

ТЕХНІЧНІ НАУКИ

УДК 624.014

DOI: 10.31521/2313-092X/2018-4(100)-19

РОЗРАХУНОК КАРКАСІВ АРОК ЗМІННОГО ПЕРЕРІЗУ

О.В. Бойчук, кандидат фізико-математичних наук

О.В. Цепуріт, ст. викладач

І.І. Хилько, ст. викладач

С.І. Богданов, ст. викладач

Миколаївський національний аграрний університет

У роботі висвітлено основні підходи до методики розрахунків міцності, надійності і стійкості елементів каркасу арок металевих конструкцій змінного перерізу. Розрахунок виконується при проектуванні оптимальних аркових конструкцій, які проектують таким чином, щоб у всіх перетинах конструктивного елемента арки надійність була заданою, а маса при цьому була мінімально можливою. Застосування легких арок із заданою надійністю забезпечує економію металу і зниження вартості конструкції, визначає перспективність застосування таких конструкцій у будівлях і сільськогосподарських спорудах.

Ключові слова: гнучка стінка, сталевий каркас, площа перетину каркасу, довжина перетину каркасу, запас міцності, надійність сталевих конструкцій, стійкість сталевих каркасів.

Актуальність проблеми.

Максимальне здешевлення збірно-розбірних легких металевих конструкцій та робіт, які пов'язані з їх будівництвом, є пріоритетною задачею на сучасному етапі розвитку будівельної галузі в Україні. Водночас зі здешевленням конструкцій під час проектування треба пам'ятати про забезпечення їх достатньої довговічності та надійності. Одним з ефективних засобів розв'язку цієї проблеми є запровадження методів теорії надійності, які дозволяють більш обґрунтованіше нормувати розрахункові параметри конструкції та навантажень на ймовірнісній основі. Більш важливим є перехід до ймовірнісного розрахунку каркасів арок змінного перерізу та оцінки несучої здатності конструкцій за основним технічним критерієм – ймовірністю відмови конструкції.

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Дослідження та результати випробовувань сталевих каркасів з гнучкою стінкою і поясами з холодногнутих профілів наведено у Натурних випробовуваннях сталевих рам прогином 30м. [1]. У цій роботі розглянуто основні підходи до розрахункової оцінки міцності і стійкості елементів сталевих каркасів.

У ДБН В.2.6-163:2010 Конструкції будинків і споруд [2] розглянуто розрахунок тільки розрізних балок з гнучкою стінкою і плоскими

листовими поясами. Теоретична основа цих регламентацій висвітлена у роботах Б.М. Броуде, А.А. Евстратова, В.В. Бірюлева та інших. Принципові підходи і рекомендації цих робіт використовувалися при розробленні даного сталевих каркасів і первинної оцінки його несучої здатності. Однак внаслідок конструктивних особливостей каркасів основним критерієм для розроблення розрахункових положень є результати натурних випробувань рами прогином 30 м, складеної з універсальних елементів довжиною 3 м.

Мета статті. Випробовування сталевих каркасів з гнучкою стінкою і поясами з холодногнутих профілів, які до цього часу проводилися і є відомими, показали, що основні зусилля стиснення N і вигин M сприймаються поясами елементів з пов'язаною з ними частиною стінки перетину. Робота гнучкої стінки характеризується практичною відсутністю стадії докритичного опору. В реальних конструкціях при товщині стінки $t_m \leq 4$ мм глибина вигинів порівнянна з товщиною і досягає $4t_m$, внаслідок чого деформація стінки від початку навантаження виникає не за площинною схемою, а за рахунок перерозподілу вигинів, зміни їх значень та напрямків. Процес перерозподілу обумовлений як характером вихідних вигинів, так і змінною гнучкістю стінки, що призводить до невизначеного його розвитку і такого стану, коли під дією

переважаючого зусилля характер деформацій відповідає стиску або зсуву. Новизна цієї роботи полягає у використанні методів теорії ймовірності до дослідження основних зусиль стиснення та вигину каркасів арок змінного перерізу на відміну від динамічних методів, які використовуються як загальноприйняті [1], при розрахунку сталевого каркаса з гнучкою стінкою і поясами з холодногнутих профілів. У роботі ми допускаємо, що на елементи конструкції каркаса діє навантаження, яке є випадковою функцією часу, імовірнісні характеристики цієї функції відомі. Потрібно визначити розміри поперечного перерізу конструкції виходячи із заданої надійності. А також необхідно розрахувати значення коефіцієнта запасу міцності k при постійних перерізах поясів, значення коефіцієнта K необхідного для визначення розмірів поперечного перерізу сталевого каркаса і видати рекомендації для визначення надійності сталеві конструкції, у цілому. Під мірою надійності H будемо розуміти ймовірність того, що жодного разу за термін служби T максимальна напруга δ не перевищить несучої здатності сталеві конструкції R .

Виклад основного матеріалу. На ділянках каркаса, де має місце досить велика поперечна сила Q , незалежно від величин N і M , деформування стінки відбувається під впливом зсуву з утворенням пружних діагональних складок. Такий тип зміщеної деформації викликає у стінки додаткові нормальні напруження розтягу [4]:

$$\sigma_{\alpha} = 2Q/t_{\omega} h_{\omega} \sin 2\alpha, \quad (1)$$

де α кут нахилу діагональної складки до площини, яка сприймає поперечне навантаження. У цих умовах визначення докритичної складової поперечної сили, яка обумовлена співвідношенням $t \leq t_{cr}$, а також

визначення критичних t_{cr} і Q_{cr} не має сенсу. Найбільш напруженою, що підтверджують вимірювання при випробуванні, є частина стінки, яка примикає до поясів. Вона отримує вплив трьох складових мембранних напружень,

$\sigma_N, \sigma_M, \sigma_Q$ і дотичного τ . Міцність цих ділянок пропонується перевіряти на рівні примикання поясів умовою:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{N+M}^2 + \sigma_Q^2 - \sigma_{N+M} + 3\tau^2} \leq R_{yn} \quad (2)$$

При визначенні σ_N і σ_M у геометричних характеристиках кожного перерізу повинні враховуватися своя скорочена висота стінки відповідно до рекомендацій [2], а при визначенні σ_Q і τ – повна висота стінки.

Рівняння $\sigma = R_{yn}$ пропонуємо розглядати як граничний стан відповідного перерізу елемента каркаса. Менше з навантажень, за яких досягається ця умова в одному з перерізів, пропонуємо вважати граничним за міцністю навантаженням для каркаса в цілому. Одночасно повинна бути перевірена міцність поясів як самостійних елементів. Пояси працюють як стислі або розтягнуті стрижні під дією поздовжньої сили:

$$N_f = 0.5N \pm M / (h_0 - v_f), \quad (3)$$

і місцевого згинального моменту:

$$M_f = N_f v_f. \quad (4)$$

Який виникає внаслідок прогину (зближення) поясів при спученні стінки. Величину v_f пропонується визначати як зміщення опори балки прогином, який дорівнює висоті перерізу h у середині перерізу, вісь якого вигнута по синусоїді (перетин через дві складки зсуву) з амплітудою $4t_{\omega}$.

Розрахункова довжина пояса в площині стінки $l_{ef} = 0.7l_x$, де l_x довжина перерізу, відстань між елементами жорсткості, які створюють опори поясам. При перевірці поясів на зріз слід враховувати приріст Q_f за рахунок проекції зусилля N_f в напрямку Q_f . Перевірку стійкості стиснутого пояса в обох площинах виконуємо з урахуванням деформованої схеми за граничною умовою взаємодії:

$$[N/N_u + M/M_u(1 - N/N_{cr})] \leq 1, \quad (5)$$

де $N = N_f$ і $M = M_f$ – найбільші розрахункові зусилля в поясі перерізу елемента каркаса який перевіряється $N_u = R_{ynf} A_f$, $M_u = R_{ynf} W_{fpt}$,

де A_f площа стиснутого пояса з частиною стінки, яка дорівнює $0.5h_{ored}$; W_{fpt} – пластичний

момент інерції цієї площини; $N_{cr} = N_{fcr}$ – найменша для перерізу пояса критична ейлерова сила центрального стиснення.

Розглянемо елементи сталеві конструкції, максимальна напруга S в яких лінійно залежить від навантаження q $S = Kq$, де коефіцієнт K , пов'язаний простими залежностями з розмірами поперечних перерізів елемента сталеві конструкції. Припустимо, що характер дії навантаження $q(t)$, яка є випадковою функцією, такий, що силами інерції при визначенні напружень можна знехтувати. Підставивши рівняння $S = Kq$ в рівняння:

$$H = P_0 = \exp\left[-\int_0^{T_\infty} \int_0^\infty Sf(R, S/t) dS dt\right], \quad (6)$$

де отримаємо вираз для визначення коефіцієнта K . Знаючи його значення, легко знайти розміри поперечного перерізу каркаса.

Якщо $S(t)$ – нормальний стаціонарний процес, то для $V(R/T)$ маємо:

$$V(R/T) = \frac{T\sigma_s}{2\pi\sqrt{\sigma_s^2 + \sigma_R^2}} \exp\left[-\frac{(m_R - m_s)^2}{2(\sigma_s^2 + \sigma_R^2)}\right]. \quad (7)$$

Звідси для надійності отримаємо:

$$H = \exp\left\{\frac{T\sigma_s}{2\pi\sqrt{\sigma_s^2 + \sigma_R^2}} \exp\left[-\frac{(m_R - m_s)^2}{2(\sigma_s^2 + \sigma_R^2)}\right]\right\}, \quad (8)$$

Де σ_s^2 – дисперсія напружень в каркасі змінного перерізу; σ_R^2 – дисперсія несучої здатності сталеві конструкції; m_s – математичне очікування напруг; m_R – математичне очікування несучої здатності сталеві конструкції; T – термін служби сталеві конструкції.

Для багатьох реальних фізичних процесів кореляційна функція навантаження може бути апроксимована формулою:

$$K_q(\tau) = \sigma_q^2 e^{-\alpha|\tau|} (\cos \beta\tau + \frac{\alpha}{\beta} \sin \beta|\tau|). \quad (9)$$

Константи α і β підбираються так, щоб експериментальна крива $K_q(\tau)$ збігалася з теоретичною кривою, побудованою за формулою (9). Для цього випадку маємо:

$$\sigma_s^2 = K_s(0) = -\frac{d^2}{d\tau^2} K_s(t) |_{\tau=0} = \sigma_s^2 (\alpha^2 + \beta^2). \quad (10)$$

З урахуванням цього запишемо вираз для надійності:

$$H = \exp\left\{-\frac{T\sqrt{\alpha^2 + \beta^2} K\sigma_q}{2\pi\sqrt{K^2\sigma_q^2 + \sigma_R^2}} \exp\left[-\frac{(m_R - Km_q)^2}{2(K^2\sigma_q^2 + \sigma_R^2)}\right]\right\}, \quad (11)$$

з якого можна визначити шуканий коефіцієнт K , необхідний для визначення розмірів поперечного перерізу сталеві каркаса.

У загальному випадку рівняння (11) зручно вирішувати графічно, для чого перепишемо його у вигляді:

$$-\frac{(m_R - Km_q)^2}{2(K^2\sigma_q^2 + \sigma_R^2)} = -\ln \frac{2\pi\sqrt{K^2\sigma_q^2 + \sigma_R^2}}{T\sqrt{\alpha^2 + \beta^2} K\sigma_q}. \quad (12)$$

Для випадку $\sigma_R = 0$, для викидів, за які заборонені рівнянням (10) вдається вирішити значення K :

$$K = \frac{m_R}{m_q + \sigma_q \sqrt{2A}}, \quad \text{де } A = -\ln \frac{2\pi(-\ln H)}{T\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}. \quad (13)$$

У тому випадку, коли рівень викидів за який заборонені, є випадковим за законом розподілу Релея, то тоді для $V(R/T)$ маємо:

$$V(R/T) = \frac{T}{2\pi} \frac{\sigma_x \alpha}{\sigma_x^2 + \alpha^2}, \quad (14)$$

звідси за рівнянням (6) визначимо надійність сталеві конструкції:

$$H = \exp\left\{-\frac{T}{2\pi} \frac{\sigma_s \alpha}{\sigma_s^2 + \alpha^2}\right\}, \quad \text{підставимо: } \sigma_s = K\sigma_q;$$

$$\sigma_s = K\sigma_q \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}, \quad (15)$$

тоді:

$$H = \exp\left\{-\frac{TK\sigma_q \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}{2\pi(K^2\sigma_q^2 + \alpha^2)}\right\} \quad (16)$$

Розв'язуючи відносно K , отримаємо:

$$K^2 - \frac{\alpha\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}{2\pi\sigma_q(-\ln H)} K + \frac{\alpha^2}{\sigma_q^2} = 0. \quad (17)$$

$$\text{Позначивши: } \frac{T\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}{2\pi(-\ln H)} = B, \text{ отримаємо}$$

остаточно значення коефіцієнта K :

$$K_{1,2} = \frac{\alpha}{\sigma_q} \left(\frac{B}{2} \pm \sqrt{\frac{B^2}{4} - 1} \right). \quad (18)$$

Згідно з розробленими в нормах рекомендацій, в умовах (5) слід приймати: N і M – розрахункові зусилля у кожному перерізі елемента який перевіряється; N_{cr} – ейлерова сила центрального стиснення для елементів постійної довжини і перерізу, найменшого у даному елементі, з урахуванням геометричних характеристик перерізу в площині вигину від M ; N_u – гранична сила центрального стиснення для такого стрижня; M_u – граничний згинальний момент для балки стандартної довжини та постійного перерізу, найбільшого за

площею у елемента який перевіряється. Коефіцієнти зазначеної довжини є статичними величинами, визначеними чисельно і емпірично як залежності від кута звуження елементів, площини його вигину, типу зусиль і виду втрати стійкості – пружно або пружно-пластичного. Так для елемента змінного перерізу відносно головної осі її перетину коефіцієнт визначиться $g_{pi} = 1 / (1.85g_d + 1)$,

де $g_d = \arctg[(h_{max} - h_{min}) / 2L](180 / \pi)$.

При необхідності забезпечення просторової стійкості $N_u = N_{cr \min}$ і $M_u = M_{cr}$. Однак у більшості каркасів будівель просторові втрати стійкості обмежені конструктивно, тобто $l \leq l_{cr}$ у цьому випадку:

$$N_u = R_{yf} A_{red}, \quad (19)$$

$$M_u 2l_{red} (R_{yn} - N / A_{red}) / h. \quad (20)$$

Згідно з [4] маємо:

$$l_{cr} = (60 - 40m) i_{\min} \nu(235 / R_{yf}) \text{ при } -1 < m < 0,5$$

$$\text{та } l_{cr} = 40 i_{\min} \nu(235 / R_{yf}) \text{ при } m > 0,5, \quad (21)$$

де $m = M_{\min} / M_{\max}$ на закріпленому перерізі;

i_{\min} – радіус інерції щодо осі найменшої жорсткості перерізу, який має найбільш повну площину.

Висновки: Встановлено, що для створення економічного каркаса необхідно прагнути до рівномірності його перерізів. Якщо задатися ймовірнісним значенням коефіцієнта запасу міцності k і висловити l_{red} через h_w (при постійних перерізах поясів), то можливо визначити за формулою (21) необхідну висоту h_w у перерізах з $Q=0$ при $M_u = kM$. При $Q_u = kQ$ і $\sigma_a = R_{yn}$ (1) може бути визначена h_w у перерізах з $M=0$. Проміжні перерізи, як показали розрахунки, автоматично не забезпечують той же запас міцності і можуть взагалі не задовольняти умовам граничного стану. Тому вони повинні перевірятися за формулою (2) і (5), висота перерізу повинна коректуватися тільки в бік збільшення. Залежно від відповідності будь-якої ділянки або перерізу для граничного стану каркаса у цілому може прийматися своя величина k з метою забезпечення необхідного рівня надійності конструкції. Остаточне коригування розмірів повинно визначатися конструктивними вимогами, що висуваються до каркасу будівлі (нахил покриття, методи кріплення огорожувальних конструкцій і тощо), що призводить до відступу від умови рівномірності і тим більше – до рівнограничності всіх перерізів, але забезпечує найбільш раціональне до них наближення.

Список використаних джерел:

1. Шебанін В.С., Шебаніна Л.П., Богза В.Г. Розрахунок сталевих каркасів з універсальних елементів змінного перерізу з гнучкою стінкою. *Вісник аграрної науки Причорномор'я*. 2013. Вип. 3. С.180-185.
2. ДБН В.2.6-163:2010. Конструкції будинків і споруд. Сталеві конструкції. Норми проектування, виготовлення і монтажу [Текст] : на заміну СНиП II-23-81* окрім розділів 15* – 19, СНиП III-18-75 окрім розділів 3 – 8, СНиП 3.03.01-87 у частині, що стосується сталевих конструкцій окрім пп. 4.78 – 4.134 : чинний з 2011–09-01 – К. : Міністерство будівництва України, 2011 – 202 с.
3. EC3, Eurocode No 3, "Common Unified Rules for Steel Structures", Commission of the European Communities, April 1990.
4. Rudnev V.O. Racionalnoj forme sploshnoj uprugoj arki v svjazi s sovremennymi metodami vozvedenija. Warsaw, 1990.
5. Шебанін В. С., Хилько І. І., Богданов С. І., Богза В. Г. Числовий метод визначення напружено-деформованого стану і критичних навантажень втрати стійкості арок. *MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture Polish Academy of Sciences University of Engineering and Economics in Rzeszow*. Lublin-Rzeszow, 2013. Vol. 15, No. 2. P.129-132, URL: <http://dSPACE.mnau.edu.ua/jspui/handle/123456789/927> (дата звернення 14.11.18)
6. Шебанін В. С., Хилько І. І., Богданов С. І., Богза В. Г. Полегшені арки криволінійного контура. *MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture an International Journal on Operation of Farm and Agri-Food Industry Machinery Polish Academy of Sciences University of Engineering and Economics in Rzeszow*. Lublin-Rzeszow, 2014. Vol. 16, No. 2. P. 5-8, URL: <http://dSPACE.mnau.edu.ua/jspui/handle/123456789/1916> (дата звернення 14.11.18)
7. Шебанін В. С., Хилько І. І., Богданов С. І., Богза В. Г. Розрахунок каркасів змінного перерізу з гнучкою стінкою. *MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. An International Journal on Operation of Farm and Agri-Food Industry Machinery. Polish Academy of Sciences University of Engineering and Economics in Rzeszow*. Lublin-Rzeszow, 2015. Vol. 17, No. 2. P. 35-39, URL: <http://dSPACE.mnau.edu.ua/jspui/handle/123456789/1919> (дата звернення 14.11.18)
8. Гнітко О. Розрахунок надійності сталевих статично невизначених конструкцій. *Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво) / Полт. держ.техн. ун-т ім. Юрія Кондратюка*. Полтава : ПДТУ ім. Юрія Кондратюка, 1998. Вип. 1

9. В.Г. Богза, С. І. Богданов Нові типи сільськогосподарських споруд. *Современные строительные конструкции из металла и древесины*: Сборник науч. тр. Одесса: Внешрекламасервис, 2005. С. 4-8,
10. Богза В.Г Принципы создания конструктивных форм стальных каркасов облегченного типа из универсальных элементов. *Металлические конструкции*. 1998. №1. С.61-64.

Е.В. Бойчук, Е.В. Цепурит, И.И.Хилько, С.И. Богданов. Расчет каркасов арок переменного сечения

В работе показаны основные подходы к методике расчетов прочности, надежности и устойчивости элементов каркаса металлических конструкций арок переменного сечения. Расчет выполняется при проектировании оптимальных арочных конструкций, которые проектируются таким образом, чтобы во всех сечениях конструктивного элемента арки надежность была заданной, а масса конструкции арки при этом была минимально возможной. Применение легких арок с заданной надежностью обеспечивает экономию металла и снижение стоимости конструкции и определяет перспективность применения таких конструкций в зданиях и сельскохозяйственных сооружениях.

Ключевые слова: *гибкая стенка, стальной каркас, площадь сечения каркаса, длина пересечения каркаса, запас прочности, надежность стальной конструкции, устойчивость металлического каркаса.*

O.V. Boichuk, O.V. Tsepurit, I.I. Hilko, S.I. Bohdanov. Calculation of arch frames of variable cross section

The paper shows the main approaches to the method of calculating the strength, reliability and stability of the frame elements of metal structural arches of variable cross section. The calculation is performed in the design of optimal arched structures, which consists in designing the structure so that in all sections of the structural element of the arch the reliability was specified, and the mass of the arch structure was as minimalas possible.

The use of light arches with a given reliability provides savings of metal and reducing the cost of construction and determines the prospects of the use of such structures in buildings and agricultural structures.

Keywords: *flexible wall, steel frame, cross-sectional area of the frame, length of the intersection of the frame, safety factor, reliability of the steel structure, stability of the metal frame.*