

Абрамов В. М., к.т.н., доцент (Донбаська національна академія будівництва і архітектури, м. Івано-Франківськ (на період воєнного стану), vr09@i.ua)

ПРО МЕТОДИКУ РОЗРАХУНКУ АРКОВИХ МОСТОВИХ СПОРУД З ГОФРОВАНОГО МЕТАЛУ

Розглянуто питання методики практичного розрахунку аркових мостових споруд з металевих гофрованих конструкцій (МГК) на дію навантаження від маси ґрунту дорожнього насипу і тимчасового рухомого навантаження від транспортних засобів. На підставі аналізу технічної літератури і відповідних нормативних документів показано, які недоліки існують у підходах до проєктування саме аркових мостових споруд з МГК, менш поширених і менш досліджених, в порівнянні зі спорудами круглої форми. За результатами цього аналізу стану справ у галузі проєктування мостових споруд з МГК встановлено, які саме недоліки є у існуючих нормативних документів в частині розрахунків таких споруд, особливо аркових. Надано пропозиції щодо створення основи методики спрощеного розрахунку таких споруд в умовах плоскої задачі, зокрема показано, як можливо досить просто і зрозуміло, з достатньою для практичних цілей точністю визначити несучу здатність аркової мостової споруди з МГК. Показано, що її можна визначити як суму особистої несучої здатності арки (поза ґрунтом) і додатка до неї у вигляді навантаження, яке необхідне для забезпечення рівноваги схеми арки як системи з жорстких дисків, з'єднаних повними шарнірами в допустимому деформованому стані (з допустимим прогином) в умовах пружного опору ґрунту деформаціям арки. Надані пропозиції дозволяють виконати розрахунок аркової мостової споруди з МГК досить просто і з достатньою для практичних цілей точністю, з урахуванням пружного опору ґрунту в допустимому деформованому стані і з урахуванням фізичної і геометричної не лінійності системи «споруда – ґрунт».

Ключові слова: аркова мостова споруда; металеві гофровані конструкції; деформації; несуча здатність.

Вступ. Мостові споруди з МГК різних форм і розмірів отвору є досить поширеними об'єктами транспортного будівництва в багатьох країнах світу. Поширюються такі споруди і в Україні. Для безпечної тривалої експлуатації цих специфічних і ефективних за багатьма показниками споруд потрібен правильний підхід до їх проєктування. Тому проєктування мостових споруд з МГК слід виконувати на підставі якомога більш достатніх уявлень про їхню роботу і створення адекватних та зрозумілих розрахункових схем, як для спрощених розрахунків в умовах плоскої задачі, так і для більш детальних, просторових, наприклад за методом скінчених елементів (МСЕ). Особливо це стосується аркових споруд з МГК, специфіка проєктування і розрахунку яких в нормативних документах майже не відображена, або відображена значно менше, в порівнянні зі спорудами у формі круглих труб.

Стан питання і аналіз публікацій. В нормативному документі України з проєктування і будівництва мостових споруд з МГК розглядаються такі споруди різних форм – круглі, у формі еліпсу, коробчасті, аркові – але тільки саме у частині загальних питань проєктування і будівництва. В частині розрахунків міцності і стійкості цей документ містить тільки формули спрощеного визначення несучої здатності таких споруд у формі круглих труб [1]. Але й для труб простої круглої форми ці формули необґрунтовані і непереконливі – базуються на тому, що граничним станом є досягнення напружень текучості від дії тільки нормальної сили. І це при тому, що насправді для труб під ґрунтовим насипом та для інших подібних споруд в ґрунті визначальними є напруження від згину під дією переважаючого вертикального тиску [2]. Крім того, для труб в ґрунті поява пластичних деформацій і навіть пластичних шарнірів не є граничним станом, якщо враховувати пружний опір ґрунту деформаціям труб у бік ґрунту (існують, наприклад, шарнірні, геометрично змінні оправи тунелів і гірських виробок [3]). Нормативні і методичні документи інших країн, наприклад [4; 5], містять прості аналітичні способи розрахунку труб і мостових споруд з МГК також переважно тільки для круглих форм та рекомендації для споруд інших форм складні просторові розрахунки за допомогою МСЕ (що вимагає значних трудовитрат, витрат часу і фінансів).

Мета і завдання роботи. На підставі результатів розрахунково-теоретичних досліджень і даних прикладу розрахунку конкретної аркової споруди з МГК планується надати основні положення

методики спрощеного розрахунку споруди з визначенням її несучої здатності як суми власної несучої здатності арки (поза ґрунтом) і додатка до неї у вигляді навантаження, яке необхідне для забезпечення рівноваги схеми арки, як системи з жорстких дисків, з'єднаних повними шарнірами, в допустимому деформованому стані (з допустимим прогином) в умовах пружного опору ґрунту деформаціям арки.

Основна частина. Методика, яка пропонується, заснована на наступних вихідних положеннях:

- розрахунок виконується в умовах плоскої задачі, тобто для арки одиначної ширини, яка «вирізана» з середньої, найбільш навантаженої частини довжини споруди;
- навантаження на арку від маси ґрунту над нею і транспортних засобів приймається вертикальним, рівномірно розподіленим вздовж її проєкції прикладається в рівні верху арки, горизонтальне навантаження розглядається як пружний опір ґрунту деформаціям арки у бік ґрунту;
- критерієм непридатності споруди для подальшої експлуатації є така зміна конфігурації арки (прогин), перевищення якого може бути пов'язаним з появою осідання ґрунту над аркою і місцевою нерівністю дорожнього покриття, величина якої не є допустимою за умовами безпеки дорожнього руху;
- несуча здатність арки визначається як сума власної (поза ґрунтом) несучої здатності арки (або тільки в пружній, або в пружно-пластичній стадії роботи) і додатка до неї у вигляді навантаження, яке необхідне для забезпечення рівноваги схеми арки, як системи з жорстких дисків, з'єднаних повними шарнірами в місцях найбільших напружень у перерізах арки від згинальних моментів в допустимому деформованому стані (з допустимим прогином) з урахуванням пружного опору ґрунту деформаціям арки у бік ґрунту;
- розрахунок зводиться до виконання умови, щоб діюче на арку вертикальне навантаження не перевищувало величину несучої здатності системи «споруда – ґрунт» при допустимому деформованому стані арки з урахуванням пружного опору ґрунту її деформаціям.

Викладені вище розрахункові положення базуються на загальноприйнятих передумовах теорії граничної рівноваги й існуючої практики розрахунків протяжних об'єктів за умовами плоскої задачі. Аналогічний підхід було використано при дослідженні гофрованих металевих водопропускних труб під дорожнім насипом, але саме труб, круглих за формою і діаметром до 2.5 м, у колишньому СРСР [2].

Методика, яка пропонується для спрощеного розрахунку аркових (напівкруглих за формою) мостових споруд, складається з наступного:

1. Враховуючи основні вихідні дані і попередньо прийняті параметри арки (висота h дорожнього насипу над спорудою, радіус r напівкруглої арки) визначають величину прогину f_{sp} арки, яка є гранично допустимою за умовами не перевищення допустимої нерівності S_{sp} дорожнього покриття при можливому осіданні ґрунтового насипу над спорудою з прогином, згідно з розрахунковою схемою, викладеною автором в роботі [6], за формулою:

$$f_{sp} = 1,15S_{sp} (0,87 + (\frac{h}{r} + 0,5)0,67). \quad (1)$$

2. Для арки прийнятого радіусу r , а також типу і розмірів гофрів (довжина хвилі, її висота і товщина металу) будують стрижневу (за МСЕ з використанням програмних комплексів, наприклад, Lira чи SCAD) розрахункову схему напівкруглої арки (наприклад з 32 прямолінійних стрижнів з жорсткістю на згин, еквівалентної жорсткості гофрованого металу одиничної ширини арки). Виконують розрахунок арки в умовах плоскої задачі на таке вертикальне рівномірно розподілене вздовж проєкції арки навантаження p (прийняте підбором), при котрому згинальні моменти у п'ятах дорівнюють, наприклад, моменту в пластичному шарнірі (таке допустимо, бо арка з двома шарнірами залишається геометрично незмінною). Якщо отримане цим розрахунком значення прогину не перевищує допустимого (за п. 1), тоді розрахунок можливо буде продовжити з прийнятими параметрами арки, а якщо ні, тоді параметри арки змінюють (підвищують товщину металу, та/або висоту хвилі гофрів), розрахунок повторюють і знаходять нове значення p (несучу здатність арки поза ґрунтом).

3. Для визначення додатка P_{zp} до повної несучої здатності арки (з урахуванням пружного опору ґрунту деформаціям арки) будують схему системи «споруда – ґрунт» у вигляді жорстких дисків, з'єднаних повними шарнірами у перерізах з найбільшими напруженнями і деформаціями – у п'ятах, у місцях, визначених центральним кутом 34 град. від рівня п'ят і у верхній частині арки (чи пів арки). Геометрична незмінність такого «механізму» забезпечена горизонтальними зв'язками – стрижнями, якими змодельоване пружний опір ґрунту деформаціям арки у бік ґрунту і які прикладені до бічних шарнірів. Звичайним підбором визначають вертикальне рівномірне розподілене вздовж проєкції шарнірного «механізму» навантаження P_{zp} , при якому буде забезпечена рівновага системи «споруда – ґрунт» (і незмінність допустимого прогину) і зусилля у стрижнях, моделюючих опор ґрунту, буде дорівнювати рівнодіючій пружного опору R , прикладеній у місцях найбільших переміщень арки у бік ґрунту і визначеної, згідно з [2], за формулою:

$$R = Ak, \quad (2)$$

де A – площа (за умовами плоскої задачі) епюри пружного опору ґрунту;

k – коефіцієнт пастелі для ґрунту з модулем деформації E і коефіцієнтом Пуассона μ за формулою Б. Г. Галеркіна [2]:

$$k = \frac{E}{(1+\mu)r}. \quad (3)$$

4. Отримані значення несучої здатності арки поза ґрунтом p і додаток P_{zp} за рахунок пружного опору ґрунту сумують і перевіряють основну розрахункову умову – щоб величина навантаження q від маси ґрунту над спорудою і від транспортних засобів, яке знаходять згідно з [1], не перевищувала повної несучої здатності арки:

$$q \leq p + P_{zp}. \quad (4)$$

Припустимо, потрібно перевірити розрахунком можливість використання мостової споруди з МГК у вигляді напівкруглої арки радіусом 3 м (малий міст) з розмірами гофрів 150×50×5 (відповідно, довжина хвилі, її висота і товщина металу, мм) при висоті дорожнього насипу над верхом споруди 6 м.

Згідно з п. 1 визначаємо гранично допустиму величину прогину $f_{\text{пр}}$ арки радіусом $r = 3$ м при допустимій величині $S_{\text{пр}} = 4$ см для автомобільної дороги другій категорії [6] при висоті насипу над спорудою 6 м за формулою (1):

$$f_{\text{пр}} = 1.15 \times 4(0.87 + ((600/300) + 0.5))0.67 = 11.71 \text{ см.}$$

Згідно з п.2 визначаємо величину p для розрахункової схеми МСЕ, складеної з 32 стрижнів з перерізом 1.0×2.882 см, еквівалентним за згинальною жорсткістю гофрованому перерізу на одиницю ширини арки (наприклад, 1 см), при котрій згинальні моменти у п'ятах арки будуть рівними моменту в пластичному шарнірі, який для такого перерізу стрижнів зі сталі з границею текучості 23.0 кН/см^2 дорівнює: $((1.0 \times 2.82^2)/4)23.0 = 2.077 \times 23.0 = 48.0 \text{ кНсм/см} = 0.48 \text{ кНм/см} = 0.048 \text{ тсм/см}$. Отримана розрахунком величина $p = 0.048 \text{ (тс/м)/см} = 0.48 \text{ (кН/м)/см}$ (рис. 1).

Згідно з п. 3 визначаємо за формулами (2) і (3) величину рівнодіючої пружного опору ґрунту R , площу A епюри (за умовами плоскої задачі) якого знаходимо із звичайних геометричних рішень (як суму площ одного трикутника і п'ятих трапецій) з використанням даних про переміщення δ вузлів 2–7 у бік ґрунту і їхні координати Z за результатами розрахунку схеми арки з 32-х стержнів за МСЕ (рис. 2).

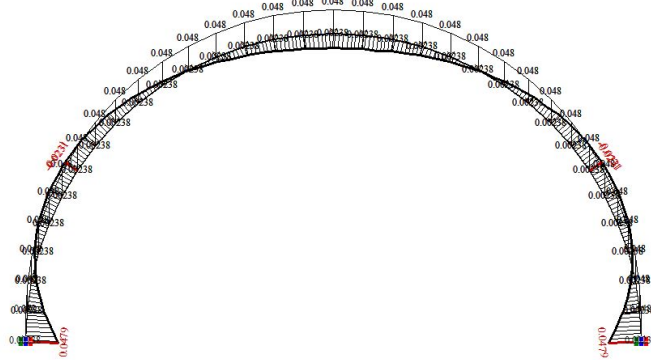


Рис. 1. Розрахункова схема за МСЕ, навантаження ($p = 0.0481 \text{ (тс/м)/см}$) від маси ґрунту насипу, транспортних засобів і від маси конструкцій 0.0024 тс/м/см та епюра моментів (максимум в п'ятах 0.048 тсм/см) при прогині $f = 6.6 \text{ см}$

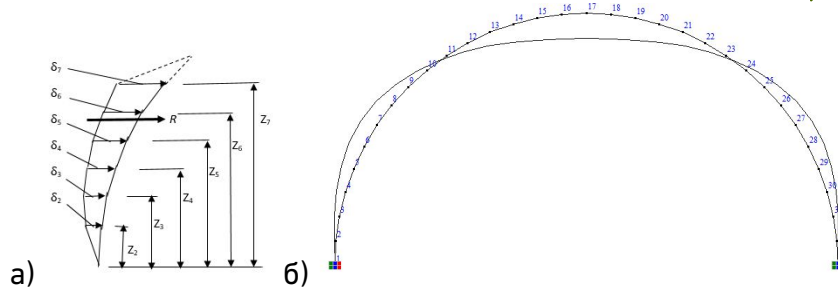


Рис. 2. Схема до визначення рівнодіючої пружного опору ґрунту R (а) для арки в допустимому деформованому стані (з прогином 6,6 см) від навантаження $p = 0.048$ (тс/м)/см = 0.48 (кН/м)/см (епюру опору показано з одного боку) і схема деформацій арки (б)

Величина A , а також k і R , при модулі деформації ґрунту насипу $E = 30$ МПа = 3000 т/м² і коефіцієнті Пуассона ґрунту $\mu = 0.25$ за формулами (2) і (3), отримані рівними:

- площа A епюри пружного опору ґрунту (сума площ одного трикутника і п'ятьох трапецій);
 $A = 0.00062 + 0.00259 + 0.00543 + 0.00806 + 0.00958 + 0.0103 = 0.0366$ м² ;
- коефіцієнт пастелі k для ґрунту насипу
 $k = 3000 / (1 + 0.25)3 = 800$ т/м³;
- рівнодіюча пружного опору ґрунту R (на ширину арки 1 см)
 $R = 0.0366 \times 800 \times 0.01 = 0.293$ тс = 2.93 кН.

З використанням схеми арки (чи половини арки) як системи з жорстких дисків, з'єднаних повними шарнірами, з прикладанням в рівні бічних шарнірів горизонтальних стрижнів, моделюючих пружний опір ґрунту з зусиллям, рівним рівнодіючою опору ґрунту R , при цьому звичайним підбором отримуємо навантаження P_{ep} (додаток до несучої здатності), при якому забезпечена рівновага шарнірної системи «споруда – ґрунт», $P_{ep} = 0.168$ тс/м = 1.68 кН/м, на ширину арки 1 см (рис. 3).

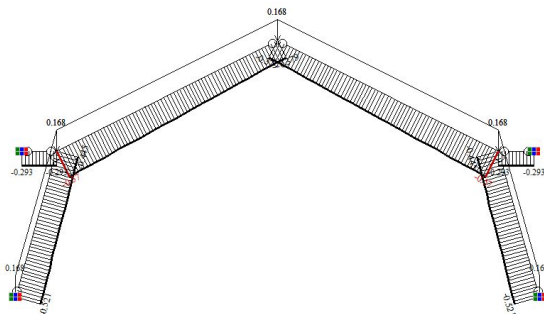


Рис. 3. Схема арки як системи з жорстких дисків, з'єднаних повними шарнірами і еюра поздовжніх сил, при навантаженні $P_{zp} = 0.168$ тс/м, прогину $f = 6,6$ см, зусилля в горизонтальних стрижнях, що моделюють опор ґрунту, дорівнює $R = 0.293$ тс = 2.93 кН (на ширину арки 1 см)

Згідно з п. 4 перевіряємо виконання основної розрахункової умови (4). При постійному навантаженні від ґрунту насипу над спорудою з питомою вагою 19 кН/м^3 висотою 6 м, з коефіцієнтом надійності 1.3 і при тимчасовому навантаженні НК 100 з коефіцієнтом надійності 1.1 величина q , визначена згідно з п. 7.2.2 документу [1], дорівнює (на ширину арки 1 см):

$$q = ((1.9 \times 6 \times 1.3 + 1.9 \times (25/1.9(3+6)))1.1)0.01 = 0.179 \text{ тс/м.}$$

Умова (4) виконується:

$$q = 0,179 < p + p_{zp} = 0.048 + 0.168 = 0.216.$$

Висновки. Показано можливість за досить простою і зрозумілою схемою визначити несучу здатність аркової мостової споруди з МГК за деформаційним критерієм і виконати розрахунок споруди з достатньою для практичних цілей точністю і у межах загальноприйнятих вихідних розрахункових передумов теорії граничної рівноваги врахувати фізичну і геометричну нелінійність системи «споруда – ґрунт» та пружний опір ґрунту насипу деформаціям арки.

Методика, яку запропоновано, може бути прийнята за основу під час розробки доповнень до відповідного нормативного документу з проектування і будівництва мостових споруд з МГК у частині спрощеного розрахунку таких споруд в формі напівкруглої арки (з елементів однакового викривлення, зручних для транспортування, складування та монтажу).

1. ВБН В.2.3-218-198:2007. Споруди транспорту. Проектування та будівництво споруд з металевих гофрованих конструкцій на автомобільних дорогах загального користування. Відомчі будівельні норми України. Київ : Укравтодор, 2007. 49 с. 2. Металлические гофрированные трубы под насыпями / Н. М. Колоколов, О. А. Янковский, К. Б. Щербина, С. Э. Черняховская. М.: Транспорт, 1973. 120 с. 3. Каретников В. Н., Клейменов В. Б., Бреднев В. А. Автоматизированный расчет и конструирование металлических крепей подготовительных выработок. М.: Недра, 1984. 312 с. 4. Handbook of Steel Drainage and Highway Construction Products. Ontario: Corrugated Steel Pipe Inst., 2002. 470 p. 5. Petterson L., Sundquist Y. Design of soil steel composite bridge. Stockholm: KTN Royal Institute of Technology, 2007. 98 p. 6. Абрамов В. М. Граничні деформації дорожніх споруд з гофрованого металу. *Вісник НУВГП. Технічні науки*: зб. наук. праць. Рівне: НУВГП, 2023. Вип. 1 (101). С. 143–149.

REFERENCES:

1. VBN V.2.3-218-198:2007. Sporudy transportu. Proiektuvannia ta budivnytstvo sporud z metalevykh hofrovanykh konstruksii na avtomobilnykh dorohakh zahalnoho korystuvannia. Vidomchi budivelni normy Ukrainy. Kyiv: Ukravtodor, 2007. 49 s. 2. Metallycheskye hofryrovannye truby pod nasypiamy / N. M. Kolokolov, O. A. Yankovskyi, K. B. Shcherbyna, S. E. Cherniakhovskaia. M.: Transport, 1973. 120 s. 3. Karetnykov V. N., Kleimenov V. B., Brednev V. A. Avtomatyzirovannyi raschet y konstruyrovanye metallycheskykh krepei podhotovytelnykh vyrabotok. M.: Nedra, 1984. 312 s. 4. Handbook of Steel Drainage and Highway Construction Products. Ontario: Corrugated Steel Pipe Inst., 2002. 470 p. 5. Petterson L., Sundquist Y. Design of soil steel composite bridge. Stockholm: KTN Royal Institute of Technology, 2007. 98 p. 6. Abramov V. M. Hranychni deformatsii dorozhnykh sporud z hofrovanoho metalu. *Visnyk NUVHP. Tekhnichni nauky*: zb. nauk. prats. Rivne: NUVHP, 2023. Vyp. 1 (101). S. 143–149.

Abramov V. M., Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor
(Donbas National Academy of Construction and Architecture,
Ivano-Frankivsk (for the period of martial law), vr09@i.ua)

ON THE CALCULATION METHODOLOGY OF ARCH BRIDGE STRUCTURES FROM CORRUGATED METAL

The question of the method of practical calculation of arched bridge structures from metal corrugated structures (MCS) on the effect of the load from the soil mass of the road embankment and the temporary moving load from vehicles is considered. On the basis of the analysis of technical literature and relevant regulatory documents, it is shown what shortcomings exist in the approaches to the design of specifically arched bridge structures from MCS, which are less common and less researched, in comparison with structures in the form of a circle. According to the results of this analysis of the state of affairs in the field of design of bridge structures from the MCS, it was established what exactly are the shortcomings of the existing normative documents in the part of calculations of specifically arched structures. On the basis of research data and an example of numerical calculations of a specific arched structure from MCS, the possibility of solving calculation issues within the generally accepted calculation prerequisites of the theory of limit equilibrium is shown. Proposals have been made to create the basis of the methodology for the simplified calculation of such structures under the conditions of a flat problem. It is shown that it can be defined as the sum of the personal bearing capacity of the arch (outside the soil) and the addition to it in the form of a load, which is necessary to ensure the balance of the arch scheme, as a system of hard disks connected by full hinges in an admissible deformed state (with permissible deflection) in the conditions of elastic resistance of the soil to the deformations of the arch. The provided proposals allow the calculation of an arched bridge structure from MCS quite simply and with sufficient accuracy for practical purposes, taking into account the elastic resistance of the soil in an admissible deformed state and taking into account the physical and geometric non-linearity of the "construction – soil" system.

Keywords: arched bridge structure; metal corrugated structures; deformations; bearing capacity.