

УДК 624.014.2 (519.168)

Оптимальний вибір конструкцій з дискретно змінною схемою навантаження

Білик А.С., к.т.н.

Київський національний університет будівництва і архітектури, Україна

Анотація. У статті розглядається методика визначення оптимальних рішень конструкцій в умовах невизначеності, пов'язаної зі зміною схеми навантаження. Методику показано на прикладі оптимізації аркових тонкостінних оболонок.

Аннотация. В статье рассматривается методика определения оптимальных решений конструкций в условиях неопределенности, связанной с изменемостью схемы нагружения. Методика показана на примере арочных тонкостенных оболочек.

Abstract. In article is presented a new method of optimal structural decision estimating in uncertainty conditions, entangled with loading scheme variability. The methods are shown on the example of thin-walled arch shells optimization.

Ключові слова: невизначеність, сталеві конструкції, арки, оболонки, оптимальне проектування, навантаження

Постановка проблеми. У конструкції як системі на початковому етапі проектування присутня амбівалентна невизначеність, пов'язана із взаємозалежністю усіх внутрішніх та зовнішніх параметрів. Ми не знаємо геометрії конструкцій, не знаємо поперечних перерізів елементів, не знаємо навантажень і впливів, що будуть діяти на конструкцію впродовж життєвого циклу. На практиці проектувальник вирішує невизначеність, визначаючи і приймаючи сталими деяку кількість параметрів, достатню для пошуку інших, згодом здійснюючи перевірку їх значень.

Одним з аспектів невизначеності розрахункових моделей конструкцій є урахування невизначеності зовнішнього навантаження. При оптимізації геометрії і топології конструкцій з неплоскими покрівлями, згідно з існуючими положеннями національних норм [10] змінюються точки прикладення снігового і вітрового навантаження, причому нелінійність, яка при цьому виникає, носить іноді дискретно-змінний, стрибкоподібний характер, особливо коли для абрису конструкції існує декілька схем навантажень.

В зв'язку із цим виникає практична потреба здійснювати оптимальний вибір конструктивних форм будівель з урахуванням їх дійсного навантаженого згідно з нормами стану, шляхом включення перемінності схеми навантаження до змінних параметрів оптимізації.

Огляд останніх досліджень. Урахування невизначеності у оптимізаційних моделях має велике прикладне підґрунтя [7, 8, 1]. Дослідження, пов'язані з невизначеністю параметрів конструкцій, встановлених в результаті випробувань, проведені у [16]. Конструкції зі зворотним відгуком, що змінюють розрахункову та конструкційну схему наведені у [6].

В абсолютній більшості робіт із оптимізації будівельних конструкцій у схемі навантаження приймається константним [3]. Останнім часом набули поширення оптимізаційні розрахунки з урахуванням геометричної, фізичної нелінійності [5], імітаційним моделюванням навантажень [4], що дозволяє зняти частину невизначеності, пов'язаної з розрахунковою моделлю. Особливо це актуально для аркових та купольних конструкцій, де зміна схеми навантаження залежить від кута нахилу дотичної до покрівлі.

Постановка задачі. Задача формується в просторі станів: обрати при заданих головних кількісних та якісних висхідних даних конструкції у області допустимих рішень найкращу за обраним критерієм якості:

$$r : S^* = \arg \min_{x \in S} K_0(x_1; x_2 \dots x_n)$$

де $x_1; x_2 \dots x_n$ – змінні проектування, K_0 – узагальнений критерій оптимальності. Для покриттів, що апроксимуються стрижневими елементами при розгляді пласкої задачі $r : S^* = \arg \min_{x \in S} K_0(f)$ при $L = const$. На даному етапі критерієм оптимальності обрано масу елемента: $K_0 = m = S \cdot \bar{m}$, де S – довжина, \bar{m} – лінійна густина. При цьому $\bar{m} = f(q_j, L, P_k)$.

Зазначимо, що отримана цільова функція є дискретною, нелінійною, частково сепарабельною [2]. Для таких функцій обґрунтовано застосування модифікованого методу повного перебору, який з розвитком комп'ютерної техніки знаходить все ширше застосування для складних задач і гарантує збіжність при мультимодальності [9].

Оскільки задача оптимального вибору має специфічний щодо типу конструкцій характер, у даній роботі покажемо її вирішення на прикладі аркових оболонок кругового абрису.

Виклад основного матеріалу дослідження. Аркові тонкостінні оболонки характеризуються тим, що виготовляються безпосередньо на будівельному майданчику.

В перетині аркові оболонки кругового абрису складаються із одного сегмента кола, центр якого збігається з віссю симетрії арки. Узагальненою змінною при оптимізації геометрії аркових конструкцій кругового абрису є висота підйому f .

На прольотні арки, що використовуються для перекриття прольотів безкранових будівель, діють навантаження від власної ваги покрівлі, снігового покриву в зимовий час а також від дії вітру. Для пологих аркових конструкцій вітрове навантаження не враховується, оскільки створює розвантажувальний ефект. Це актуально для аркових конструкцій, що спираються на стіни, колони або інші конструкції і використовуються в якості покрівлі. Проте при використанні аркових конструкцій як самостійної будови значно зростає їх висота в зв'язку з потребою ефективного використання зон поблизу опор і вимог щодо функціонального об'єму. Тому для таких конструкцій потрібно враховувати вітрове навантаження, що може здійснювати значний внесок у напружено-деформований стан конструкції [10].

На даному етапі досліджень аркова оболонка розглядається приведеною до стрижневої моделі. Розбиття арки проведено на 16 скінченних елементів, причому визначення координат розбиття залежить від точки формування снігового і вітрового навантаження на кожному кроці пошуку оптимального рішення.

Для розрахунку у спрощеній системі методу скінченних елементів застосовується тільки вузлове прикладення навантажень. Зосереджена сила, що діє у вузлі арки від розподіленого навантаження, при примиканні двох скінченних елементів (див. рис. 1) для стрижнів ланцюгової лінії з наростаючою координатою:

$$F_n = \frac{(x_n - x_{n-1})}{2} \left(q_n + \frac{q_{n-1} - q_n}{2} \right) + \frac{(x_{n+1} - x_n)}{2} \left(q_n + \frac{q_{n+1} - q_n}{2} \right).$$

Для аркових конструкцій, що використовуються у якості складських приміщень, наслідки незначні, тому клас їх відповідальності згідно [11] є СС1. Оскільки арки є головними несучими елементами, вони належать до конструкцій класу А. Відтоді коефіцієнт надійності за відповідальністю, який використовується в усталених розрахункових ситуаціях, згідно [11] становить $\gamma_{n1} = 1$ для першої групи граничних станів та $\gamma_{n2} = 0,95$ – для другої групи граничних станів. Вважається що тонкостінні аркові конструкції, які розглядаються, працюють тільки у пружній стадії (І клас НДС).

Для кругової арки навантаження прикладається лише в межах абрису, де кут нахилу дотичної менше 50° . Епюра коефіцієнтів μ переходу від ваги снігового покриву на поверхні ґрунту до снігового навантаження на покрівлю може приймати два основні варіанти [10] (див. рис. 2). Також можливий варіант із одностороннім накопиченням снігу за трикутною схемою.

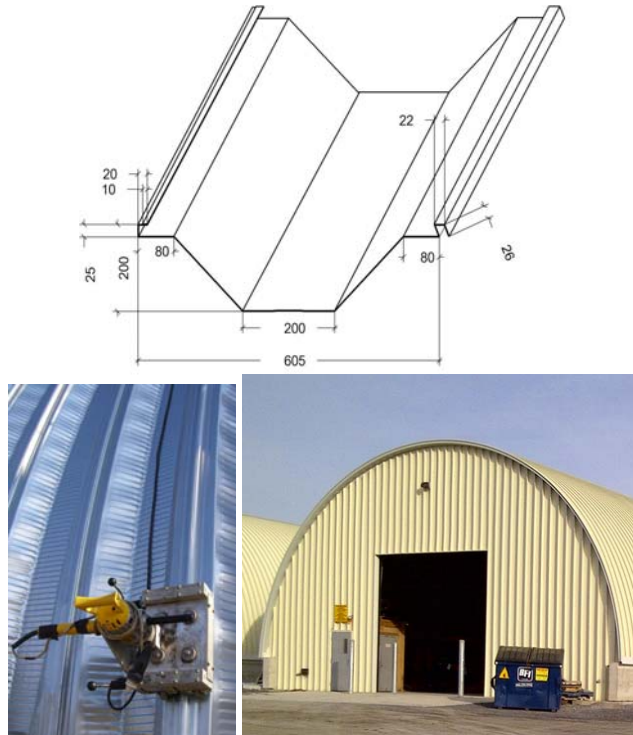


Рис. 1. Поперечний переріз і завальцювання фальців, зовнішній вигляд будівлі

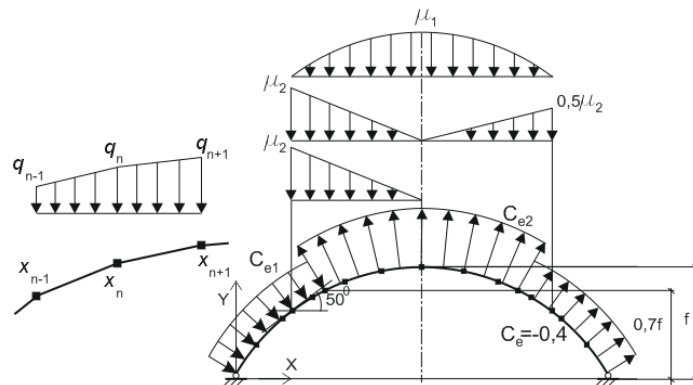


Рис. 2. Визначення геометрії та навантажень

В рамках загальної роботи автора розроблена система оптимального проектування даного типу конструкцій з урахуванням конструктивних і технологічних вимог, що дозволяє визначати оптимальні конструктивні рішення аркових оболонок за дискретно змінюваною нелінійною схемою навантаження.

Пошук проводиться на реальному дискретному сортаменті профілів. Для виготовлення конструкцій використовується тонколистова сталь з полімерним або оцинкованим покриттям першого класу завтовшки 0,6..2,5 мм. Сортамент отриманий за методиками Єврокоду 3 [13] на 0,605 м ширини 1 профілю з листового елемента 914 мм і перебуває у стадії уточнення і дослідження, див. табл. 1, 2 [14].

Таблиця 1

Характеристики перерізів номенклатури профілів при розрахунку при згині

Позначення елементів	Товщина заготовки	Довідкові розміри для профілів								Маса 1 м ² профілю, кг
		при стиснутих верхніх полицях				при стиснутих нижніх полицях				
		Площа перерізу, см ²	Jx, см ⁴	W _{x₂в.в.} , см ³	W _{x₁н.в.} , см ³	Площа перерізу, см ²	Jx, см ⁴	W _{x₂в.в.} , см ³	W _{x₁н.в.} , см ³	
C-0,6	0,6	3.123	178.7	12.618	29.115	2.958	119.9	18.817	8.604	7.116
C-0,7	0,7	3.794	214.2	15.343	33.773	3.569	154.9	23.561	11.282	8.3
C-0,8	0,8	4.497	252.1	18.343	38.444	4.231	193.3	28.53	14.29	9.488
C-0,9	0,9	5.256	291.9	21.566	43.16	4.91	234.3	33.64	17.567	10.673
C-1,0	1,0	6.04	333.4	25.007	47.863	5.622	277.8	38.875	21.12	11.86
C-1,1	1,1	6.862	376.4	28.642	52.564	6.368	323.5	44.172	24.932	13.045
C-1,2	1,2	7.746	421.4	32.538	57.335	7.145	371.5	49.55	29.014	14.231
C-1,3	1,3	8.644	467.2	36.575	62.06	7.953	420.9	54.931	33.303	15.417
C-1,4	1,4	9.579	514.2	40.801	66.794	8.79	471.6	60.308	37.782	16.602
C-1,5	1,5	10.551	562.7	45.251	71.542	9.66	523.9	65.711	42.502	17.788

Таблиця 2

Характеристики перерізів номенклатури профілів при розрахунку при рівномірному стиску

Позначення елементів	Товщина заготовки	Площа перерізу, мм ²	Довідкові розміри для профілів при рівномірному стиску			Маса 1 м ² профілю, кг
			Jx, см ⁴	W _{x₂в.в.} , см ³	W _{x₁н.в.} , см ³	
			C-0,6	0,6	1.367	
C-0,7	0,7	1.702	124.8	13.114	11.577	8.3
C-0,8	0,8	2.072	154.1	16.14	14.34	9.488
C-0,9	0,9	2.469	185.8	19.423	17.314	10.673
C-1,0	1,0	2.898	220	22.96	20.52	11.86
C-1,1	1,1	3.355	256.2	26.709	23.927	13.045
C-1,2	1,2	3.841	294.7	30.715	27.53	14.231
C-1,3	1,3	4.351	334.7	34.866	31.284	15.417
C-1,4	1,4	4.884	376.1	39.183	35.146	16.602
C-1,5	1,5	5.446	419.3	43.679	39.18	17.788

Переріз аркових профілів підбирається за умовами міцності перерізу арки та стійкості її як умовного стрижня. Розрахунок елементів арок здійснюється згідно з ДБН «Сталеві конструкції» [12]. При I-му класі НДС при дії згинального моменту *M* в одній з головних площин потрібний

момент опору за міцністю визначається як $W_{n,\min} = \frac{M}{R_y \gamma_c}$. Стійкість аркових

оболонки з площини забезпечується за рахунок континуальності поверхні. При перевірці стійкості у площині наближено критична сила N_{cr} в аркових конструкціях може бути визначена за формулою Ейлера $N_{cr} = \frac{\pi^2 EI_x}{(\mu_x l_{ef})^2}$. В цьому випадку за розрахункову довжину приймають

половину довжини арки: $l_{ef} = s = \pi R \alpha / 180^\circ$, при косинусі кута розкриття від центральної осі до опори $\cos \alpha = 1 - f/R$. Відтоді потрібний момент

інерції складає $I_x = \frac{N(\mu_x l_{ef})^2}{\pi^2 E}$. Підібраний переріз перевіряється на дію

поперечної сили Q : $\frac{QS}{I_w R_s \gamma_c} \leq 1$, на одночасну дію згинального моменту і

поперечної сили $\frac{0,87}{R_y \gamma_c} \sqrt{\sigma_x^2 + 3\tau_{xy}^2} \leq 1$, та на міцність як позacentровано

стиснутий елемент який не підлягає безпосередній дії динамічних навантажень, при значеннях напружень $\tau < 0,5R_s$ і $\sigma = N/A_n > 0,1R_y$:

$$\left(\frac{N}{A_n R_y \gamma_c} \right)^n + \frac{M_x}{c_x W_{xn,\min} R_y \gamma_c} + \frac{M_y}{c_y W_{yn,\min} R_y \gamma_c} \leq 1,$$

де N , M_x і M_y – абсолютні значення відповідно поздовжньої сили і згинальних моментів при найбільш несприятливій комбінації розрахункових навантажень; n , c_x , c_y – коефіцієнти, які приймаються згідно з [12]. Оскільки елементи арок мають поперечний переріз відкритого профілю з приблизно рівним співвідношенням площі полиць до стінок $A_f/A_w = 0,5$ то $c_x = 1,6$; $c_y = 1,07$; $n = 3$.

Коефіцієнти розрахункової довжини арок на даному етапі прийняті згідно з [15] (див. табл. 3). Слід зауважити, що вони визначені для варіанту гідростатичного навантаження і потребують подальшого уточнення [17]. Обтиск арки та критерій стійкості Мізеса не враховують при значних підйомах аркового покриття (пологі арки не розглядаються).

Пошук оптимального рішення здійснюється шляхом повного перебору значень висоти підйому арки в межах дискретного інтервалу, зумовленого технологічними і конструктивними обмеженнями. Область допустимих значень висоти була взята з метою дослідження від 6 до 13 м. Крок

пошуку взятий із технологічних обмежень виготовлення арок (реалізуються тільки ті конструкції, які технологічно можливі). Результати для елемента оболонки умовною шириною 1 м наведені на графіках рис. 3. Як можна побачити, при зміні схеми завантаження можлива поява локальних оптимумів, окрім того, вплив здійснює дискретність сортаменту профілів.

Таблиця 3

Коефіцієнти розрахункової довжини арок		
f/L	Безшарнірна арка	Двошарнірна арка
0.05	0.7	1
0.2	0.75	1.1
0.3	0.8	1.2
0.4	0.85	1.3

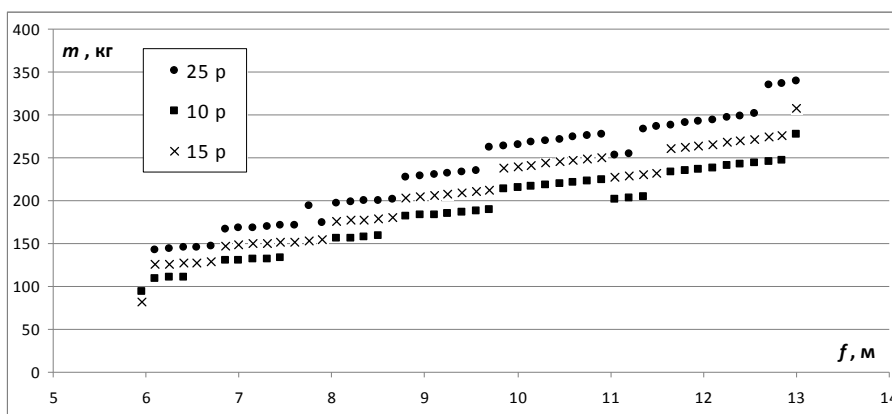


Рис. 3. Реалізація дискретного пошуку оптимального рішення у досліджуваній області при різних термінах експлуатації будівлі

Висновки

У статті вперше сформульовано задачу вибору оптимального рішення конструкції з урахуванням дискретної змінності схеми завантаження і наведено методику її вирішення. На прикладі оптимізації конструкцій гофрованих аркових оболонок кругового абрису показана нелінійність і дискретність рішення, істотна залежність оптимального рішення від геометричних параметрів.

Сучасні технології виготовлення таких конструкцій практично довільної геометрії значно розширюють технологічні обмеження, завдяки чому теоретичні оптимальні рішення відповідають практично реалізованим.

Аркові тонкостінні конструкції дозволяють улаштувати швидкокомпоновані будівлі складського, виробничого призначення як ангари для літаків, зберігання та ремонту техніки. Утеплення ангарів ізсередини напиленням пінополіуретану дозволяє отримати опалювані споруди громадського призначення. Мінімальна ресурсна залежність та мобільність роблять подібні конструкції ефективними для сільськогосподарської галузі, логістики, військової інфраструктури.

Тематикою подальших досліджень є уточнення розрахункових схем, визначення меж переходу між ними та розкриття невизначеності, пов'язаної із додатковими параметрами аркових покриттів.

Література

- [1] Білик А. С. Розпізнавання в умовах невизначеності, пов'язаної з відсутністю інформації / А. С. Білик // Гіротехнології, навігація, керування рухом та конструювання авіаційно-космічної техніки : збірник доповідей VIII міжн. наук.-техн. конф. – К. : НТУУ «КПІ», 2011. – С. 19–27.
- [2] Білик А. С. Вибір оптимальних конструктивних рішень сталевих ферм покриттів : автореферат дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / Білик Артем Сергійович ; Київ. нац. ун-т буд-ва та архіт. - К., 2009. – 21 с.
- [3] Vanderplaats G. Arch shape optimization using force approximation methods / G. Vanderplaats // Structural optimization. – 1990. – No. 2. – P. 193–201.
- [4] Zakhama R. Wind load modeling for topology optimization of continuum structures / R. Zakhama, M. Abdalla // Struct Multidisc Optim. – 2010. – No.42. – P. 157–164.
- [5] Болдырев А. М. Применение методов параметрической оптимизации при исследовании висячих конструкций с переменной расчетной схемой / А. М.Болдырев, А. А. Свентиков // Металеві конструкції. – 2008. –Том 14, №4. – С. 264–268.
- [6] Перельмутер А. В. Управление поведением несущих конструкций / А. В. Перельмутер. – Киев : УФИМБ, 1998. – 148 с.
- [7] Li D. An inverse analysis method for design optimization with both statistical and fuzzy uncertainties / D. Li, K. Choi // Struct Multidisc Optim. – 2008. – No. 37. – P. 107–119.
- [8] Calafiore G. Optimization under uncertainty with application to design of truss structures / G. Calafiore, F. Dabbene // Struct Multidisc Optim. – 2008. – No.35. – P. 189–200.

- [9] Lombardi G. The Aerodynamics of the Keel of America's Cup yachts: an optimization procedure / [Lombardi G., Vanucci S. & others] // International Aerospace CFD conf. (Paris, 2007) : Ansys solutions. – М : «ЕМТ Р», 2007. – Р. 41–44.
- [10] Навантаження і впливи. Норми проектування : ДБН В.1.2-2:2006. – Офіц. вид. – К. : Мінбуд України, 2006. – 60 с. (Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Державні будівельні норми України).
- [11] Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ : ДБН В.1.2-14-2008. – Офіц. вид. – К. : Мінрегіонбуд України, 2009. – 43 с. – (Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Державні будівельні норми України).
- [12] Сталеві конструкції. Норми проектування, виготовлення і монтажу : ДБН В.2.6-163:2010. – Офіц. вид. – К. : Мінрегіонбуд України, 2011. – 202 с. – (Конструкції будівель і споруд. Державні будівельні норми України).
- [13] Єврокод 3. Проектування сталевих конструкцій. Частина 1-1. Загальні правила і правила для споруд (EN 1993-1-1:2005, IDT) : ДСТУ-Н Б EN 1993-1-1:2010. – Офіц. вид. – К. : Мінрегіонбуд України, 2013. – 120 с. – (Система надійності та безпеки у будівництві. Національний стандарт України).
- [14] Лапонов М. В. Ефективні конструкції з тонкостінних гофрованих профілів : робота на здобуття ступеня маг. техн. наук. / М. В. Лапонов. – К. : КНУБА, 2012 – 60 с. – (На правах рукопису).
- [15] Металлические конструкции : учеб. для вузов : В 3-х т. / [В. В. Горев, Б. Ю. Уваров, В. В. Филиппов и др.] : под ред. В. В. Горева. – М. : Высшая школа, 1997 – Т. 1 : Элементы стальных конструкций : учебник. – 527 с.
- [16] Усаковский С. Б. С какой точностью вести расчеты прочности сооружений / С. Б. Усаковский. – К. : КНУБА, 2005. – 159 с.
- [17] Ільків Н. Я. Розрахунок безкаркасних арочних конструкцій з тонкостінних профілів : робота на здобуття ступеня маг. техн. наук / Ільків Н. Я. – К. : КНУБА, 2013. – 98 с. – (На правах рукопису).

Надійшла до редколегії 17.10.2014 р.