перерізів можна віднести площу A_0 , моменти інерції відносно центральних осей J_x та J_y , моменти опору W_x та W_y і радіуси інерції i_x та i_y . Радіусами заокруглень кутів та величинами порядку малості t_w^3 і менше (де t_w – товщина тонкостінного елемента) будемо нехтувати для можливості отримання найбільш простих та зручних виразів.

Запишемо для зазначених геометричних характеристик формули загального вигляду, виражені як функції одного з генеральних розмірів (табл. 1.)

Таблиця 1 – Розрахункові формули для геометричних характеристик перерізів найбільш поширених тонкостінних профілів при виготовленні ємностей зберігання

Переріз за рис. 1	Розрахункові формули
Поз. 1 – гнутий кутик)	$\alpha_1 = b_f / h,$ $\alpha_2 = c_f / h,$ $\alpha_3 = a_f / h$ $\psi_A = 1 + \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3,$ $\psi_x = \left[\frac{1}{2} \alpha_1^2 + \frac{1}{2} \alpha_3^2 + \alpha_1 \alpha_2 \right] / \psi_A,$ $\psi_y = \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \alpha_2^2 + \alpha_3 \right] / \psi_A$ $\psi_{J,x} = \frac{1}{12} (1 + \alpha_3^3) + \alpha_1 \psi_y^2 + \alpha_3 (1 - \psi_y)^2 + \left(\frac{1}{2} - \psi_y \right)^2 + \alpha_2 (\psi_y - \frac{1}{2} \alpha_2)^2,$ $\psi_{J,y} = \frac{1}{12} (\alpha_1^3 + \alpha_3^3) + \psi_x^2 + \alpha_1 (\frac{1}{2} \alpha_1 - \psi_x)^2 + \alpha_2 (\alpha_1 - \psi_x)^2 + \alpha_3 (\frac{1}{2} \alpha_3 - \psi_x)^2.$
Поз. 2 – гнутий швелер	$\alpha_1 = b_f / h,$ $\alpha_2 = c_f / h,$ $\psi_A = 2 + 2\alpha_1 - \alpha_2,$ $\psi_x = [\alpha_1^2 + \alpha_1(1 - \alpha_2)] / \psi_A,$ $\psi_{J,x} = \frac{1}{12} (2 + 6\alpha_1 - \alpha_2^3),$ $\psi_{J,y} = \psi_x^2 + \frac{1}{6} \alpha_1^3 + 2\alpha_1 (\frac{1}{2} \alpha_1 - \psi_x)^2 + (1 - \alpha_2) (\alpha_1 - \psi_x)^2.$
Поз. 4 – Z – профіль	$\alpha_1 = b_f / h,$ $\alpha_2 = c_f / h,$ $\psi_A = 2 + 2\alpha_1 - \alpha_2,$ $\psi_{J,x} = \frac{1}{12} (2 + 6\alpha_1 - \alpha_2^3),$ $\psi_{J,y} = \frac{2}{3} \alpha_1^3 + \alpha_1^2 (1 - \alpha_2).$
Поз. 6 – кільце	$\psi_A = \pi,$ $\psi_{J,x} = \psi_{J,y} = \pi / 8,$ $\psi_x = 0.$

$$A_0 = h t_w \psi_A, \tag{7}$$

$$x_0 = h \psi_x, \quad y_0 = h \psi_y \tag{8}$$

$$J_x = h^3 t_w \psi_{J,x}, \quad J_y = h^3 t_w \psi_{J,y} \tag{9}$$

$$W_x = 2h^2 t_w \psi_{J,x}, \quad W_{y,max} = h^2 t_w \frac{\psi_{J,y}}{\psi_x}, \quad W_{y,min} = h^2 t_w \frac{\psi_{J,y}}{\alpha_1 - \psi_x} \quad (10)$$

$$i_x = h \sqrt{\psi_{J,x} / \psi_A}, \quad i_y = h \sqrt{\psi_{J,y} / \psi_A}. \quad (11)$$

де форма заданого перерізу для ряду профілів буде характеризуватися безрозмірними коефіцієнтами $\psi_A, \psi_x, \psi_y, \psi_{J,x}, \psi_{J,y}$.

Для вираження геометричних співвідношень, як функції лише висоти і товщини, введемо фіксовані співвідношення між розмірами ділянок поперечного перерізу – α_1, α_2 та α_3 .

$$\alpha_1 = \frac{b_f}{h}; \quad \alpha_2 = \frac{c_f}{h}; \quad \alpha_3 = \frac{a_f}{h}. \quad (12)$$

де a_f, b_f та c_f – геометричні розміри, зазначені для різних типів тонкостінних перерізів.

Фіксація цих співвідношень є абсолютно виправданим кроком, оскільки здебільшого вони назначаються виходячи не з вимог несучої здатності, а з технологій виробництва самих профілів.

Виходячи з даних міркувань, були отримані розрахункові формули для безрозмірних коефіцієнтів поперечного перерізу тонкостінних елементів. Для цього були обрані найбільш розповсюджені в практиці проектування сталевих емностей зберігання форми поперечних перерізів, що відповідають позиціям 1, 2, і та 6 на рис. 1. Для зручності представлення зазначені вирази для безрозмірних коефіцієнтів згруповані в табл. 1. Отримані залежності мають просте математичне вираження і цілком придатні для виконання подальших розрахунків з використанням методів теорії імовірності та математичної статистики.

Висновок. В рамках єдиного підходу отримані розрахункові формули для визначення геометричних характеристик та їх безрозмірних коефіцієнтів для складних поперечних перерізів найбільш поширених тонкостінних профілів, що застосовуються при виготовленні сталевих емностей зберігання.

Література

1. Аугуети Г. Вероятностные методы в строительном проектировании / Г. Аугуети, А. Баратти, Ф. Кашиати. – М. : Стройиздат, 1988. – 584 с.
2. Райзер В.Д. Теория надежности сооружений / В.Д. Райзер. – М. : Издательство Ассоциации строительных вузов, 2010. – 384 с.
3. Беляев Н.М. Сопротивление материалов / Н.М. Беляев. – М. :Наука», 1976 г. – 608 с.
4. Писаренко Г.С. Сопротивление материалов / Г.С Писаренко., А.П. Яковлев, В.В. Матвеев. – К. : Наукова думка, 1988. – 736 с.
5. Карпиловський В.С. Формування перерізів та розрахунок їх геометричних характеристик / В.С. Карпиловський, Е.З. Криксунов, А.В. Перельмутер, М.А. Перельмутер. – К.: ВВП «Компас», 2000. – 80 с.
6. Конструктор тонкостенных сечений [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.liraland.ua/lira/systems/kts.php>
7. Sadowski A.J. Geometric properties for the design of unusual member cross-sections in bending / A.J. Sadowski // Engineering Structures. – ELSEVIER, 2011. – Vol.33, № 5. – p. 1850-1854. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.01.026>
8. Білик А.С. Визначення геометричних характеристик холодноформованих тонкостінних аркових профілів / А.С. Білик, М.В. Лапонов // Зб. наук. пр. Українського інституту сталевих конструкцій ім. В.М. Шимановського. – К. : Сталь, 2012 р. – Вип. 9. – С. 193-203. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ZNPISK_2012_9_19
9. Гольдштейн Ю.Б. Геометрические характеристики поперечных сечений тонкостенных стержней открытого профиля / Ю.Б. Гольдштейн // Ученые записки Петрозаводского государственного университета технические науки. – ПетрГУ, 2015. – №2. – С. 48-52.
10. Сталеві конструкції. Норми проектування : ДБН В.2.6-198:2014. – [Чинний від 2015-01-01]. – К. : Мінрегіон України, 2014. – 199 с. – (Державні будівельні норми України).

11. Design of steel structures: Eurocode 3 : EN 1993-4-1 – [Чинний від 2006-12-06]. – Brussels : European committee for standardization, 2007. – 117 с.
12. Махінько Н.О. Вплив вертикальних ребер на жорсткісні характеристики силосних ємностей для зберігання зерна / Н.О. Махінько // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія : Теорія та практика будівництва. – Львів, 2018. – №888. – С. 101-110.

References

- [1] G. Augueti, A. Baratti, F. Kashiati, *Veroiatnostnye metody v stroitelnom proektirovanii*. Moskva, Stroizdat, 1988.
- [2] V.D. Raizer, *Teoriia nadezhnosti sooruzhenii*. Moskva, Izdatelstvo as. str.vuzov, 2010.
- [3] N.M. Beliaev *Soprotivlenie materialov*. Moskva, Nauka, 1976.
- [4] G.S Pisarenko, A.P. Iakovlev, V.V. Matveev, *Soprotivlenie materialov*. Kiev, Naukova dumka, 1988.
- [5] V.S. Karpylovskiy, E.Z. Kryksunov, A.V. Perelmuter, M.A. Perelmuter *Formuvannia pereriziv ta rozrakhunok yikh heometrychnykh kharakterystyk*. Kyiv, KVVP Kompas, 2000.
- [6] Konstruktor tonkostennykh sechenii [Elektronnyi resurs]. Rezhym dostupu: <https://www.liraland.ua/lira/systems/kts.php>
- [7] A.J. Sadowski, "Geometric properties for the design of unusual member cross-sections in bending", *Engineering Structures*, ELSEVIER, vol. 33, no. 5, pp. 1850-1854, 2011.
- [8] A.S. Bilyk, M.V. Laponov, "Vyznachennia heometrychnykh kharakterystyk kholodnoformovanykh tonkostinnykh arkovykh profiliv", *Zb. nauk. pr. Ukrainskoho instytutu stalevykh konstruksii im. V.M. Shymanovskoho*, Kyiv, Stal, vol. 9, pp. 193-203, 2012.
- [9] IU.B., Goldshtein "Geometricheskie kharakteristiki poperechnykh sechenii tonkostennykh sterzhnei otkrytogo profilia", *Uchenye zapiski petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, Petrgu, no. 2, pp. 48-52, 2015.
- [10] Stalevi konstruksii. Normy proektuvannia : DBN V.2.6-198:2014, Kyiv, Minrehion Ukrainy, 2014.
- [11] Design of steel structures: Eurocode 3 : EN 1993-4-1, Brussels, European committee for standardization, 2007.
- [12] N.O. Makhinko, "Vplyv vertykalnykh reber na zhorstkisni kharakterystyky sylosnykh yemnosti dlia zberihannia zerna", *Visnyk Natsionalnoho universytetu Lvivska politehnika. Seriia Teoriia ta praktyka budivnytstva*, Lviv, no. 888, pp. 101-110, 2018.

ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СЕЧЕНИЙ ТОНКОСТЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СИЛОСНЫХ ЕМКостей В ЗАДАЧАХ РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ

Н.А. Махінько, к.т.н.,
Національний авіаційний університет
 pasargada1985@gmail.com, ORCID: 0000-0001-8120-6374

Аннотация. Статья посвящена совершенствованию вероятностного расчета стержневых элементов стальных емкостей хранения, которые практически всегда изготавливаются из тонкостенных профилей разного поперечного сечения. В частности, внимание уделено установлению аналитических зависимостей для определения основных геометрических характеристик тонкостенных сечений, как функции одного из генеральных размеров. Разнообразие форм и размеров сечений усложняют процедуру определения их с помощью таблиц, а использование программных комплексов не всегда удобно и требует некоторых временных затрат, хотя и гарантирует высокую точность. Также потребность аналитического расчета обусловлена реализацией возможности количественного определения уровня надежности данного типа сооружений или их отдельных элементов. Для

выражения геометрических соотношений были введены фиксированные соотношения между размерами участков поперечного сечения. Это является абсолютно оправданным шагом, поскольку данные величины назначаются исходя из технологий производства профилей. Были полученные практические расчетные формулы для определения параметров площади поперечного сечения, моментов инерции относительно центральных осей, моментов сопротивления и радиусов инерции для наиболее распространенных тонкостенных профилей, применяемых при изготовлении данного класса сооружений. При этом использовались некие упрощения, в частности не учитывались радиусы закруглений углов, что позволило упростить аналитическое выражение, практически не снижая его точности. Также были предложены формулы для определения безразмерных коэффициентов формы для некоторых типов сечений – гнутого уголка, гнутого швеллера, Z-профиля и кольца. Полученные зависимости могут быть использованы, как для детерминированного расчета, так и в случае решения вероятностных задач надежности с привлечением методов теории вероятности и математической статистики.

Ключевые слова: емкости хранения, тонкостенные профили, характеристики сечения, моменты инерции, моменты сопротивления, радиусы инерции.

GEOMETRIC CHARACTERISTICS OF SECTIONS OF THE THIN-WALLED ELEMENTS OF SILO CAPACITIES IN THE TASKS OF RELIABILITY CALCULATION

N.O. Makhinko, PhD.,
National Aviation University
 pasargada1985@gmail.com, ORCID: 0000-0001-8120-6374

Abstract. This paper deals with the improvement of stochastic calculation of the core elements of steel storage capacities. Practically they are always made of the thin-walled profiles of different cross-sections. Such elements are vertical or horizontal stiffeners of the body, girder or circular edges of the roof, supporting racks for fixing the technological equipment, etc. These elements are made by bending or rolling the steel sheet. The variety of shapes and sizes of the sections complicates the procedure of determining them in tabular form, and using of the software complexes is not always convenient and it takes time, but it guarantees a high accuracy. The attention is paid to the establishment of approximate analytical expressions for determining the basic geometric characteristics of the thin-walled sections. They were expressed as a function of one of the general dimensions – height. For expressing the geometric correlations fixed relations were established between the sizes of sections of the cross-section. This is absolutely justified, since the given values are assigned on the basis of the production profiles technology. For obtaining the most simple and convenient expressions the radii of rounded corners were not considered. The practical calculation formulas are obtained to determine the cross-sectional area, the moments of inertia, relatively to the central axes, the moments of resistance, and the radii of inertia. At the same time the most common thin-walled profiles were considered, which are used in the building process of this class of constructions. The formulas were expressed through a series of dimensionless coefficients. These coefficients consider the shape of the given section. Also, the expressions were made to determine the dimensionless coefficients of the forms for such types of sections as bended corner, bended channel, profile and circle. The given dependences could be used for direct determinate calculation by using analytical or automated way. Also, these formulas have mathematically simple form and are suitable for solving the stochastic problems by involving methods of the probability and mathematical statistics theories.

Keywords: storage capacities, thin-walled profiles, characteristics of the section, moments of inertia, moments of resistance, radii of inertia.

Стаття надійшла 15.03.2019