

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 625.712.35:624.195.04:[625.11.015]

В. В. КОВАЛЬЧУК

Кафедра «Рухомий склад і колія», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Львівська філія, вул. І. Блажкевич, Львів, Україна, 79052, тел. +38 (097) 223 72 43, ел. пошта kovalchuk.diit@gmail.com, ORCID 0000-0003-4350-1756

ОЦІНКА НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ ТУНЕЛЬНОГО ШЛЯХОПРОВОДУ ІЗ МЕТАЛЕВИХ ГОФРОВаних КОНСТРУКЦІЙ ПРИ ДІЇ ДИНАМІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

Мета. Метою роботи є визначення несучої здатності металевих гофрованих конструкцій тунельного шляхопроводу великого поперечного перерізу при дії динамічних навантажень від залізничного транспорту. Такі дослідження необхідні для обґрунтування можливості застосування металевих гофрованих конструкцій у тілі насипу залізничної колії. **Методика.** Визначення несучої здатності тунельного шляхопроводу проведено за допомогою удосконаленої аналітичної методики оцінки несучої здатності металевих гофрованих конструкцій великого поперечного перерізу (більше 6,0 м). **Результати.** Результати багатоваріантних розрахунків металевих гофрованих конструкцій тунельного шляхопроводу показали, що максимальні значення напружень у конструкції виникають при проїзді ділянкою залізничної колії локомотива 2М62 і вони становлять 145,45 МПа, а коефіцієнт величини пластичного шарніру становить 0,41. Проведені динамічні випробування металевих гофрованих конструкцій шляхопроводу від дії рухомого складу залізниці показують, що метал гофрованої конструкції працює у пружній стадії та має 60 % запас несучої здатності. **Наукова новизна.** Вперше проведено оцінювання несучої здатності тунельного шляхопроводу із металевих гофрованих конструкцій великого поперечного перерізу при взаємодії з ґрунтовою засипкою та із врахуванням її ступеня ущільнення і величини динамічного навантаження від рухомого складу залізниці. **Практична значимість.** Отримані результати напружено-деформованого стану тунельного шляхопроводу можуть бути корисними для проектних організацій, які займаються розрахунками подібних конструкцій, що експлуатуються у тілі насипу залізничної колії. Споруди із металевих гофрованих конструкцій можуть використовуватися у залізничному будівництві у вигляді малих мостів, водопропускних труб та шляхопроводів, поперечним перерізом до 14,0 м.

Ключові слова: тунельний шляхопровід; металева гофрована конструкція; динамічне навантаження; вертикальні сили тиску; напруження; коефіцієнт пластичного шарніру

Вступ

Транспортні споруди із металевих гофрованих конструкцій (далі МГК) є перспективними для застосування не тільки на автомобільних дорогах України, а також і на залізничних коліях. Враховуючи часті повені у весняну та

осінню пори року, які спричиняють руйнування мостів та підмивання насипів залізничних колій (рис. 1, а, б), одним із напрямів заміни пошкоджених малих мостів та водопропускних труб є будівництво транспортних споруд із металевих гофрованих конструкцій.



Рис. 1. Пошкодження транспортних споруд на залізницях України в умовах експлуатації:
а – руйнування кам'яного аркового моста; б – розмив насипу залізничної колії під час паводку

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

На ділянці Вадул-Сирет – Держжордон, яка з'єднує Україну з Румунією, під час літніх паводків був зруйнований кам'яний арковий міст. Відновлення ділянки міжнародного значення потрібно було виконати негайно, і тільки завдяки застосуванню труби із МГК діаметром понад шість метрів дозволило її відновити в стислі терміни і зекономити до 7 млн. грн. (Ковальчук, 2015) тільки на будівництві, не враховуючи коштів, які залізниця понесла б у випадку тривалого перекриття руху залізничного транспорту.

Споруди із МГК є ефективними при реконструкції транспортних об'єктів, таких як малі мости і водопропускні труби та є альтернативою малим мостам та шляхопроводам.

Проте, досвід експлуатації МГК на 310 км дільниці Вадул-Сирет – Держжордон Регіональної філії «Львівська залізниця» засвідчив, що після спорудження труби із МГК, горизонтальним діаметром 6,57 м та вертикальним 6,2 м, відбулося просідання залізничної колії над трубою і почалися деформації вертикального та горизонтального діаметрів труби. Залишкова вертикальна деформація труби за пів року експлуатації досягла 3,09 %, а горизонтальна – 1,67 %.

Однією із проблем дефектності споруд із МГК в експлуатації є відсутність достовірних методів оцінки несучої здатності металевих гофрованих конструкцій великих поперечних перерізів, які зазнають динамічних навантажень від рухомого складу залізниці, що спричиняє допущення помилок при проектуванні даних конструкцій.

Зазначена проблема і вимагає розробки нових методів оцінювання та підвищення несучої здатності транспортних споруд із МГК з метою оцінки можливості їх застосування на залізничній колії при дії динамічних навантажень від рухомого складу залізниці. Цьому питанню і присвячено дане наукове дослідження.

Мета

Метою роботи є визначення несучої здатності тунельного шляхопроводу із металевих гофрованих конструкцій великого поперечного перерізу при дії динамічних навантажень рухомого складу залізниці.

Методика

Металеві гофровані конструкції застосовуються для будівництва водопропускних та ін-

ших підземних споруд з кінця XIX століття (Гнедовский, 1938; Жинкин, 2011; Ковальчук, 2015; Luchko, & Kovalchuk, 2016; Kovalchuk, Markul, Pentsak, Parneta, Gajda, & Braichenko, 2017; Kovalchuk, V., Kovalchuk, Yu., Sysyn, Stankevych, & Petrenko, 2018). На даний час накопичений великий досвід експлуатації металевих гофрованих конструкцій, які знаходяться у тілі насипу автомобільних доріг і практично відсутній досвід експлуатації їх у тілі насипу залізничної колії.

При проектуванні МГК інженери зіткнулися з низкою проблем. Так порівнюючи закордонні (Брик, Пенашев, & Болотовский, 1980; AASHTO, 2001; СНВDC, 2002; Handbook of steel drainage and highway construction products, 2002; ОДМ 218.2.001-2009, 2009) та вітчизняні (Посібник до ВБН В.2.3-218-198:2007, 2007) норми проектування були виявлені суттєві відмінності в граничних висотах насипу над МГК при однаковій товщині стінки гофри. Як виявилось, конструкції іноземних проєктів витримують вагу набагато вищих насипів. На початковому етапі припустили, що різниця у несучій здатності МГК зумовлена розходженням фізико-механічних властивостей металу конструкцій. Проте вивчення іноземних норм показало, що марки вітчизняних сталей, які використовуються при будівництві МГК, є міцнішими, аніж за кордоном. Реальна ж причина була у принципових розходженнях норм у частині розрахунку МГК. В Україні розрахунок МГК поперечним перерізом до 3 метрів виконується згідно норм (Посібник до ВБН В.2.3-218-198:2007, 2007). Відповідно яких граничний стан МГК визначається граничною статичною рівновагою взаємодії системи «конструкція-грунт» і, виходячи з якого, можна знайти несучу здатність конструкції. Рекомендована формула містить ряд емпіричних коефіцієнтів та не включає безпосередніх міцнісних характеристик металу конструкції та параметрів ґрунтової засипки.

За кордоном (Брик, Пенашев, & Болотовский, 1980; AASHTO, 2001; СНВDC, 2002; Handbook of steel drainage and highway construction products, 2002; ОДМ 218.2.001-2009, 2009) оцінюють міцність та стійкість стінки гофри конструкції при впливі на склепіння конструкції ваги стовпа ґрунту та тиску від тимчасового навантаження на рівні верху конструкції.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Спільна робота МГК з ґрунтом при достатній висоті засипки над склепінням враховується шляхом уведення знижуючого коефіцієнту до суми тимчасового та постійного навантажень, який залежить від ступеня ущільнення ґрунтової призми навколо споруди. Подібна перевірка міцності та стійкості стінки конструкцій входить у норми (ОДМ 218.2.001-2009, 2009), однак майже ніколи не буває граничною.

По різному визначається і тиск від тимчасового навантаження. При однаковій висоті засипки над конструкцією частка тимчасового навантаження у сумарному тиску на склепіння конструкції, як правило, за українськими нормами (Посібник до ВБН В.2.3-218-198:2007, 2007) буде більшою, хоча в іноземних нормах (AASHTO, 2001; СНВДС, 2002; Handbook of steel drainage and highway construction products, 2002; ОДМ 218.2.001-2009, 2009) враховують динамічні навантаження, а при мінімальних засипках інтенсивність іноземного нормативно-

го навантаження є більшою, ніж аналогічного вітчизняного.

Слід зазначити, що на сьогоднішній день в Україні взагалі відсутні норми проектування та методи розрахунку металевих гофрованих конструкцій, які експлуатуються у тілі насипу залізничної колії. Таким чином, ідеальним рішенням для стимулювання будівництва металевих гофрованих конструкцій на залізницях України було б створення рекомендацій із проектування та оцінки несучої здатності металевих гофрованих конструкцій, які зазнають навантажень від рухомого складу залізниці.

Результати

На сьогоднішній день на залізницях України експлуатується труба із металевих гофрованих конструкцій на 310 км ділянки Вадул-Сирет – Держкордон Львівської залізниці (рис. 2, а) та тунельний шляхопровід із МГК у м. Кропивницькому (рис. 2, б).



Рис. 2. Транспортні споруди із металевих гофрованих конструкцій на залізницях України:
а – металева гофрована труба на ділянці Вадул-Сирет – Держкордон Львівської залізниці
та б – тунельний шляхопровід у м. Кропивницькому

Поперечні перерізи зазначених споруд є більшими за 6 м, а в Україні взагалі відсутні норми їх проектування під залізничною колією. Тому наведемо методику оцінки несучої здатності таких споруд.

Розрахунок вертикального тиску на вершину металевої гофрованої конструкції шляхопроводу у залежності від швидкості руху транспортних одиниць. При визначенні несучої здатності МГК за основу прийнято конструкцію, яка експлуатується під залізничною колією і пропускає автомобільний транспорт по вул. Миколи Левитського (Колгоспний) (Новина від 30 січня 2018 року) у м. Кропивницькому (рис. 2, б).

Вихідні дані, які були прийняті для розрахунку еквівалентних сил від дії рухомих транспортних одиниць, наведено в таблиці 1. Геометричні та фізико-механічні параметри металевої гофрованої конструкції та ґрунтової засипки прийнято згідно з джерелом (Звіт з обстеження та випробування тунелю №1838-ЗВ-3, 2019), а саме: поперечний переріз – еліпс із шириною конструкції – 9,23 м та висотою конструкції – 8,12 м; висота ґрунтової засипки – 2,57 м; матеріал засипки гофрованої конструкції – щебено-піщана суміш фракцій 0,01...40 мм. Основними факторами впливу на несучу здатність металевих гофрованих конструкцій шляхопроводу є нерівність геометрії колії над шляхопро-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

водом та ступень ущільнення ґрунтової засипки (Даніленко, & Рибкін, 2006).

Нерівність геометрії колії розглядається у вигляді задання нерівності, яка утворюється

при перекочуванні колеса рухомого складу залізничного транспорту через рейковий стик, зазор у якому становив 26 мм (Звіт з обстеження та випробування тунелю №1838-ЗВ-3, 2019).

Таблиця 1

Вихідні дані для розрахунку еквівалентних сил

№ з/п	Вид вихідних даних	Розмірність	Значення
1	Рухомий склад	–	ЧМЭ 3, 2М62, вантажного вагона із візками типу 4ЦНИИ-Х3-0, пасажирського вагона із візками типу КВ3-ЦНИИ
2	Швидкість	км/год	40, 80, 100
3	Тип рейок	–	Р65
4	Тип шпал	–	залізобетонні
5	Рід баластної подушки	–	щебенево-піщана
6	Висота ґрунтової засипки	м	2,57
7	Модуль пружності підрейкової основи	МПа	73,6
8	Відстань між осями шпал	м	0,5
9	α_0	–	0,403
10	γ	–	1
11	α_1	–	0,931
12	ϵ	–	0,332
13	β	–	0,87
14	Момент інерції рейки відносно горизонтальної осі	см ⁴	3548
15	Момент опору рейки відносно горизонтальної осі	см ³	436
16	Опорна площа підкладки	см ²	262,5
17	Довжина шпали	см	270
18	Ширина нижньої постелі шпали	см	27,5

Визначення еквівалентних лінійних навантажень на металеву гофровану конструкцію. Наведемо методику розрахунку еквівалентних сил, які діють на шпали залізничної колії у місці експлуатації металевої гофрованої конструкції у залежності від параметрів геометричної нерівності колії, що утворюється від процесів осідання щебенево-піщаного шару.

Згідно з роботою (Даніленко, & Рибкін, 2006), у розрахунковому перерізі рейки, тобто в перерізі, де визначаються навантаження, діє максимальне ймовірне динамічне колісне нава-

нтаження $P_{розр} = P_{дин}^{max}$, а вплив сусідніх і далі розташованих коліс приймається у вигляді середнього динамічного тиску $\bar{P}_{дин}$. Враховуючи те, що максимум динамічного тиску розрахункового колеса не співпадає з максимумом тиску сусідніх коліс (рис. 3), у практичних розрахунках враховується дія двох сусідніх коліс, розташованих по обидва боки від розрахункового, оскільки далі розташовані колеса практично здійснюють незначний вплив на навантаження (Даніленко, & Рибкін, 2006).

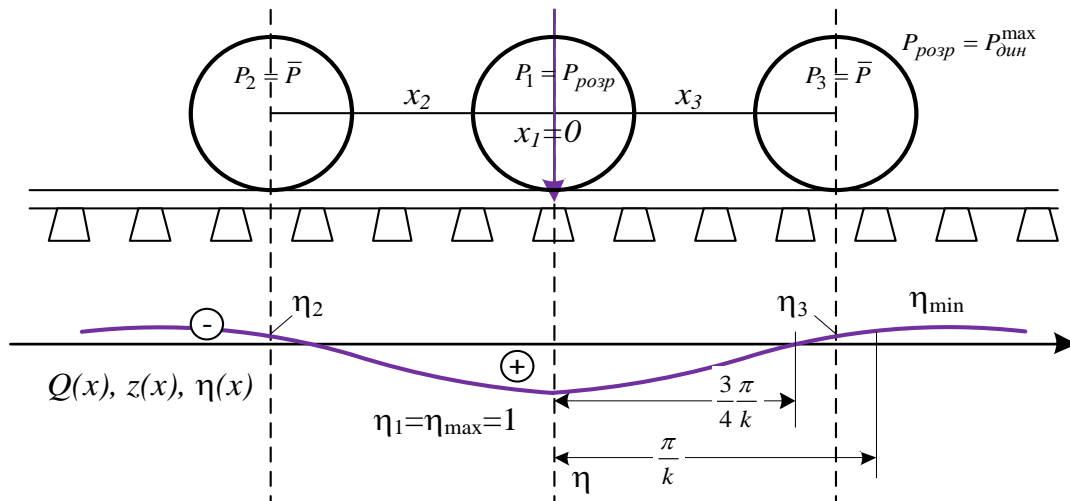


Рис. 3. Лінії впливу прогинів від дії одиночного колісного навантаження $P_1=1$, прикладеного в розрахунковому перерізі при завантаженні лінії впливу тривісним візком (Даніленко, & Рибкін, 2006)

Вплив на рейкову нитку всіх інших коліс поїзда враховується за допомогою завантаження лінії впливу поперечних сил Q (від дії одиночного колісного навантаження $P=1$) системою колісних навантажень $\bar{P}_{дин}$ і визначенням еквівалентних навантажень $P_{екв}^{II}$ за допомогою функції η_s , яка визначає ступінь впливу на розрахунковий переріз кожного з інших коліс поїзда (рис. 3).

Розрахунок еквівалентних динамічних навантажень проводиться згідно з роботою (Даніленко, & Рибкін, 2006) за формулою:

$$P_{екв}^{II} = P_{дин}^{max} + \sum \bar{P}_i \cdot \eta_i. \quad (1)$$

Функція η_i знаходиться у залежності від величини kx_i , де x_i – відповідає відстаням від розрахункового перерізу до кожного колеса, яке враховується:

$$\eta_i = e^{-kx} (\cos kx_1 + \sin kx_1). \quad (2)$$

Сусідні колеса можуть здійснювати як позитивний, так і негативний вплив (внаслідок зміни знаку функції η по довжині балки), тобто вони можуть довантажувати або розвантажувати розрахунковий переріз (Даніленко, & Рибкін, 2006). Сили тиску рейки на розрахункову і сусідні шпали визначаються за формулами:

$$Q_{p1} = \frac{kl_w}{2} \cdot P_{екв(розр)}^{II} = \frac{kl_w}{2} (P_{розр1} + \sum \bar{P} \cdot \eta_{2,3}), \quad (3)$$

$$Q_{c2} = \frac{kl_w}{2} \cdot P_{екв(c2)}^{II} = \frac{kl_w}{2} (P_{розр} \eta_{p2} + \sum \bar{P} \eta_{c2}), \quad (4)$$

$$Q_{c3} = \frac{kl_w}{2} \cdot P_{екв(c3)}^{II} = \frac{kl_w}{2} (P_{розр} \eta_{p3} + \sum \bar{P} \eta_{c3}). \quad (5)$$

При розрахунку сил тиску на шпали Q_{p1} , Q_{c2} і Q_{c3} ординати η_i ліній впливу поперечних сил знаходяться залежно від відстаней до шпал, що розглядаються (для яких визначається тиск Q) до врахування коліс (розрахункового або сусідніх з ним). Так ординати ліній впливу $\eta_{2,3}$ враховують вплив сусідніх коліс на розрахункову шпалу і відповідають відстаням від осі розрахункової шпали до сусідніх коліс (ліворуч і праворуч), тобто для відстаней X_2 і X_3 (рис. 4).

Ординати η_{p2} і η_{p3} враховують вплив навантажень від розрахункового колеса на сусідні шпали і визначаються для відстані розташування розрахункового навантаження від розглядуваної суміжної з розрахунковою шпали (ліворуч або праворуч від неї), тобто для відстані $l_w = \text{const}$; $\eta_{p2} = \eta_{p3}$.

Ординати ліній впливу η_{c2} і η_{c3} враховують вплив сусідніх осей екіпажу на навантаження шпал, сусідніх з розрахунковою, тобто відповідають відстаням розташування відповідно: для η_{c2} – відстаням $X_2 - l_w$ і $X_3 + l_w$; для η_{c3} – відстаням $X_3 - l_w$ і $X_2 + l_w$.

Шляхом суперпозиції нормальних напружень у ґрунтовій засипці над поверхнею металевих гофрованих конструкцій враховується сумарний вплив кожної шпали у вигляді прямокутного навантаження із координатами відносно осі споруди із МГК.

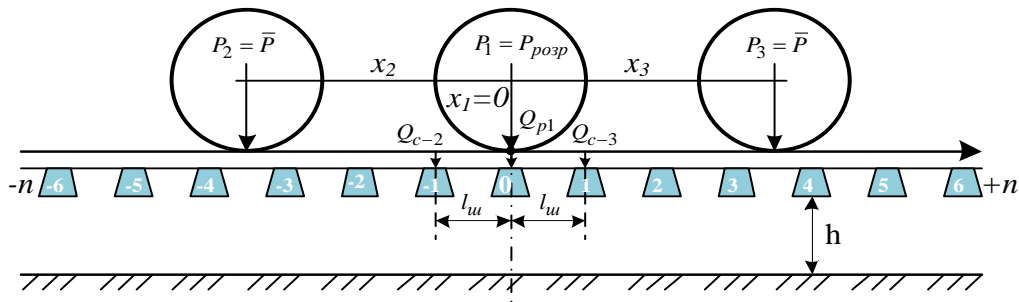


Рис. 4. Розрахункова схема до визначення сил тиску на шпали від поїзного навантаження (Даніленко, & Рибкін, 2006)

Розрахункова схема розташування навантажень від шпал на щебенево-піщаний баластний шар наведена на рис. 5. Осі Y відповідає вісь колії, а осі споруди із МГК – вісь X .

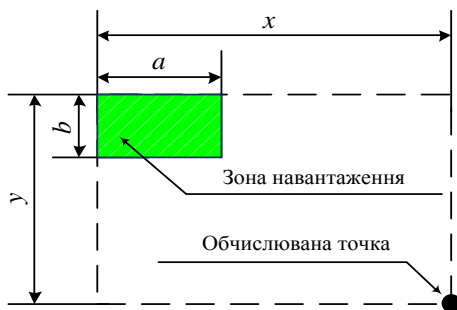


Рис. 5. Схема передачі навантажень на ґрунтову засіпку при прямокутній формі передачі навантажень (Pettersson, Leander, & Hansing, 2002; Pettersson, & Sundquist, 2007)

Далі для розрахунку вертикального тиску від прямокутного навантаження, що відповідає одній шпалі за співвідношеннями Буссінеска (Pettersson, Leander, & Hansing, 2002; Pettersson, & Sundquist, 2007; Kovalchuk, Markul, Pentsak, Parneta, Gajda, & Braichenko, 2017), визначаємо стискуючі напруження для кутових точок за формулою:

$$\sigma_{zc} = \frac{p}{2\pi} \left[\frac{lbz}{D} \cdot \frac{l^2 + b^2 + 2z^2}{D^2 z^2 + l^2 b^2} + \arcsin \left(\frac{lb}{\sqrt{r^2 + z^2} \sqrt{b^2 + z^2}} \right) \right], \quad (6)$$

де p – інтенсивність рівномірного розподіленого навантаження;

l, b – відповідно довжина і ширина ділянки.

Величина r розраховується за формулою:

$$(D/2)^2 = r^2 = l^2 + b^2 + z^2. \quad (7)$$

Аналогічно визначаємо напруження σ_{z0} під центром завантаженого прямокутника. Згідно з

працями (Pettersson, Leander, & Hansing, 2002; Pettersson, & Sundquist, 2007), фактичне навантаження від рухомого складу перетворюється за допомогою формул розподілу напружень у півпросторі Буссінеска в еквівалентне лінійне навантаження, що дає те ж вертикальне напруження на рівні верху металеві гофрованої конструкції. Вертикальні напруження σ_v на глибині z пружного тіла (вертикально під навантаженням), спричинені лінійним навантаженням p на півпросторі, визначаються за формулою:

$$\sigma_v = \frac{2 \cdot p}{\pi \cdot z}. \quad (8)$$

Для точкового навантаження це співвідношення має вигляд:

$$\sigma_v = \frac{3 \cdot P \cdot h_c^3}{2\pi \cdot s^5}, \quad (9)$$

де s – довжина похилої, відстань між точкою навантаження та розрахунковою точкою;

P – значення точкового навантаження від рухомих транспортних засобів.

Після визначення напружень за формулами (8) і (9) визначаємо еквівалентне лінійне навантаження на вершину металеві гофрованої конструкції за формулою:

$$P_{tr} = \frac{\pi(h_s + h_b)}{2} \sigma_v. \quad (10)$$

Еквівалентне навантаження, визначене за формулою (10), відповідає найбільшому вертикальному навантаженню, яке припадає на вершину металевих гофрованих конструкцій від дії транспортних засобів (Pettersson, Leander, & Hansing, 2002; Pettersson, & Sundquist, 2007).

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Результати розрахунку вертикального тиску на вершину металевих гофрованих конструкцій шляхопроводу від локомотивів: ЧМЭ 3, 2М62, вантажного вагона із візками типу 4ЦННІІ-Х3-0

та пасажирського вагона із візками типу КВЗ-ЦННІІ, при швидкості руху рухомого складу 40 км/год наведені на рис. 6 та рис. 7.

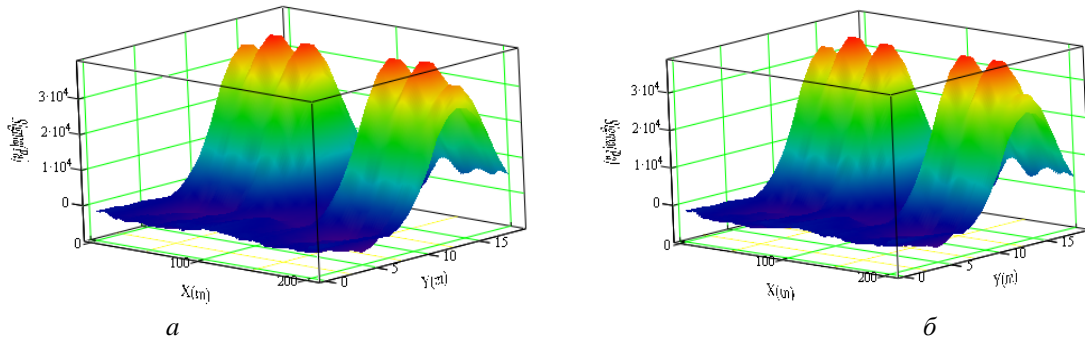


Рис. 6. Розподіл вертикального тиску на вершину металеві гофрованої конструкції від локомотиву ЧМЭ 3 (а) та від локомотиву 2М62 (б) при швидкості руху 40 км/год

Величина вертикального тиску на вершину шляхопроводу при швидкості руху рухомого складу залізниці 40 км/год від локомотиву ЧМЭ 3 становить 39,31 кПа, від локомотиву

2М62 – 37,55 кПа, від вантажного вагона із візками типу 4ЦННІІ-Х3-0 – 40,96 кПа та від пасажирського вагона із візками типу КВЗ-ЦННІІ – 34,48 кПа.

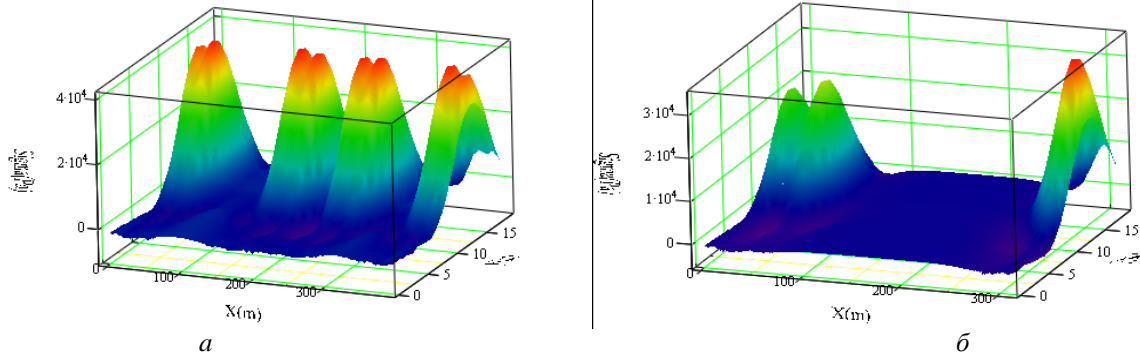


Рис. 7. Розподіл вертикального тиску на вершину металеві гофрованої конструкції від вантажного вагона із візками типу 4ЦННІІ-Х3-0 (а) та від пасажирського вагона із візками типу КВЗ-ЦННІІ (б) при швидкості руху 40 км/год

Результати розрахунку вертикального тиску на вершину шляхопроводу від локомотивів: ЧМЭ 3, 2М62, від вантажного вагона із візками типу 4ЦННІІ-Х3-0 та від пасажирського вагона

із візками типу КВЗ-ЦННІІ, при швидкості руху рухомого складу залізниці 80 км/год наведені на рис. 8 та рис. 9.

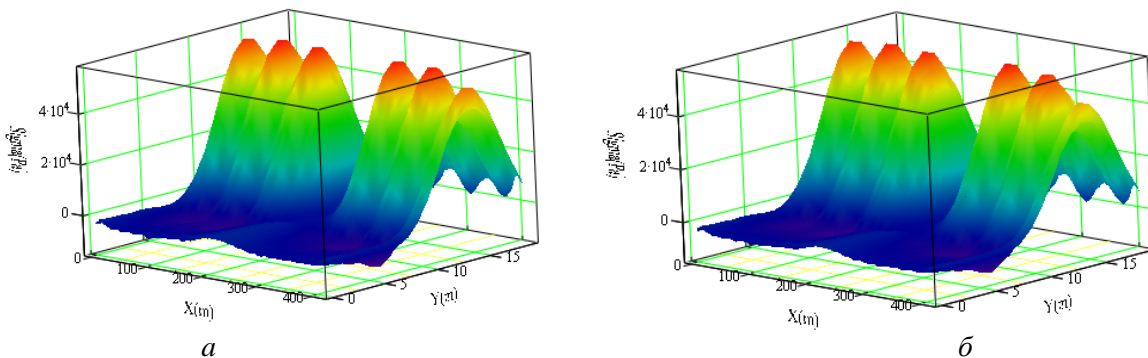


Рис. 8. Розподіл вертикального тиску на вершину металеві гофрованої конструкції від локомотиву ЧМЭ 3 (а) та від локомотиву 2М62 (б) при швидкості руху 80 км/год

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Величина вертикального тиску на вершину МГК шляхопроводу при швидкості руху рухомого складу залізниці 80 км/год від локомотиву ЧМЭ 3 становить 56,65 кПа, від локомотиву

2М62 – 55,53 кПа, від вантажного вагона із візками типу 4ЦНИИ-Х3-0 – 52,47 кПа та від пасажирського вагона із візками типу КВ3-ЦНИИ – 35,23 кПа.

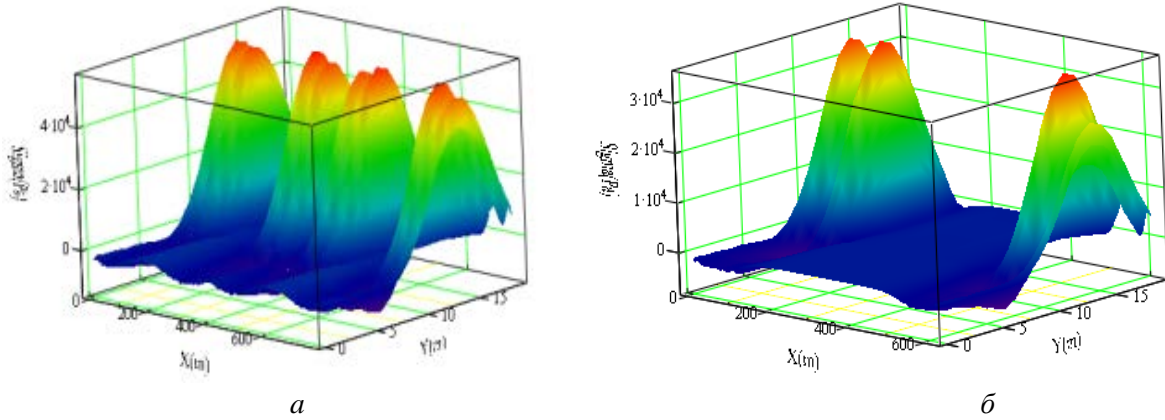


Рис. 9. Розподіл вертикального тиску на вершину металевої гофрованої конструкції від вантажного вагона із візками типу 4ЦНИИ-Х3-0 (а) та від пасажирського вагона із візками типу КВ3-ЦНИИ (б) при швидкості руху 80 км/год

Результати розрахунку вертикального тиску на вершину МГК шляхопроводу від локомотиву 2М62, від вантажного вагона із візками типу 4ЦНИИ-Х3-0 та від пасажирського вагона із

візками типу КВ3-ЦНИИ, при швидкості руху рухомого складу залізниць 100 км/год наведені на рис. 10.

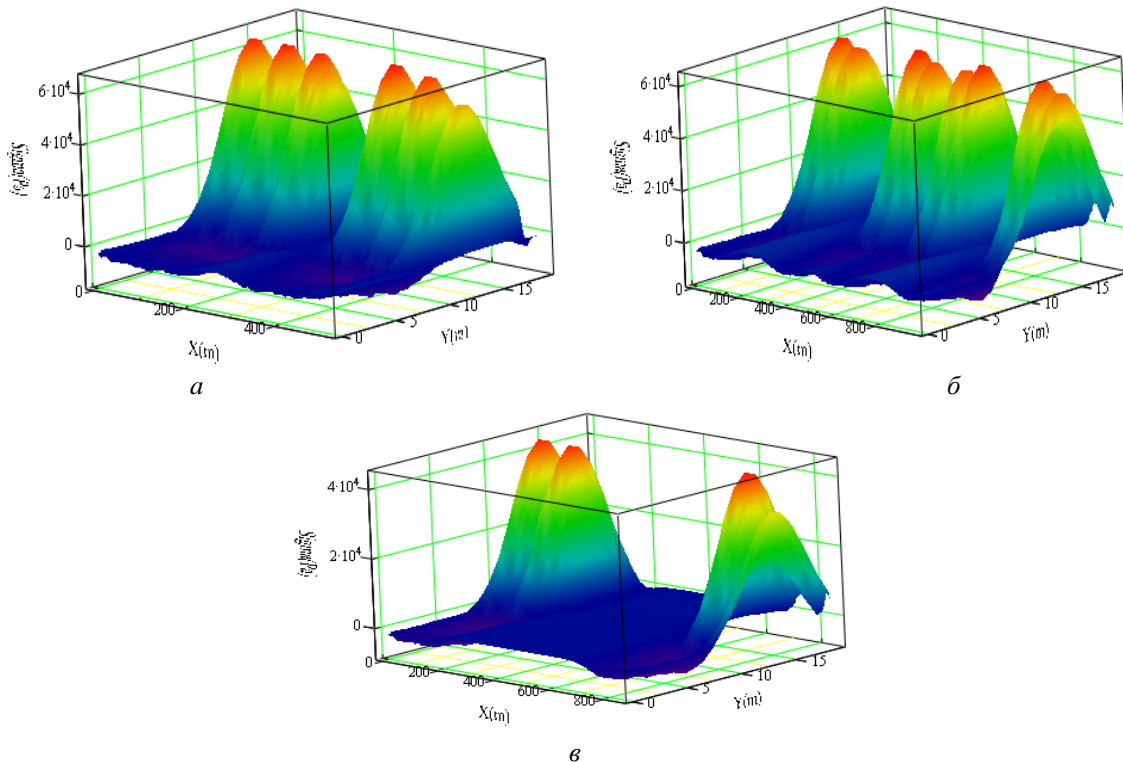


Рис. 10. Розподіл вертикального тиску на вершину металевої гофрованої конструкції від локомотиву 2М62 (а), вантажного вагона із візками типу 4ЦНИИ-Х3-0 (б) та пасажирського вагону із візками типу КВ3-ЦНИИ (в) при швидкості руху 100 км/год

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Величина вертикального тиску на вершину МГК шляхопроводу при швидкості руху рухомого складу залізниць 100 км/год від локомотиву 2М62 становить 65,56 кПа, від вантажного вагона із візками типу 4ЦНИИ-Х3-0 – 63,31 кПа та від пасажирського вагона із візками типу КВ3-ЦНИИ – 43,96 кПа.

Далі виконуємо багатоваріантний розрахунок перевірки металевих гофрованих конструкцій шляхопроводу на допустимі напруження та величини коефіцієнту пластичного шарніру за розрахованими значеннями еквівалентних сил від локомотивів ЧМЭ 3 та 2М62, вантажного вагона із візками 4ЦНИИ-Х3-0 та пасажирського вагона із візками КВ3-ЦНИИ відповідно до удосконаленої аналітичної методики.

Перевірка металевих гофрованих конструкцій шляхопроводу за допустимими напруженнями та величини коефіцієнту пластичного шарніру. При дослідженні несучої здатності МГК тунельного шляхопроводу враховується ступень ущільнення ґрунтової засипки та динамічне навантаження від рухомого складу. Удосконалена методика оцінки несучої здатності металевих гофрованих конструкцій наведена у дисертаційній роботі автора (2019).

Максимальні напруження у стінці металевій гофрованої конструкції розраховуються за формулою:

$$\sigma = \frac{N}{A} + \frac{\xi M}{W} < f_{yd}, \quad (11)$$

де N, M – осеві сили та моменти сил у стані нормальної експлуатації конструкції; A, W – площа поперечного перерізу та момент опору перерізу на одиницю довжини конструкції; f_{yd} – границя текучості сталі металевій гофрованої конструкції.

Важливим моментом оцінки несучої здатності МГК є перевірка умови утворення пластичного шарніру у склепінні конструкції.

Згідно із працями (Pettersson, Leander, & Hansing, 2002; Pettersson, & Sundquist, 2007), перевірка розвитку пластичного шарніру на максимально завантажену ділянку конструкції виконується за формулою:

$$\left(\frac{N_{d,u}}{\omega f_{yd} A} \right) + \left(\frac{M_{d,u}}{M_u} \right) \leq 1,0, \quad (12)$$

де $N_{d,u}, M_{d,u}$ – нормальна сила та момент сил у гранично можливому стані експлуатації конструкції; M_u – допустиме значення згинального моменту одиниці довжини профілю конструкції, при якому досягаються напруження текучості.

Перевірку металевих гофрованих конструкцій шляхопроводу на допустимі напруження та величини коефіцієнту пластичного шарніру проведено при ступені ущільнення ґрунтової засипки рівному $RP=97\%$ та модулю пружності підрейкової основи 73,6 МПа. Результати розрахунків наведено у таблиці 2.

Таблиця 2

Перевірка шляхопроводу із металевих гофрованих конструкцій на допустимі напруження та величини коефіцієнту пластичного шарніру при модулю пружності підрейкової основи 73,6 МПа

Експлуатаційні навантаження	Ступень ущільнення ґрунтової засипки		
	$RP=97\%$		
Швидкість рухомого складу залізниць, км/год	40	80	100
Локомотив ЧМЭ 3	99,02/0,243	129,68/0,353	–
Локомотив 2М62	95,91/0,232	127,82/0,307	145,45/0,41
Вантажний вагон із візками 4ЦНИИ-Х3-0	101,94/0,254	127,69/0,307	141,45/0,395
Пасажирський вагон із візками КВ3-ЦНИИ	90,49/0,213	91,81/0,218	107,24/0,272

Примітка: У чисельнику наведені значення напружень, а в знаменнику – значення величин коефіцієнту пластичного шарніру

Аналіз результатів багатоваріантного розрахунку напружень, які виникають у вершині склепіння металевих гофрованих конструкцій, показав, що максимальне значення напружень

виникає при проходженні ділянкою залізничної колії локомотива 2М62 і вони становлять 145,45 МПа, що є меншим за 355 МПа. При цьому коефіцієнт величини пластичного шар-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

ніру становить 0,41, що є меншим за 1,0. Отже, перевірка умови на виникнення пластичного шарніру у металевих гофрованих конструкціях шляхопроводу при ступені ущільнення ґрунтової засипки $RP=97\%$ та дії динамічних навантажень від рухомих транспортних одиниць залізниці виконується, оскільки умова виникнення пластичного шарніру є меншою за допустиму величину, одиницю.

Наукова новизна та практична значимість

Проведені динамічні розрахунки металевих гофрованих конструкцій тунельного шляхопроводу від дії рухомих транспортних одиниць показують, що метал гофрованої конструкції працює у пружній стадії та має достатній запас несучої здатності.

Отже, підсумовуючи, хочу зазначити, що металеві гофровані конструкції є перспективними транспортними спорудами для застосування на залізниці України, що сприятиме економії коштів держави у випадках природних катастроф та при реконструкції транспортних об'єктів таких, як малі мости та водопропускні труби. Також споруди із МГК можуть використовуватися при капітальному будівництві, оскільки вони мають великий запас несучої здатності і їх застосування надасть державі можливість зекономити витрати коштів на транспортне будівництво.

Висновки

На основі проведеної оцінки несучої здатності тунельного шляхопроводу із металевих гофрованих конструкцій, при дії динамічних навантажень від рухомого складу залізниць, отримано наступні висновки:

1. Швидкість рухомих транспортних одиниць має значний вплив на несучу здатність споруд із металевих гофрованих конструкцій. При збільшенні швидкості на 40 км/год напруження у металевих гофрованих конструкціях збільшуються на 35 %. Тому у початковий період експлуатації споруд із металевих гофрованих конструкцій рекомендується обмежувати швидкість руху транспортних одиниць залізниць до 40 км/год протягом півроку з моменту введення їх в експлуатацію.

2. Встановлено, що максимальні напружень у металевій гофрованій конструкції виникають при проходженні ділянкою залізничної колії

локомотива 2М62 і складають 145,45 МПа, що є меншим за 355 МПа. При цьому коефіцієнт величини пластичного шарніру становить 0,41, що є меншим за 1,0.

3. Проведені розрахунки несучої здатності металевих гофрованих конструкцій тунельного шляхопроводу при дії рухомих транспортних одиниць показують, що метал гофрованої конструкції працює у пружній стадії та має достатній запас несучої здатності. Тому такі конструкції можуть використовуватися у транспортному будівництві на залізницях України при умові забезпечення якісного виконання комплексу будівельних робіт стосовно забезпечення нормативного ступеня ущільнення ґрунтової засипки (97 %) та недопущення розвитку експлуатаційних нерівностей на рейковій колії.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- AASHTO (2001). *Standard Specifications for Highway Bridges*. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- CHBDC (2002). *Canada Highway and Bridge Design Code, Section 7 – Code, Buried Structures (Final)*. *Handbook of steel drainage and highway construction products* (2002). Corrugated Steel Pipe Institute, American Iron and Steel Institute.
- Kovalchuk, V., Kovalchuk, Yu., Sysyn, M., Stankevych, V., & Petrenko, O. (2018). Estimation of carrying capacity of metallic corrugated structures of the type Multiplate MP 150 during interaction with backfill soil. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1/1 (91), 18-26.
- Kovalchuk, V., Markul, R., Pentsak, A., Parneta, B., Gajda, O., & Braichenko, S. (2017). Study of the stress-strain state in defective railway reinforced-concrete pipes restored with corrugated metal structures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5/1 (89), 37-44.
- Luchko, J. & Kovalchuk, V. (2016). Methods of assessing the bearing capacity of corrugated metal structures. *Вісник Тернопільського національного технічного університету*, 3(83), 79-90.
- Pettersson, L., Leander, J., & Hansing, L. (2002). Fatigue design of soil steel composite bridges. *Archives of institute of civil engineering*, 12, 237-242.
- Pettersson, L. & Sundquist, H. (2007). *Design of soil steel composite bridges*. Structural Design and Bridges, Stockholm.
- Брик, А. Л., Пенашев, А. В., & Болотовский, Р. Г. (1980). Об особенностях работы металлических гофрированных труб в теле насыпи. *Улучшение эксплуатационных качеств и содержания мостов и водопропускных труб*, 92-100.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

- Гнедовский, В. Н. (1938). *Трубы под железнодорожными насыпями*. Москва: Трансжелдориздат.
- Даніленко, Е. І., & Рибкін, В. В. (2006). *Правила розрахунків залізничної колії на міцність і стійкість* (ЦП/0117; Затверджено наказом Укрзалізниця від 13. 12. 2004 р. № 960 ЦЗ). Київ: Транспорт України.
- Жинкин, А. (2011). Проблемы и перспективы типового проектирования металлических гофрированных конструкций. *Транспорт Российской Федерации*, 2, 53-54.
- Звіт з обстеження та випробування тунелю №1838-3В-3 (2019). *Науково-технічний супровід будівництва тунелю із збірної оцинкованої конструкції у м. Кропивницькому з розрахунком, обстеженням і випробуванням по об'єкту: Реконструкція проїжджої частини вул. Ельворті, вул. Миколи Левитського (Колгоспної) в м. Кропивницький (1 черга об'єкту будівництва)*.
- Ковальчук, В. В. (2015). Перспективи застосування металевих гофрованих конструкцій на залізничних та автомобільних дорогах України. *Залізничний транспорт України*, 2 (111), 32-37.
- Ковальчук, В. В. (2019). *Несуча здатність транспортних споруд із металевих гофрованих конструкцій в умовах експлуатації* (Дис. докт. техн. наук). Одеська державна академія будівництва та архітектури.
- Новина від 30 січня 2018 року. *У міській раді Кропивницького презентували майбутній шлях провід між вулицями Ельворті і Миколи Левитського*. – [Електронний ресурс], режим доступу: <http://www.kr-rada.gov.ua/news/u-miskiy-radi-kropivnitskogo-prezentovali-maybutniy-shlyah-provid-mizh-vulitsiyami-elvorti-i-mikoli-levitskogo.html>
- ОДМ 218.2.001-2009 (2009). *Рекомендації по проектуванню водопропускних металевих гофрованих труб*: Распоряжение Федерального дорожного агентства от 21 июля 2009 г. № 252-р.
- Посібник до ВБН В.2.3-218-198:2007 (2007). *Споруди транспорту. Проектування та будівництво споруд із металевих гофрованих конструкцій на автомобільних дорогах загального користування*.

В. В. КОВАЛЬЧУК

Кафедра «Подвижной состав и путь», Днепровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, Львовский филиал, ул. И. Блажкевич, 12а, Львов, Украина, 79052, тел. +38 (097) 223 72 43, эл. почта kovalchuk.diit@gmail.com, ORCID 0000-0003-4350-1756

ОЦЕНКА НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ТУННЕЛЬНОГО ПУТЕПРОВОДА ИЗ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ГОФРИРОВАННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Цель. Целью работы является определение несущей способности металлических гофрированных конструкций туннельного путепровода большого поперечного сечения при действии динамических нагрузок от железнодорожного транспорта. Такие исследования необходимы для обоснования возможности применения металлических гофрированных конструкций в теле насыпи железнодорожного пути. **Методика.** Определение несущей способности туннельного путепровода проведено с помощью усовершенствованной аналитической методики оценки несущей способности металлических гофрированных конструкций большого поперечного сечения (более 6,0 м). **Результаты.** Результаты многовариантных расчетов металлических гофрированных конструкций туннельного путепровода показали, что максимальные значения напряжений в конструкции возникают при проезде участком железнодорожного пути локомотива 2М62 и они составляет 145,45 МПа, а коэффициент величины пластического шарнира составляет 0,41. Проведенные динамические испытания металлических гофрированных конструкций путепровода от действия движущихся транспортных единиц показывают, что металл гофрированной конструкции работает в упругой стадии и имеет 60 % запас несущей способности. **Научная новизна.** Впервые проведена оценка несущей способности туннельного путепровода из металлических гофрированных конструкций большого поперечного сечения при взаимодействии с грунтовой засыпкой с учетом степени уплотнения грунтовой засыпки и величины динамической нагрузки от подвижного состава. **Практическая значимость.** Полученные результаты напряженно-деформированного состояния туннельного путепровода могут быть полезными для проектных организаций, которые занимаются расчетами подобных конструкций, эксплуатируемых в теле насыпи железнодорожного пути. Сооружения из металлических гофрированных конструкций могут использоваться в железнодорожном

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

ном строительстве в виде малых мостов, водопропускных труб и путепроводов, поперечным сечением до 14,0 м.

Ключевые слова: туннельный путепровод; металлическая гофрированная конструкция; динамическая нагрузка; вертикальные силы давления; напряжения; коэффициент пластического шарнира

V. V. KOVALCHUK

Department of Rolling stock and track, Dnipro national university of railway transport named after academician V. Lazaryan, Lviv branch, I. Blazhkevych Str. 12 a, Lviv, Ukraine, 79052, tel. +38 (097) 223 72 43, e-mail kovalchuk.diit@gmail.com, ORCID 0000-0003-4350-1756

ASSESSMENT OF THE BEARING CAPACITY OF THE TUNNEL UNDERPASS MADE OF METAL CORRUGATED STRUCTURES DURING DYNAMIC LOADS OF RAILWAY TRANSPORT

Purpose. The purpose of this work is to determine the load-bearing capacity of metal corrugated structures of a tunnel underpass with a large cross-section under the influence of dynamic loads from railway transport. Such studies are necessary to substantiate the possibility of using corrugated metal structures in the body of a railway track embankment. **Methodology.** Determination of the bearing capacity of a tunnel underpass was carried out with the help of an advanced analytical method of estimation of the bearing capacity of metal corrugated structures with large cross-section (more than 6.0 m). **Findings.** The results of multivariate calculations of metal corrugated structures of a tunnel underpass showed that the maximum stresses in the structure occur when locomotive 2M62 passes a section of the railway track and they correspond to 145.45 MPa, while the coefficient of plastic hinge is 0.41. The calculations of the bearing capacity of metal corrugated structures of the tunnel overpass under the action of moving transport units show that the metal of the corrugated structure operates in the elastic stage and has a sufficient margin of bearing capacity. Dynamic tests of metal corrugated structures of an underpass from the action of moving transport units show that the metal of a corrugated structure works at the elastic stage and has a 60 % margin of bearing capacity. **Originality.** For the first time, the load-bearing capacity of a tunnel underpass made of corrugated metal structures with large cross-sections was evaluated during its interaction with soil backfill, with respect to the degree of ground backfill compaction and the magnitude of the dynamic load from the rolling stock. **Practical value.** The obtained results of the stress-strain state of a tunnel underpass can be useful for project organizations engaged in calculation of similar structures in the body of the railway track. Corrugated metal structures can be used in railway construction in the form of small bridges, culverts and underpasses with cross-sections up to 14.0 m.

Keywords: tunnel underpass; corrugated metal structure; dynamic loading; vertical pressure forces; stresses; coefficient of plastic hinge

REFERENCES

- AASHTO (2001). *Standard Specifications for Highway Bridges*. American Association of State Highway and Transportation Officials. (in English)
- CHBDC (2002). *Canada Highway and Bridge Design Code, Section 7 – Code, Buried Structures (Final)*. (in English)
- Handbook of steel drainage and highway construction products* (2002). Corrugated Steel Pipe Institute, American Iron and Steel Institute. (in English)
- Kovalchuk, V., Kovalchuk, Yu., Sysyn, M., Stankevych, V., & Petrenko, O. (2018). Estimation of carrying capacity of metallic corrugated structures of the type Multiplate MP 150 during interaction with backfill soil. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1/1 (91), 18-26. (in English)
- Kovalchuk, V., Markul, R., Pentsak, A., Parneta, B., Gajda, O., & Braichenko, S. (2017). Study of the stress-strain state in defective railway reinforced-concrete pipes restored with corrugated metal structures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5/1 (89), 37-44. (in English)
- Luchko, J. & Kovalchuk, V. (2016). Methods of assessing the bearing capacity of corrugated metal structures. *Вісник Тернопільського національного технічного університету*, 3(83), 79-90. (in English)
- Pettersson, L., Leander, J., & Hansing, L. (2002). Fatigue design of soil steel composite bridges. *Archives of institute of civil engineering*, 12, 237-242. (in English)
- Pettersson, L. & Sundquist, H. (2007). *Design of soil steel composite bridges*. Structural Design and Bridges, Stockholm. (in English)

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Brik, A. L., Penashev, A. V., & Bolotovskij, R. G. (1980). Ob osobennostjah raboty metallicheskih gofriro-vannyh trub v tele nasypj. *Uluchshenie jekspluatacionnyh kachestv i sodержanija mostov i vodopropusknyh trub*, 92-100. (in Russian)

Gnedovskij, V. N. (1938). *Truby pod zheleznodorozhnyimi nasypjami*. Moskva: Transzheldorizdat. (in Russian)

Danilenko, E. I., & Rybkin, V. V. (2006). *Pravyla rozrakhunkiv zaliznychnoji koliji na micnistj i stijkistj* (CP/0117; Zatverdzheno nakazom Ukrzaliznyci vid 13. 12. 2004 r. № 960 CZ). Kyjiv: Transport Ukrainy. (in Ukrainian)

Zhinkin, A. (2011). Problemy i perspektivy tipovogo proektirovanija metallicheskih gofrirovannyh konstrukcij. *Transport Rossijskoj Federacii*, 2, 53-54. (in Russian)

Zvit z obstezhennja ta vyprobuvannja tunelju №1838-ZV-3 (2019). *Naukovo-tekhničnyj suprovid budivnytva tunelju iz zbirnoji ocynkovanoji konstrukciji u m. Kropyvnyckomu z rozrakhunkom, obstezhennjam i vyprobuvannjam po ob'jektu: Rekonstrukcija projizhdzhoji chastyny vul. Eljvorti, vul. Mykoly Levytsjkogho (Kolghospnoji) v m. Kropyvnyckij (1 cherga ob'jektu budivnytva)*. (in Ukrainian)

Kovaljchuk, V. V. (2015). Perspektivy zastosuvannja metalevykh ghofrovanykh konstrukcij na zaliznychnykh ta avtomobilnykh doroghakh Ukrainy. *Zaliznychnyj transport Ukrainy*, 2 (111), 32-37. (in Ukrainian)

Kovaljchuk, V. V. (2019). *Nesucha zdatnistj transportnykh sporud iz metalevykh ghofrovanykh konstrukcij v umovakh ekspluataciji* (Dys. dokt. tekhn. nauk). Odesjka derzhavna akademija budivnytva ta arkhitektury. (in Ukrainian)

Novyna vid 30 sichnja 2018 roku. *U misjkij radi Kropyvnyckogho prezentuvaly majbutnij shljahoprovid mizh vulycjamy Eljvorti i Mykoly Levytsjkogho*. – [Elektronnyj resurs], rezhym dostupu: <http://www.kr-rada.gov.ua/news/umiskiy-radi-kropivnitskogo-prezentuvali-majbutnij-shlyahoprovid-mizh-vulitsyami-elvorti-i-mikoli-levitskogo.html> (in Ukrainian)

ODM 218.2.001-2009 (2009). *Rekomendacii po proektirovaniju vodopropusknyh metallicheskih gofriro-vannyh trub*: Rasporjzhenie Federal'nogo dorozhnogo agentstva ot 21 ijulja 2009 g. № 252-r. (in Russian)

Posibnyk do VBN V.2.3-218-198:2007 (2007). *Sporudy transportu. Proektuvannja ta budivnytvo sporud iz metalevykh ghofrovanykh konstrukcij na avtomobilnykh doroghakh zaghaljnogho korystuvannja*. (in Ukrainian)

Надійшла до редколегії 16.04.2020.

Прийнята до друку 05.05.2020.