УДК 624.014

Машков І.Л.[8], *доцент,*
iigor61@ukr.net
Скребнєва С.М., *к.т.н., доц.*
svetaskreb@ukr.net, ORCID 0000-0003-4082-5181,
Омельченко К.В., *к.т.н., доц.*
Kateomelchenko1980@gmail.com, ORCID 0000-0001-5211-3662,
Глушаниця А.І., *к.т.н., асистент,*
annamashkova06091990@gmail.com
Національний авіаційний університет, м. Київ, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ СТІЙКОСТІ МЕТАЛЕВИХ АРОК

Розглядається проблема забезпечення стійкості двопоясної металевої арки при заданих діях, разом з відповідністю умовам міцності і жорсткості, як один зі шляхів прийняття раціональних конструктивних рішень та забезпеченні функціональної надійності конструкції.

Ключові слова: *сталеві конструкції, двопоясні арки, стійкість, переміщення, чисельне моделювання.*

Постановка проблеми. Сьогодні перспективними та широко розповсюдженими стали сталеві ґратчасті конструкції, важливу роль у вдосконаленні конструктивної форми яких відіграють методи оптимізації. В постановці задачі оптимального проектування необхідно враховувати зміну навантаження при вар'ируванні параметрів споруди. Складність проектної задачі полягає в тому, що її рішення залежить від великої кількості факторів. Достатньо повне врахування можливе лише при розгляданні конкретного типу споруд та заданих умов проектування. Цей шлях частіше за все застосовується для споруд зі сталим видом технічного обладнання. Іншим напрямком може бути виявлення закономірностей впливу окремих факторів на параметри конструкції, виходячи з загальних властивостей конструкції. Методи, отримані на цьому підґрунті, дозволяють робити швидку оцінку рішенню, що приймається. Поряд

[8] © Машков І.Л., Скребнєва С.М., Омельченко К.В., Глушаниця А.І.

з тим, умови ринкової економіки встановлюють жорсткі рамки рентабельності конструкцій із забезпеченням розумної конкурентної здатності споруд при одночасному забезпеченні їх функціональної надійності, зручності будівництва та інших показників.

Мета роботи. Метою роботи є пошук та отримання можливостей збільшення ефективності сталевих конструкцій, підбір раціональних конструктивних рішень.

Основна частина. «Наразі все більшого застосування набувають легкі сталеві конструкції (ЛСТК), що дозволяє швидко зводити нові будівлі з суттєвими перевагами техніко-економічних показників у порівнянні з традиційними способами будівництва. Використовуючи легкі металеві конструкції замість традиційних, можна одержати значний економічний ефект завдяки зниженню навантажень від власної ваги і сейсмічних навантажень, зменшенню транспортних витрат і трудовитрат на монтажі, скороченню термінів будівництва та зниження загальної вартості будови. Досвід європейських країн довів доцільність застосування конструкцій із профільних труб у малоповерховому будівництві. На жаль, на українському ринку будівельних конструкцій такий досвід не набув загального поширення. Тому питання пошуку нових легких конструкцій з застосуванням профільних труб, є актуальним питанням для українських проектувальників і будівельників»[**Ошибка! Источник ссылки не найден.**].

Основні вимоги до металевих конструкцій, це: відповідність конструктивної форми функціональним, естетичним та експлуатаційним вимогам; забезпечення несучої здатності – міцності, стійкості, жорсткості при досягнення меншої трудомісткості виготовлення; скорочення термінів зведення.

Теорія розрахунку арок, як легких сталевих конструкцій, займається питаннями, які можна розділити на два напрямки:

1) визначення зусиль від зовнішніх впливів різних видів навантажень, температури, зміщення опор, монтажу, зусиль, що викликані вагою надаркової надбудови;

2) раціонального підбору контуру осі, величини стріли підйому, зміни поперечних перерізів.

Забезпечення стійкості споруди при заданих діях, разом з задоволенням умовам міцності і жорсткості, відноситься до найважливіших вимог, які враховуються при розрахунку і конструюванні. Проблема стійкості стає актуальною при проектуванні складних конструкцій та споруд. Пояснюється це тим, що прагнення до зниження матеріаломісткості конструкцій призводить до підвищення тонкостінності конструкцій, збільшення їх гнучкості. В результаті споруда стає чутливою до експлуатаційних змін проектної форми рівноваги.

Як відомо, є три методи визначення критичних навантажень - статичний, енергетичний і динамічний. Для вирішення завдань стійкості зручним є метод переміщень, що відрізняється найбільшою алгоритмічністю та легко піддається реалізації у програмних комплексах.

Однак, аналізуючи різні джерела, можна зробити висновок, що двопоясні арки не піддаються розрахунку на стійкість методом переміщень, якщо застосовувати шарнірно-стержневу розрахункову схему і при цьому основну систему обирати таким же чином, як в розрахунку на міцність, тобто вводячи лише необхідні в’язі, оскільки для двопоясної арки характерна місцева втрата стійкості окремих стержнів, тому всі локальні форми залишаються недослідженими. Отже, критичне навантаження визначити не вдається. Для здобуття результату необхідно усунути недосконаліть основної системи шляхом введення надлишкових в'язей, або виконати додатковий аналіз прихованих форм втрати стійкості, або схему двопоясної арки складати з врахуванням реального з'єднання у вузлах.

В рамках дослідження розглянута двопоясна металева арка з просторовою шпренгельною системою затяжок, завантажена розподіленим навантаженням. Такий характер навантаження призводить до небезпеки втрати стійкості. Обрання такої задачі пов’язане з наявністю аналітичного розв’язку у вигляді критичного значення інтенсивності навантаження:

$$P_{кр} = \frac{3 \cdot E \cdot J}{R^3} \quad (1)$$

де R – величина радіусу осі арки.

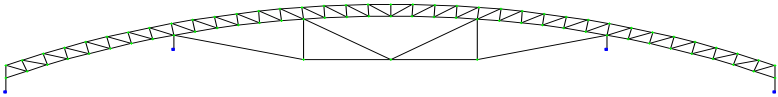

Рис.1. Скінчено-елементна модель

Чисельне моделювання деформування арки проведемо при наступних вихідних даних: радіус арки 69 м; пояси -труби круглого перерізу 203х10 мм, з площею 60,63 см^2, моментом інерції 2830,72 см^4. Тоді теоретичне критичне значення навантаження дорівнює 60,6 кН/м.

Вісь арки апроксимуємо правильним 37 - кутником, з вершинами на контурі. Відхилення кожної ділянки від контуру складає 2 мм. Модель має в порівнянні з ідеальною аркою припустимі відхилення. Визначаються переміщення вузлів арки. Для цього визначаються згинальні моменти від навантаження в 157 перерізах та повздовжні сили на 36 ділянках арки. На кожному етапі уточнення переміщень визначаються нові координати вузлів:

$$x_{ik} = x_{i0} + f_{xi}, \quad (2)$$

$$y_{ik} = y_{i0} + f_{yi}, \quad (3)$$

де x_{ik} та y_{ik} – координати вузла i після k-того уточнення; x_{i0} та y_{i0} – координати вузла i на початку деформування; f_{xi} та f_{yi} - горизонтальне та вертикальне переміщення, знайдені на k-тому уточненні.

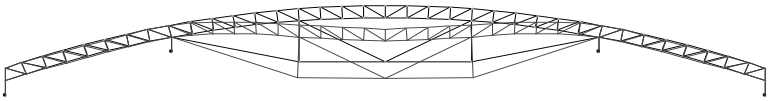

Рис.2. Деформована схема

Чисельне моделювання проводилось в програмному комплексі «ЛИРА». Розглянемо процес деформування при навантаженні 40 кН/м.

Контрольний переріз №1 приймаємо у вузлі, що знаходиться приблизно на середині правої піварки з координатами x=16,44 м і y=0,0016 м, переріз №2 – у вузлі, що знаходиться ближче до середини арки. В табл.1 наведені результати десяти уточнень переміщень для перерізів. M_1 – значення згинального моменту в перерізі №1, N_1– значення повздовжньої сили в цьому перерізі, f_1 – переміщення перерізу №1, f_2 –переміщення перерізу №2, σ_1 – нормальне напруження в перерізі №1.

Таблиця 1

Параме-три	Без уточ-нення	Номера етапів уточнення					
		1	**2**	**3**	**5**	**10**	**20**
M_1, кНм	0,194	0,071	0,0435	0,0115	-0,0061	-0,0167	-0,0149
N_1, кН	-312,0	-312,1	-312,1	312,1	-312,1	312,1	-312,1
f_1, мм	3,08	3,14	3,06	3,05	3,05	3,05	3,04
f_2, мм	2,86	2,91	2,88	2,81	2,75	2,91	2,84
σ_1, МПа	-52,83	-52,9	-52,87	-52,76	-52,8	-52,92	-52,84

Як бачимо згинальні моменти в арці малі, ними можна знехтувати. Це пояснюється тим, що чисельна модель, що аналізується, відповідає реальній арці, що має малі відхилення від теоретичної осі. Врахування деформації арки веде до зміни моментів, які залишаючись малими, поступово змінюють знак: більш навантаженими стають внутрішні а не зовнішні волокна. Процес зміни моментів затухаючий. Повздовжні сили залишаються незмінними. На кожному етапі уточнення переміщення зростають, зміна переміщень поступово затухає.

Можна вважати, що до 20-го уточнення деформована вісь арки є стабільною. Також стабілізується напруження в арці. По отриманих результатах бачимо, що деформаційний розрахунок не дає уточнення, а розрахунок за недеформованою схемою дає доволі точні результати.

При зростанні навантаження збільшуються величини внутрішніх зусиль, і переміщення. При розрахунку за недеформованою схемою і це зростання пропорційне величині навантаження. Тому для порівняння результатів для різних інтенсивностей навантаження, вони зводяться до результатів навантаження з інтенсивністю 40 кН/м за недеформованою схемою. У табл. 2 наводяться відносні величини вертикальних переміщень перетину при різних навантаженнях (f_{pk} – переміщення при навантаженні P, кН/м на етапі уточнення k, $f_{40,0}$ – переміщення без уточнення при навантаженні P = 40 кН/м).

Таблиця 2

P, кН/м	Без уточнення	Значення $\frac{f_{pk}}{f_{40,0}} \cdot \frac{40}{P}$ на етапах уточнення								
		1	2	3	4	5	6	7	20	30
40	1	1,10	1,15	1,19	1,21	1,22	1,23	1,23	1,24	1,24
50	1	1,12	1,21	1,28	1,33	1,36	1,39	1,41	1,46	1,46
55	1	1,12	1,23	1,32	1,39	1,45	1,49	1,53	1,68	1,69
60	1	1,15	1,28	1,40	1,50	1,59	1,67	1,74	2,15	2,22
65	1	1,17	1,32	1,47	1,61	1,74	1,87	2,00	3,11	3,69
70	1	1,17	1,34	1,53	1,72	1,91	2,11	2,31	5,35	9,14
80	1	1,20	1,43	1,70	2,02	2,40	2,84	3,37	2,74	11,75

Результати наведені в табл.2, дають змогу зробити висновок, що збіжність процесу уточнення зменшується зі збільшенням навантаження. При 60 кН/м збіжність стає малою, а при 80 кН/м процес розбігається. Можна помітити, що навантаження 60 кН/м близьке до критичного, яке отримують для ідеальної арки.

Відносну величину напруження в перетині №1 на десятому етапі уточнення деформованої схеми, проаналізуємо в табл.3.

Найбільше нормальне напруження при розрахунку за недеформованою схемою позначимо як σ_0, на десятому етапі уточнення - σ_{10}. При малих навантаженнях зміна напруження знаходиться в межах припустимої похибки, а при великих виходить за ці межі.

Таблиця 3

P, кН/м	40	50	55	60	65	70	80
σ_{10}/σ_0	0,99	1,02	1,04	1,08	1,12	1,24	1,66

Розглянуто процес деформації осі арки при великих навантаженнях (80 кН/м). Перетин №1 при розрахунку за недеформованою схемою переміщується всередину арки, при уточненні рухається назовні (табл.4), тобто маємо випучування арки – одну з форм втрати стійкості.

Таблиця 4

Число уточ-нень	Без уточнення	1	3	5	10	15	18	20
f_{x1}	1,44	0,99	0,43	-1,99	-9,95	-28,89	-52,44	-78,64

Висновки. Аналіз деформації двопоясної арки з просторовою шпренгельною системою затяжок, дає змогу прийти до висновку, що деформаційний розрахунок дозволяє уточнити напружено-деформований стан арки, а також оцінити її стійкість без традиційного визначення величини критичного навантаження. Подібне дослідження необхідно виконувати у випадках, при яких неможливо визначення критичних навантажень по стандартній схемі.

Список використаних джерел

1. Пічугін С.Ф. Пропозиції нових сталевих конструкцій із замкнених профілів / Пічугін С.Ф., Чичулін В.П., Чичуліна К.В. // Збірник наукових праць Українського інституту сталевих конструкцій імені В.М. Шимановського.– К.: Вид-во «Сталь», 2016, вип.18. – С.4-17.

2. Трофимов В. И. Легкие металлические конструкции зданий и сооружений .:учебное пособие / В. И. Трофимов, А. М. Каминский. – М. : Издательство АСВ, 2002. – 576 с.

3. Горев В.В. и др. Металлические конструкции. В 3-х т.: ученик для студ.строит.спец.вузов и аспирантов. Т.2. Конструкции зданий / ред. В.В.Горев.-3-е изд., стер.-М.: Высшая школа, 2004.– 528 с.

Annotation

Mashkov Igor, Skrebnieva Svitlana, Omelchenko Kateryna, Hlushanytsya Anna

Analysis of the work of spatial hanging coatings

The problem of ensuring the durability of a double-band metal arch at given actions, together with compliance with the conditions of strength and rigidity, is considered as one of the ways of making rational structural decisions and ensuring the functional reliability of the structure.

Today, steel lattice structures have become promising and widespread, and optimization methods play an important role in improving the structural form. In setting the optimal design problem, it is necessary to take into account the change in load when varying the parameters of the structure.

The complexity of the project is that its decision depends on many factors. A sufficiently complete consideration is only possible when considering a specific type of structures and given design conditions. This path is most often used for structures with a permanent type of technical equipment. Another direction may be to identify patterns of influence of individual factors on the design parameters, based on the general properties of the structure.

The methods obtained on this basis allow a quick evaluation of the decision being made. At the same time, the conditions of a market economy set a rigid framework for the profitability of structures while providing reasonable competitive ability of structures while ensuring their functional reliability, ease of construction and other indicators.

The purpose of the work is to find and obtain opportunities to increase the efficiency of steel structures, the selection of rational structural solutions.

The analysis of deformation of a double-zone arch with a spatial drawstring system allows to conclude that the deformation calculation allows to specify the stress-strain state of the arch, as well as to evaluate its stability without the traditional determination of the value of the critical load. Such research should be performed in cases where it is not possible to determine the critical loads according to the standard scheme.

Key words: *steel structures, double-arched arches, stability, displacement, numerical modeling.*

Стаття надійшла до редакції у лютому 2020 р