

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

### **РОЗРАХУНКОВО-ТЕОРЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ РОБОТИ АРКОВОЇ МОСТОВОЇ СПОРУДИ З МЕТАЛЕВИХ ГОФРОВАНИХ КОНСТРУКЦІЙ**

**Розглянуто питання особливостей роботи аркової мостової споруди з гофрованого металу під навантаженням від маси ґрунту дорожнього насипу і тимчасового рухомого навантаження з урахуванням пружної і пружно-пластичної стадії. За даними розрахунково-теоретичного аналізу показано, як змінюється напружено-деформований стан аркової споруди з появою і збільшенням пластичних деформацій та з виникненням пластичних шарнірів. Показано також характер і ступінь залежності прогину арки від вертикального навантаження в умовах її роботи поза ґрунтом насипу, тобто як вільно деформованої. На конкретному чисельному прикладі доведено, за якою схемою формується граничний стан аркової споруди з міцності і несучої здатності без урахування бічного пружного опору ґрунту насипу деформаціям арки і з його урахуванням. Запропоновано основні положення методики попередніх приблизних практичних розрахунків мостової споруди у вигляді півколової арки з металевих гофрованих конструкцій на підставі деформаційного критерію оцінки несучої здатності і експлуатаційної придатності аркової мостової споруди, як системи «конструкція-ґрунт».**

**Ключові слова:** аркова споруда; металеві гофровані конструкції; пластичні деформації.

**Вступ.** Аркові мостові споруди з металевих гофрованих конструкцій (МГК) під дорожнім насипом – це достатньо поширені об'єкти транспортного будівництва у багатьох країнах світу. Таки споруди використовують переважно як шляхопроводи, мали і середні мості (із розміром отвору до 25 м і більше), а також як обробку тунелів на залізницях і автомобільних дорогах. На відміну

від значно більш звичних і поширених дорожніх металевих гофрованих споруд у формі кола чи еліпсу аркові споруди мають значно меншу висоту при однаковому розмірі отвору. Особливо ефективним у сенсі економії будівельних матеріалів і скорочення термінів робіт виглядає використання аркових мостових споруд замість традиційних балкових мостів і шляхопроводів з типових масивних конструкцій під час їх реконструкції при вичерпанні експлуатаційного ресурсу чи пошкодженні. Причому для спрощення транспортування елементів арки і їхнього монтажу аркову споруду зручно виконувати півколовою (з елементів однакової кривизни).

**Стан питання і аналіз публікацій.** Відомо зі спеціальної технічної літератури, що вперше дорожні водопропускні труби з МГК почали використовувати ще в кінці XIX століття при будівництві залізниць [1]. Тоді ж було виконано перші експериментальні дослідження і випробування та перші розробки методів розрахунку дорожніх труб з МГК. На той час і пізніше розглядалися тільки труби малого діаметру (до 1.5 м) і тільки у формі кола.

Поступово, переважно у США, Канаді та країнах Західної Європі, поширювалося використання дорожніх споруд з МГК різних форм і розмірів, у тому числі і аркових. Однак методи розрахунку переважно розроблялися саме для труб у формі кола. Споруди більш складних форм (еліптичних, аркових, коробчастих) пропонувалося розраховувати за допомогою чисельного моделювання (методом скінчених елементів, МСЕ) як систему «конструкція-грунт» [2; 3; 4].

На території колишнього СРСР використання дорожніх водопропускних труб з МГК було відновлено у 60–70-ті роки минулого століття, після тривалої перерви. Було виконано експериментальні і теоретичні дослідження з розробкою відповідних нормативних документів з проєктування і розрахунку, однак також тільки для труб у формі кола і діаметром до 2.5 м [5; 6]. Але пізніше, на початку і протягом 80-х років, було виконано теоретичні і експериментальні дослідження труб з верхньою частиною у вигляді аркового півколового склепіння з МГК і нижньою частиною у формі лотка чи окремих фундаментів з залізобетону, у тому числі і за участю автора цієї статті [7; 8].

У роботі [8] автором було запропоновано розрахункову схему і основи методики розрахунку на підставі розгляду рівноваги системи «конструкція-грунт» у допустимому деформованому стані півколової

аркової споруди з МГК з урахуванням пружного опору ґрунту насипу переміщенням стінок у бік ґрунту.

У нормативному документі України з проектування і будівництва мостових споруд з МГК і у наукових публікаціях останніх років питання розрахунку розглядаються для труб у формі кола [9; 10]. В нормах [9] рекомендовано для розрахунку споруд з МГК складної форми і з розміром отвору більш ніж 8 м використовувати МСЕ.

**Мета і завдання даної роботи.** Мета даної статті – доповнити уявлення про особливості роботи аркової мостової споруди з МГК під дорожнім насипом. На підставі розрахунково-теоретичного аналізу в даній роботі заплановано надати пропозиції щодо основних положень методики попередніх приблизних практичних розрахунків мостової споруди у вигляді півколової арки з МГК.

**Основна частина.** Розрахунково-теоретичний аналіз виконано на основі конкретного прикладу розрахунку півколової арки з МГК. Розглянуто арку з радіусом  $r = 2$  м, гофр 150x50x5 (відповідно, довжина хвилі, її висота і товщина металу, мм). За умовами плоскої задачі прийнята стрижнева розрахункова схема МСЕ (півколову арку складено з 16 стрижнів) із жорстким закладенням п'ят. Розміри прямокутного перерізу стрижнів розрахункової схеми прийнято за умов еквівалентної (до гофрованого профілю, на одиницю його довжини) згинальної жорсткості  $EJ$  (відповідно, модуль пружності сталі і момент інерції перерізу) – 10 x 28.82 (відповідно, ширина і висота прямокутного перерізу, мм). Для розрахунку арки і поза ґрунтом, і з урахуванням пружного опору ґрунту, вертикальне навантаження  $p$  на горизонтальні проекції елементів арки прийнято рівномірно розподіленим вздовж її прольоту, тобто на відстані  $2r$ . Враховувалася також власна вага конструкцій.

Величина навантаження  $p$  в цьому чисельному моделюванні зростала, доки згинальний момент в якомусь перерізі стає рівним моменту в пластичному шарнірі (рис. 1), якій визначено за формулою:

$$M_{пл} = \sigma_T W_{пл} , \quad (1)$$

де  $\sigma_T$  – межа текучості звичайної сталі, 23.0 кН/см<sup>2</sup>;

$W_{пл}$  – пластичний момент опору перерізу (1см × 2.882 см),  $1.0 \times (2.882^2)/4 = 2.077$  см<sup>3</sup>/см.

За формулою (1) отримано:

$$M_{пл} = 23.0 \times 2.077 = 47.77 \text{ кНсм/см} = 0.48 \text{ кНм/см} = 0.048 \text{ тм/см.}$$

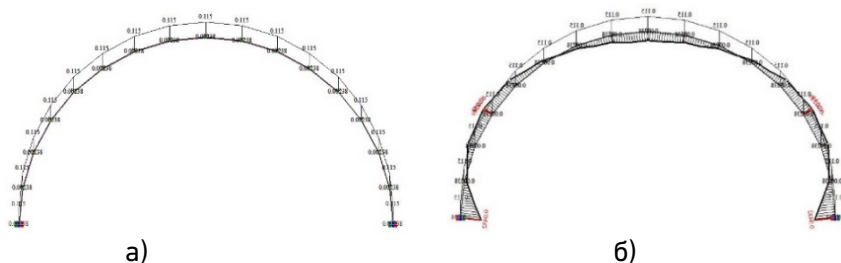


Рис. 1. Розрахункова схема арки за МСЕ (а) і епюра моментів з максимальним значенням у п'ятах,  $M = M_{пл} = 0.048 \text{ тм/см}$  при навантаженні  $p = 0.115 \text{ (т/м)/см} = 1.15 \text{ кН/м/см}$

Перші пластичні шарніри виникли в п'ятах арки при величині навантаження  $p = 0.115 \text{ (т/м)/см}$  і величині прогину  $f = 30.3 \text{ мм}$  (рис. 1). При цьому в п'ятах арки встановлювалися повні шарніри з прикладанням згинальних моментів, які дорівнюють моменту в пластичному шарнірі (рис. 2).

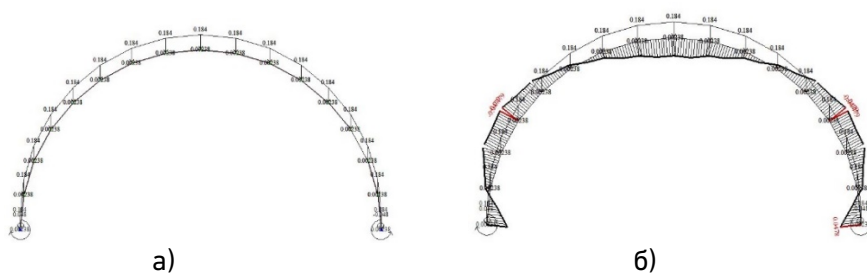


Рис. 2. Схема з пластичними шарнірами у п'ятах (а) і епюра моментів з максимальним значенням  $M = M_{пл} = 0.048 \text{ тм/см}$  в перерізах з центральним кутом 34 град від рівня п'ят, при навантаженні  $p = 0.184 \text{ (т/м)/см}$

Наступні два пластичних шарніра виникли при величині навантаження  $p = 0.184 \text{ (т/м)/см}$  і величині прогину  $f = 65.7 \text{ мм}$  у перерізах, які визначаються центральним кутом, приблизно рівним 34 град. від рівня п'ят. В цих перерізах також встановлювалися повні шарніри з прикладанням моментів, рівних моменту в пластичному шарнірі (рис. 3).

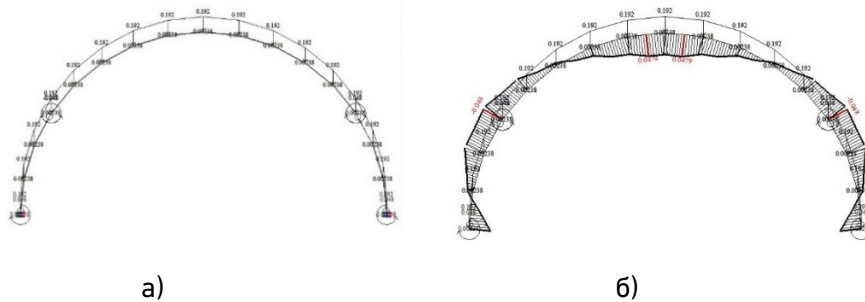


Рис. 3. Схема з пластичними шарнірами у п'ятах і у перерізах з центральним кутом 34 град. від рівня п'ят (а), та еюра моментів при  $M_{пл}$  у п'ятах та в перерізах з центральним кутом 34 град від рівня п'ят з максимальним значенням в верхньому перерізі,  
 $M = M_{пл} = 0.048$  тм/см при навантаженні  $p = 0.184$  (т/м)/см (б)

Останній п'ятий пластичний шарнір виникає в верхньому перерізі арки при величині навантаження  $p = 0.192$  (т/м)/см і величині прогину  $f = 81.3$  мм. В цьому перерізі також встановлювався повний шарнір і прикладався момент, рівний моменту в пластичному шарнірі. При цьому арка перетворюється в «механізм» з пластичними шарнірами (рис. 4, а) і для подальшого її деформування підвищення навантаження  $p$  вже не потрібно (рис. 4, б).

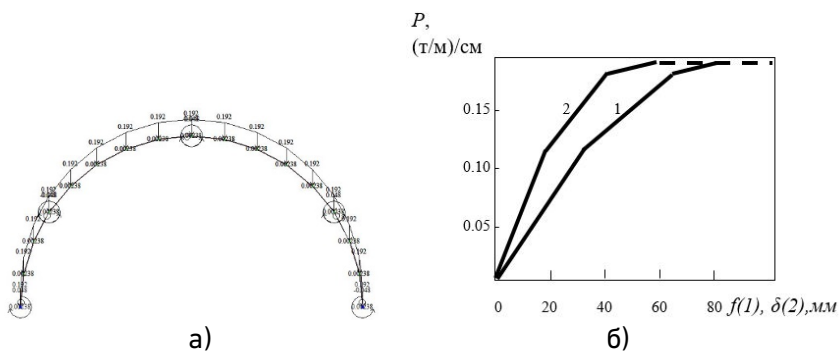


Рис. 4. Схема з пластичними шарнірами у п'ятах, у перерізах з центральним кутом 34 град. від рівня п'ят та в верхньому перерізі (а) і графіки залежності прогину  $f(1)$  і переміщень  $\delta(2)$  перерізів з центральним кутом 34 град. від рівня п'ят арки у біг ґрунту (б)

Отримані дані свідчать про те, що несуча здатність (граничне вертикальне рівномірно розподілене навантаження)  $p$  розглянутої арки поза ґрунтом складає, наприклад:

- при допущенні пластичних деформацій з появою пластичних шарнірів тільки у п'ятах арки  $p = 0.115$  (т/м)/см = 1,15 (кН/м)/см, (при цьому величина прогину  $f = 30.3$  мм);

- при повному використанні пружних і пружно-пластичних властивостей матеріалу арки  $p = 0.192$  (т/м)/см = 1,92 (кН/м)/см (при цьому величина прогину  $f = 81.3$  мм).

Для визначення додатка несучої здатності  $p_r$  арки за рахунок пружного опору ґрунту з рівнодіючою  $R$  розглянемо схему її роботи у ґрунті, як систему з жорстких дисків, з'єднаних повними шарнірами, яка знаходиться в допустимому деформованому стані, тобто з допустимою величиною прогину  $f$  (рис. 5).

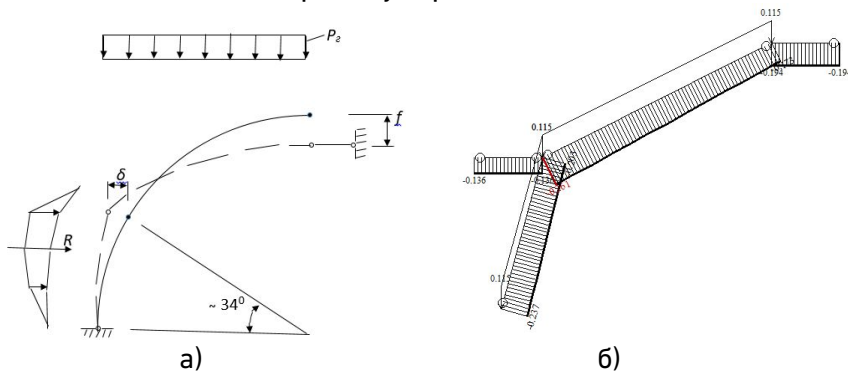


Рис. 5. Схема роботи арки (зображено половину арки) у ґрунті (а) і розрахункова схема у вигляді системи з жорстких дисків, з'єднаних повними шарнірами, зусилля  $N$  у горизонтальному стрижні (ліворуч бічного шарніру), якій моделює пружний опір ґрунту складає:

$$N = R = 0.136 \text{ т/см} = 1.36 \text{ кН/см (б)}$$

За схемою, зображеною на рис. 5, б, величину навантаження  $p_r$ , можна визначити як навантаження, при котрому схема арки (точніше половина арки) у вигляді системи з дисків і шарнірів буде в стані рівноваги (без змін прийнятого значення  $f$ ) і зусилля  $N$  у стрижні, якій моделює підтримку системи з боку ґрунту, буде дорівнювати рівнодіючому зусиллю пружного опору ґрунту  $R$  (див. рис. 5, а), яке можна приблизно прикласти горизонтально в рівні найбільшого переміщення  $\delta$  арки у біг ґрунту і яке знаходиться за формулою [5]:

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

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

$k$  – коефіцієнт пастелі за формулою Б. Г. Гальоркіна [5]:

$$k = E_r / (1 + \mu) r, \quad (3)$$

де  $E_r$  – модуль деформації ґрунту;

$\mu$  – коефіцієнт Пуассона ґрунту.

У розглянутому прикладі при:  $f = 30$  мм (при допущенні виникнення пластичних шарнірів тільки в п'ятах) і переміщеннях вузлів (2-го, 3-го і 4-го, знизу) стрижневої схеми арки у біг ґрунту, відповідно; 6.3; 15.4 і 19.1 мм, площа  $A$  епюри (див. рис. 5, а) пружного опору ґрунту (як двох трапецій і одного трикутника, без урахуванням верхньої невеликої частини) складе:  $A = 0.000113$  м<sup>2</sup>. Тоді, наприклад, при  $E = 30$  МПа = 3000 т/м<sup>2</sup> і  $\mu = 0.25$  величина  $R$  за формулами (2) і (3) складе:  $R = 0.00113 \times 3000 / 2(1 + 0.25) = 0.136$  т/см. Такому значенню  $R$  (і зусиллю  $N$  у стрижні, якій моделює пружний опір ґрунту за схемою на рис. 5, б) відповідає навантаження (отримане звичайним підбором)  $p_r = 0.115$  (т/м)/см. При цьому несуча здатність арки з урахуванням пружного опору ґрунту складе:  $p + p_r = 0.115 + 0.115 = 0.23$  (т/м)/см = 2.3 (кН/м)/см.

**Висновки.** Викладені у статті результати досліджень доповнюють уявлення про особливості роботи аркової мостової споруди з МГК під дорожнім насипом (переважно на вигін під переважаючим вертикальним тиском від маси ґрунту насипу і транспортних засобів).

Запропоновано досить просту і зрозумілу розрахункову схему і основи методики практичного розрахунку аркової мостової споруди з МГК з визначенням несучої здатності як суми значення її власної несучої здатності (поза ґрунтом) і додаткового значення за схемою у вигляді системи жорстких дисків, з'єднаних повними шарнірами, які розміщені у місцях найбільших напружень и деформацій, у допустимому деформованому стані споруди з урахуванням опору ґрунту її деформаціям.

1. Герцог А. А. Гофрированные трубы на автомобильных дорогах. Москва : Гушосдор, 1939. 112 с.
2. Handbook of Steel Drainage and Highway Construction Products. Ontario: Corrugated Steel Pipe Inst., 2002. 470 p.
3. Petterson L., Sundquist Y. Design of soil steel composite bridge. Stockholm :

KTN Royal Institute of Technology, 2007. 98 p. **4.** Bulson P. S. Buried Structures: Static and Dynamic Strenght. London : New York, Chapman and Holl, 1985. 240 p. **5.** Металлические гофрированные трубы под насыпями / Н. М. Колоколов, О. А. Янковский, К. Б. Щербина, С. Э. Черняховская. М. : Транспорт, 1973. 120 с. **6.** ВСН 176-78. Инструкция по проектированию и постройке металлических гофрированных водопропускных труб : утв. Минтрансстроем СССР и МПС СССР от 15 авг. 1978 г. М. : Оргтрансстрой, 1979. 131 с. **7.** Абрамов В. М. Металлические гофрированные своды под грунтовой засыпкой : автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Л. : ЛИИЖТ, 1989. 20 с. **8.** Абрамов В. М. Спосіб розрахунку ґрунто-сталевих аркових гофрованих мостів за деформаційним критерієм з урахуванням нелінійної роботи. *Автошляховик України*. 2012. № 3 (227). С. 45–48. **9.** ВБН В.2.3-218-198:2007. Споруди транспорту. Проектування та будівництво споруд з листових гофрованих конструкцій на автомобільних дорогах загального користування. Відомчі будівельні норми України. Київ : Укравтодор, 2007. 49 с. **10.** Лучко Й. Й., Ковальчук В. В. Методи оцінювання несучої здатності металевих гофрованих конструкцій. *Вісник ТНТУ. Механіка та матеріалознавство*. Тернопіль : ТНТУ, 2016. № 3. Том 83. С. 79–90.

## REFERENCES:

**1.** Hertsoh A. A. Hofryrovannye truby na avtomobylnykh dorohakh. Moskva : Hushosdor, 1939. 112 s. **2.** Handbook of Steel Drainage and Highway Construction Products. Ontario: Corrugated Steel Pipe Inst., 2002. 470 p. **3.** Petterson L., Sundquist Y. Design of soil steel composite bridge. Stockholm : KTN Royal Institute of Technology, 2007. 98 p. **4.** Bulson P. S. Buried Structures: Static and Dynamic Strenght. London : New York, Chapman and Holl, 1985. 240 p. **5.** Metallicheskiye hofryrovannye truby pod nasypiamy / N. M. Kolokolov, O. A. Yankovskyi, K. B. Shcherbyna, S. Ye. Cherniakhovskaia. M. : Transport, 1973. 120 s. **6.** VSN 176-78. Ynstruktsyia po proektyrovaniiu y postroiike metallicheskih hofrirovannykh vodopropuskykh trub : utv. Myntransstroem CCSR y MPS SSSR ot 15 avh. 1978 h. M. : Orhtransstroei, 1979. 131 s. **7.** Abramov V. M. Metallicheskie hofrirovannye svody pod hruntovoi zasypkoi : avtoref. dyss. ... kand. tekhn. nauk. L. : LYYZhT, 1989. 20 s. **8.** Abramov V. M. Sposib rozrakhunku grunto-stalevykh arkovykh hofrovanykh mostiv za deformatsiinym kriteriiem z urakhuvanniam nelineinoi roboty. *Avtoshliakhovyk Ukrainy*. 2012. № 3 (227). S. 45–48. **9.** VBN V.2.3-218-198:2007. Sporudy transportu. Proiektuvannia ta budivnytstvo sporud z lystovykh hofrovanykh konstruksii na avtomobilnykh dorohakh zahalnoho korystuvannia. Vidomchi budivelni normy Ukrainy. Kyiv : Ukravtodor, 2007. 49 s. **10.** Luchko Y. Y., Kovalchuk V. V. Metody otsiniuvannia nesuchoi zdatnosti metal Levykh hofrovanykh konstruksii. *Visnyk TNTU. Mekhanika ta*



**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)

### **CALCULATION AND THEORETICAL ANALYSIS OF THE WORK OF ARCHED BRIDGE STRUCTURE FROM METAL CORRUGATED STRUCTURES**

The question of the peculiarities of the operation of an arched bridge structure made of corrugated metal under the load from the soil mass of the road embankment and temporary moving load, taking into account the elastic and elastic-plastic stage, is considered. According to the calculation and theoretical analysis, it is shown how the stress-deformed state of the arch structure changes with the appearance and increase of plastic deformations and with the appearance of plastic hinges. The nature and degree of dependence of the arch deflection on the vertical load in the conditions of its operation outside the soil of the embankment, i.e. as freely deformed, is also shown. Using a specific numerical example, it is proved that the limit state of an arch structure is formed based on its strength and bearing capacity without taking into account the lateral elastic resistance of the embankment soil to the deformations of the arch and taking it into account. The main provisions of the methodology of preliminary approximate practical calculations of a bridge structure in the form of a semicircular arch made of metal corrugated structures are proposed on the basis of the deformation criterion for assessing the bearing capacity and serviceability of an arched bridge structure as a "structure-soil" system.

**Keywords:** arch structure; metal corrugated structures; plastic deformations.