

АРКОВІ МОСТИ – ПРАГМАТИЗМ І ПОЕЗІЯ ФОРМИ

Зотова В.І.

Лантух-Лященко А.І.

Національний транспортний університет

*Міст належить будувати так, як і собор,
з такою ж увагою та турботою і з такого ж матеріалу»
Мікельанджело Буонарроті (1475-1564)*

Вступ

Метою цієї роботи є бажання привернути увагу дослідників і проєктантів до розробки і проєктування аркових мостів для застосування на автомобільних дорогах України. Аркові мости в силу багатства і виразності своїх архітектурних форм завжди були примітними спорудами, предметом гордості міст усього світу. Своєю природною формою вони органічно вписуються в будь який пейзаж – старовинного або сучасного міста, парку, гірської або рівнинної дороги. Недарма ще в Античному Римі так полюбляли будувати аркові мости. Саме вони, разом з розкішними, пишними і парадними храмами мали підкреслювати велич і могутність Риму, були містичним союзом сили, прогресу і краси, були довічними зразками втілення досконалості.

Проте привабливими завжди були не тільки унікальні архітектурні риси аркових мостів. Людству з доісторичних часів відомо, що арка – це єдина конструктивна форма, яка дає змогу застосувати матеріали, здатні протистояти тільки тиску. Відомо, що це єдина несна конструкція моста, переріз якої використовується оптимально. Відомо, що аркові мости мають довговічність, яка сягає віків.

Ось арковий міст (рис. 1), збудований у 1189 р. в Китаї – міст "Марко Поло" (називаний так тому, що його докладно описав італійський мандрівник Марко Поло (1254-1324). Міст складається з одинадцяти сегментних арок, має повну довжину більше ніж 210 м. Міст пережив віки і сьогодні все ще служить людям – використовується для руху сучасних вантажівок і автобусів.

Показово, що і сучасні залізобетонні арки мостів мають значно більшу довговічність ніж балкові прогонові будови. Ми маємо свідчення того, що залізобетонні аркові мости є близькими до оптимальних не тільки за використанням матеріалу, а і за вартістю загалом всього життєвого циклу.

Сьогодні в мостобудівництві настав час, коли проєктант має нести моральну відповідальність перед суспільством і довколишнім середовищем за гармонію форми і технічної раціональності споруди. Сучасні нормативні документи розвинених країн, посібники з проєктування поряд з вимогою економічної ефективності рішень закликають до уважного аналізу архітектурної форми моста. Польські вчені Краківської політехніки, за редакцією професора Казимежа Фляги видали підручник для студентів будівельних спеціальностей «Естетика конструкцій мостів» [1]. Це знакове сучасне видання, віддзеркалення філософії теорії споруд.

Унікальний довідник з проектування мостів за редакцією китайських вчених Wai-Fah Chen та Lian Duan, складений 83 авторами з усіх кінців світу, лейтмотивом якого є «мистецтво проектування мостів 21 віку», починається із загальних принципів проектування та естетики мостів [2]. Принципи, що проголошуються, тут формулюються як три провідні ідеали будівельного мистецтва: ефективність, економічність, і елегантність.

Поєднання цих фундаментальних і водночас конфліктних категорій не є простим. До того ж, естетичність, елегантність не має чітко визначених критеріїв. Професор Штутгартського університету Фриц Леонгардт писав [3]: «Категорію естетики не можливо зрозуміти виключно критичним міркуванням. Це поняття, яке сягає до емоцій, де логіка і раціональність втрачають їх точність».

Аркові мости є загально визнаними як гармонійне втілення всіх кращих рис споруди, аркові мости це саме ті, що за різноманітністю своїх форм, за надзвичайно яскравим поєднанням естетичності з функціональністю, можуть стати «пробним каменем» в проектуванні нового покоління мостів України.

Ретроспективний погляд на конструкцію і форму мостів

Кинемо погляд на еволюцію форми, технічних і економічних характеристик аркових мостів з поділом на три рівня розвитку будівництва за класифікацією професора Ю. Гломба [4] (дещо перефразованої авторами цієї статті):

I. До споруди пред'являються вимоги функціональності і надійності.

II. Збільшуються вимоги до несної здатності, ставиться вимога економічності будівництва.

III. Чітко формулюються вимоги довговічності, оптимізації вартості всього життєвого циклу, виразності архітектурної форми і органічного включення споруди в довколишнє середовище.

Тут приймається на, що кожен наступний рівень за умовчанням містить в собі всі вимоги попереднього.

Дійсно, аналізуючи конструкцію мостів першого тисячоліття (I рівень розвитку), бачимо, що будівельник перш за все намагався забезпечити надійне функціонування споруди. Приваблива аркова форма була продиктована природою та властивостями тих матеріалів, які мало в своєму розпорядженні людство.

Досить типовими для другого рівня розвитку є мости, показані на рис.2, 3. Пішохідний попередньо напружений залізобетонний міст Сальжінатобель в Швейцарії (рис. 2) збудовано в 1930 році за проектом відомого швейцарського інженера Робера Майяра (Robert Maillart, 1872-1940). Міст має арку коробкового перерізу з прольотом 90.04 м розраховану на навантаження в 3,5 кН/м² від натовпу або вантажівки загальною вагою 80 кН. Міст є визнаним зразком будівельного мистецтва періоду II. Елегантна функціональна простота його форми продиктована вимогою мінімальної будівельної вартості та технологією будівництва в гірських умовах.

Інший приклад, що ми відносимо до II періоду, – залізобетонний Мерефо-Херсонской залізничний міст в Дніпропетровську (рис. 3), збудований в 1929-1931 р.р. за проектом інженера М.М. Колоколова. В буремні післявоєнні роки (1946-1951р.р.) міст відбудовувався за проектом інженера Є.Г. Тетерука. Для судноплавних прольотів були запроєктовані нові розпірні арки з їздою по середині, розраховані на пропуск одночасно двох важких потягів.

Ці арки мають прольоти по 106,0 м зі стрілою підйому 34,5 м. Сусідні арки з їздою по верху (їх прольоти 52,0 і 29,0 м) zostались побудови 1931 р.

Будівництво велося в умовах жорстокої економії коштів та дефіциту матеріалів, в стислі терміни. Проте, завдяки своїй арковій формі міст і сьогодні успішно експлуатується, чудово вписався в пейзаж повноводного Дніпра і є найпривабливішою спорудою міста.

В сучасних мостах Європи (рис. 4, 5, 6, 7) дуже часто використовують аркові конструкції. На жаль, ми не маємо відповідної статистики, але коли їдеш дорогами Європи, маєш враження, що тут всі мости – аркові. За функціональним призначенням – це вся гама мостів – від шляхопроводів до пішохідних. Дивлячись на них, не маєш сумніву в тому що це мости новітнього III періоду. Виразність їх архітектурних форм така, що вони відразу вкарбовуються в пам'ять, складають враження свята, фестивалю мистецтв на дорозі.

Погляньте на рис.4, і ви відчуєте, як міст розбиває одноманітність сірої стрічки автостради арка моста, як він прикрашає досить одноманітний в цьому місці пейзаж.

На рис 5, 6 показано дуже відомий міст «Enneüs Heerma» в Амстердамі, збудований в 2001 р. за проектом англійського інженера Nicholas Grimshaw. Він має 2 арки з затяжками, загальна довжина моста 230 м. Вишукана екзотична форма арки, ажурні підвіски надзвичайно гармонійно вписується в пейзаж широкої річки, білий колір конструкцій арки підкреслює зорову легкість споруди. Незважаючи на велику кількість мостів в Амстердамі, саме цей арковий сьогодні для усього світу є символом міста.

Ще один зразок сучасного аркового моста наведено на рис. 7. Це міст Pont de l'Europe через р. Лауру в Орлеані, Франція, з прольотом 201,6 м, збудований в 2000 р. за проектом виданого архітектора і інженера Santiago Calatrava. З перших днів свого існування міст заняв визначне місце в світовій скарбниці видатних зразків будівельного мистецтва. Похила арка моста з гнучкими підвісками на фоні блакитного південного неба складає враження музичного інструменту – арфи, яка як птах ширяє над водною гладінню. Це міст, про який не скажеш, що він «через» річку, він злетів «над» річкою.

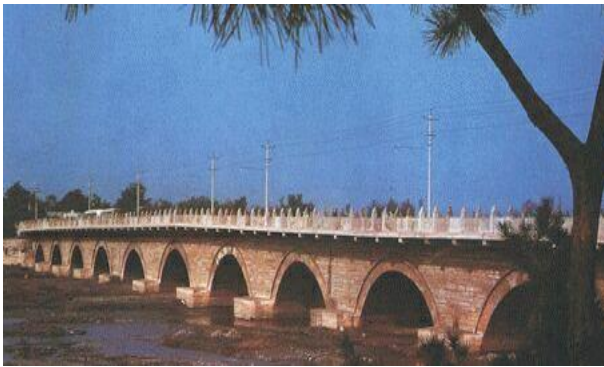
Форма аркових мостів настільки різноманітна, що заслуговує окремого дослідження. Ми ж тут приведемо ще тільки один приклад неординарного аркового моста, у якого арка служить пілоном (рис.8). Це досить відомий міст в Японії Handea Sky Arch, збудований в 1992 р. Площина арки цього моста є перпендикулярною до повздовжньої осі балки жорсткості. Сьогодні в світі є немало аркових мостів, особливо пішохідних, у яких площина арки непаралельна повздовжній осі прогонової будови.

Все викладене, сподіваємося, є переконливим свідченням високих художніх естетичних можливостей аркових мостів. За виразністю форми їм немає рівних, це очевидно.

Поряд з визнанням високих художніх властивостей аркової форми, безумовно, повстає питання економічної доцільності. Щоб відповісти, в першому наближенні, на це питання далі розглядається модельний приклад.

Модельний приклад

Розглядається аркова прогонова будова шляхопроводу габариту $11,5 + 2 \times 1$ м. За розрахунковою схемою це залізобетонна безшарнірна арка зі сталлюю затяжкою, з їздою по низу, прольотом $L = 42$ м (рис. 9).



*Рисунок 1 – Міст «Марко Поло»,
Китай, 1189 р.*



*Рисунок 2 – Міст «Salginatobel»,
Швейцарія, 1930 р.*



*Рисунок 3 – Залізничний міст
в Дніпропетровську, 1946 р.*



*Рисунок 4 – Міст на автостраді
в Німеччині, 2001 р.*



*Рисунок 5 – Міст Enneüs Heerma
Нідерланди, 2001 р*



*Рисунок 6 – Міст Enneüs Heerma
Нідерланди, 2001 р.*



*Рисунок 7 – Міст «Pont de l'Europe»,
Франція, 2000 р.*



*Рисунок 8 – Міст Handea Sky Arch,
Японія, 1992 р.*

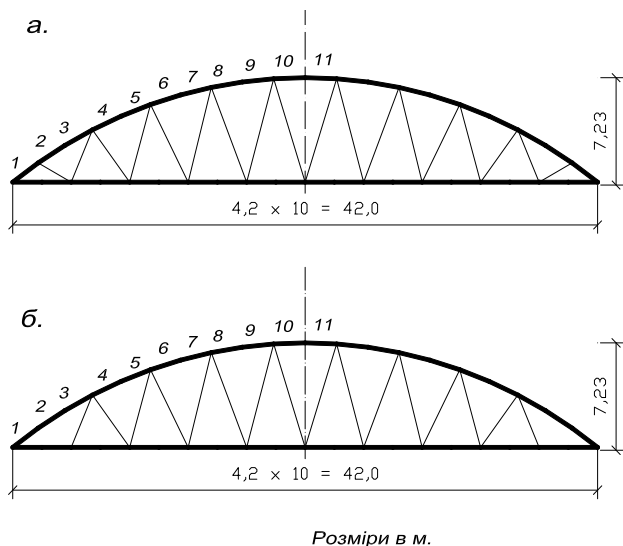


Рисунок 9 – Аркова прогонова будова

Поперечні перерізи елементів показано на рис. 10. Сама арка має залізобетонний переріз (рис.10 а.), підвіски – замкнутого сталюого профілю (рис. 10 б.), затяжка – два сталі двотаври (рис. 10 в.).

Аналізується напружено-деформований стан прогонової будови від рівномірно-розподіленого навантаження $p = 81,8$ кН/пог.м, яке складається першої і другої частин постійного навантаження, двох колон рухомого навантаження А15 та двох тандемів при коефіцієнті поперечного розподілу $k_{np} = 0,72$ і натовпу на тротуарі.

В табл. 1 наведено моменти і нормальні сили в перерізах елементів арки (номери елементів показано на рис. 9) за схемою рис. 9 а.

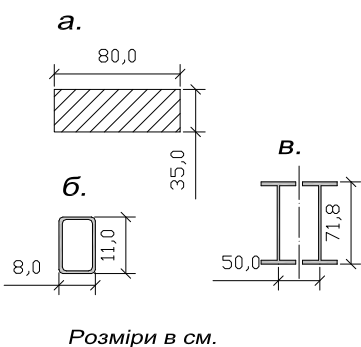


Рисунок 10 – Поперечні перерізи елементів ферми

Якщо порівняти наведені згинальні моменти з моментами у вільно опертій балці з прогоном $0,5 L = 21$ м, завантаженої таким же рівномірно-розподіленим навантаженням як і арка ($M_{L/2} = 4507$ кНм, $M_{L/4} = 2254$ кНм), то можна дійти висновку, що перерізи арки потребують тільки конструктивного армування.

Таблиця 1 – Нормальні сили та згинальні моменти в перерізах елементів арки, варіант а.

Номер елемента	Нормальна сила, кН	Згинальний момент, кНм
1	3413	0
2	3551	107
3	3528	-85
4	3454	171
5	3438	-54
6	3367	150
7	3356	-62
8	3313	140
9	3306	-61
10	3291	142



Рисунок 11 – Епюра моментів в перерізах елементів арки, варіант а

Нормальна сила є практично постійною, її значення знаходиться в діапазоні 3300–3400 кН.

Подальші ескізні розрахунки показали, що загалом кількість сталі на аркову прогонову будову з прольотом $L = 42$ м приблизно дорівнює витратам сталі на дві прогонові будови з прольотами по 21 м. Базуючись на цих розрахунках, ми можемо припустити можливість розробки проекту аркової прогонової будови з прольотом $L = 42$ м, що за матеріальними витратами буде еквівалентною двом балковим прогоновим будовам з прольотами $L = 21$ м. При цьому ми одержимо, як прямий вииграш, вартість однієї проміжної опори та її фундаменту.

В табл. 2 і на рис. 12 показано результати статичного розрахунку арки з дещо зміненою схемою підвісок за варіантом рис. 9 б. Різниця в схемах є незначною – у другому варіанті на одну (крайню) підвіску менше на кожній половині арки. Метою цього розрахунку було виявлення чутливості арки до схеми підвісок. Як і можна було очікувати, моменти в крайніх елементах збільшились, проте залишаються зневажливо малими по відношенню до балки з прольотом $L = 21$ м. Подібний ефект маємо також при тимчасовому рухомому навантаженні на одній половині арки. З іншого боку, ці результати вказують на ефективність застосування аркової системи з густою сіткою гнучких підвісок.

Таблиця 2 – Нормальні сили та згинальні моменти в перерізах елементів арки, варіант б.

Номер елемента	Нормальна сила, кНм	Момент, кНм
1	3140	0
2	3135	-338
3	3117	-236
4	3037	300
5	3034	-16
6	2988	90
7	2983	-107
8	2944	110
9	2942	-94
10	2928	109



Рисунок 12 – Етюра моментів в перерізах елементів арки, варіант б

Аркові мости з гнучкими підвісками

Останні 2-3 десятиріччя набули досить широкого застосування аркові системи з сіткою перехресних гнучких підвісок такого типу, як у вантових мостах. На рис.13 показана сітка гнучких підвісок моста Pont de l'Europe у Франції (рис.7). Таку систему підвісок було запатентовано датським інженером О.Ф.Нільсеном (O.F.Nielsen) ще в 1924 р. і тільки з 70-х років минулого сторіччя аркові мости такої системи стали популярними у світі.

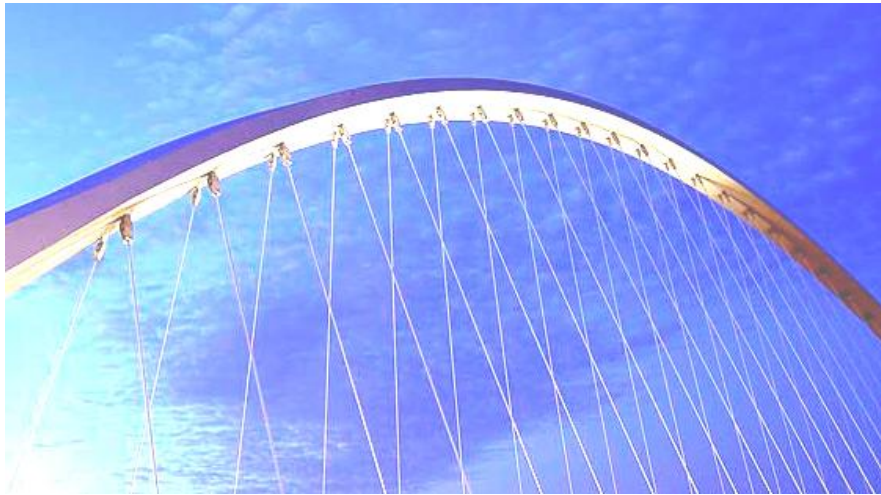


Рисунок 13 – Сітка перехресних гнучких підвісок арки

Популярність їх пояснюється не тільки елегантністю і вишуканістю форми, а й економічністю конструкції, особливо при великих прольотах порядку 70 – 250 м. В роботах відомого інженера і вченого Пер Твейта (Per Tveit) [5] наводяться вражаючі дані стосовно економії сталі в аркових системах з гнучкою сіткою підвісок порівняно з прогоновими будовами з сталевими балками або фермами. Економія може сягати 50-75 %. В порівнянні із залізобетонними прогоновими будовами економія попередньо-напруженої арматури може становити до 30-35 %, а загальна вартість будівництва може бути зменшена на 35-45 % на м² плану моста.

Ми навели ці дані поряд з розрахунками модельного прикладу, щоби базувати тезу: проекти аркових мостів вартуватимуть не більше, ніж широко розповсюджені в будівництві України інші системи.

Висновки

Аркові мости завжди проектувались і будувались в Україні. Ось і нині два аркових чудових моста, різних за формою будуються через Дніпро в містах Києві і Запоріжжі. Цей художній вибір є даниною великим найкращим містам Європи. Ми ж нашою роботою намагаємося довести, що аркові системи можуть широко проектуватись на всіх автомобільних дорогах України, застосовуватись в проектах пішохідних мостів. Аркові мости будуть задовольняти найвибагливішим естетичним вимогам і, водночас, будуть достатньо економічними. У всякому випадку, аркові мости не будуть дорожчими за мости інших прийнятих систем.

Література

1. Flaga K., Januszkiewicz K., Hrabiec A., Cichy-Pazder. – Estetyka konstrukcji mostowych. Krakow, 2005.
2. Bridge Engineering Handbook. Edited by Wai-Fah Chen and Lian Duan. – CRC Press, 2000, Boca Raton London New York Washington, D. C.
3. Leonhardt, F., Bridges — Aesthetics and Design. OVA, Stuttgart, Germany, 1984.
4. Гломб Ю. Современный взгляд на образование форм мостов. Сб. «Автомобильные дороги и дорожное строительство», № 64, К.: 2002, С. 49-54.
5. Tveit, P. Optimal Network Arches Save 50 to 75 % of the Steel. IABSE Conference New Delhi, India 2005. ISBN 3-85748-111-0.