

УДК 624.014:624.21

Ковальчук В. В.,¹ канд. техн. наук, доц., <https://orcid.org/0000-0003-4350-1756>

Коваль П. М.,² канд. техн. наук, проф., <https://orcid.org/0000-0002-0040-5900>

Коваль М. П.,³ канд. техн. наук, <https://orcid.org/0000-0003-1244-1738>

¹Львівська філія Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, м. Львів, Україна

²Національна академія образотворчого мистецтва і архітектури, м. Київ, Україна

³ТзОВ «НВП «Триада», м. Львів, Україна.

МЕТОДИ ОБСТЕЖЕННЯ ТА ВИПРОБОВУВАННЯ ТУНЕЛЬНОГО ШЛЯХОПРОВОДУ З МЕТАЛЕВИХ ГОФРОВАНИХ КОНСТРУКЦІЙ НА КМ 228+160 АВТОМОБІЛЬНОЇ ДОРОГИ КИЇВ–ХАРКІВ–ДОВЖАНСЬКИЙ

Анотація

Вступ. Приведено відомості про виробників металевих гофрованих конструкцій в Україні та за кордоном. Представлені приклади транспортних споруд із металевих гофрованих конструкцій (МГК). Обґрунтовано необхідність удосконалення нормативної бази України у частині розрахунків, обстеження та випробування транспортних споруд із металевих гофрованих конструкцій.

Проблематика. Досвід експлуатації транспортних споруд із металевих гофрованих конструкцій вказує на те, що в ряді випадків не забезпечується їх нормативний термін служби, який повинен відповідати проєктній довговічності. В умовах експлуатації споруди із МГК схильні до утворення залишкових деформацій поперечного перерізу конструкцій, що впливає на їх несну здатність. Для недопущення зазначених пошкоджень необхідно проводити обстеження та випробування таких транспортних споруд. Це у свою чергу вимагає розробки достовірних аналітичних методів оцінки несної здатності транспортних споруд із металевих гофрованих конструкцій при взаємодії із ґрунтовою ущільнюючою засипкою та удосконалення експериментальних методів випробування цих споруд статичними та динамічними навантаженнями.

Мета. Мета роботи полягає у розробці аналітичного та експериментального методів оцінки несної здатності транспортної споруди із металевих гофрованих конструкцій, яка експлуатується у тілі насипу автомобільної дороги, під час проведення її обстеження та випробування.

Результати. Запропоновано програму робіт під час обстеження та випробування тунельного шляхопроводу із металевих гофрованих конструкцій на автомобільних дорогах України. Наведено аналітичну методику оцінки несної здатності металевих гофрованих конструкцій шляхопроводу під час дії статичних навантажень від автомобільних транспортних засобів та отримано розподіл напружень у конструкціях при різних комбінаціях завантаження тунельного шляхопроводу. Проведено оцінку несної здатності металевих гофрованих конструкцій методом скінченних елементів. Запропоновано методику експериментальних випробувань тунельного шляхопроводу із металевих гофрованих конструкцій та проведено натурні експериментальні випробування шляхопроводу статичним навантаженням.

Висновки. Різниця напружень отриманих під час завантаження шляхопроводу одним та чотирма автосамоскидами становить до 15 %. Це дозволяє зробити висновок, що кут розподілу навантажень є меншим за 45°, тому такі конструкції можуть використовуватися під багатосмуговими автомобільними дорогами чи багатоколійними залізницями за умови, що висота ґрунтової засипки є більшою за 2,0 м. При цьому запас несної здатності тунельного шляхопроводу складає 80 %.

Ключові слова: випробування, металева гофрована конструкція, напружено-деформований стан, несна здатність, транспортна споруда.

Вступ

У сучасній українській практиці транспортної інфраструктури споруди із металевих гофрованих конструкцій (далі МГК) почали влаштовувати із середини дев'яностих років ХХ століття.

У європейських країнах металеві гофровані конструкції знайшли широке застосування в останні 50 років [2–4]. На теперішній час відомими у світі виробниками МГК є італійська фірма FRACASSO [5], норвезько-шведсько-фінська фірма ViaCon [1] та канадська фірма ARMTEC [4]. Вони забезпечують потреби в металевих гофрованих конструкціях країни Європи, Америки, Африки та Австралії. У таких країнах, як Польща, Швеція, Італія, США, Канада та ін., використання МГК при будівництві транспортних споруд на сьогоднішній день динамічно розвивається.

Конструкції, методи розрахунку, технології влаштування транспортних споруд із МГК постійно вдосконалюються з врахуванням досвіду будівництва та проведених досліджень [2, 3, 6–28].

На автомобільних дорогах України з МГК збудовані малі мости, шляхопроводи, транспортні тунелі, скотопрогони, пішохідні та біопереходи, а також водопропускні труби [1]. Так у нашій країні побудовано транспортні тунелі із МГК, а саме: транспортний тунель на 228+160 км автомобільної дороги Київ–Харків–Довжанський (рис. 1, *a*), транспортний тунель на обході м. Одеса (рис. 1, *b*) та транспортний тунель на обході в м. Донецьк із використанням конструкцій SuperCor SC 86 S (рис. 1, *c*).

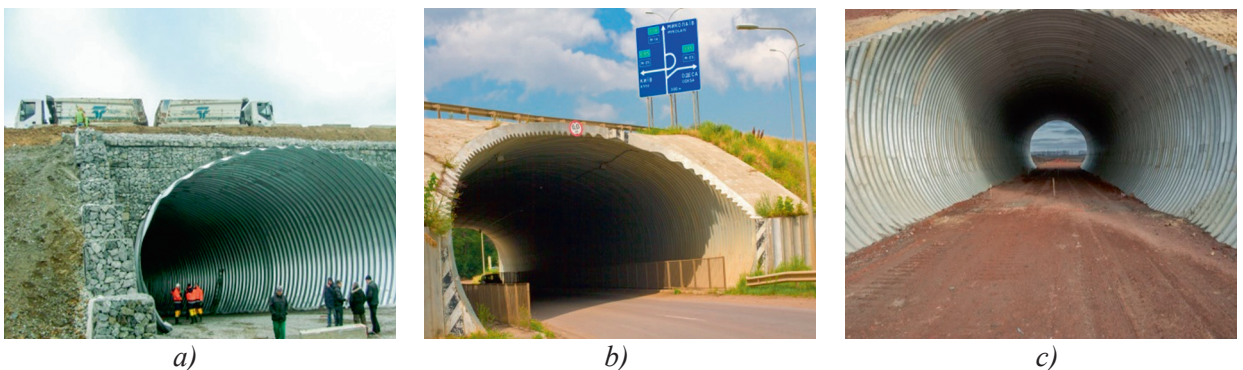


Рисунок 1 — Транспортні тунелі із металевих гофрованих конструкцій, які побудовано в Україні на: *a*) автомобільна дорога Київ–Харків–Довжанський 228+160 км; *b*) обхід м. Одеси; *c*) обхід м. Донецька

Поперечні перерізи цих транспортних тунелів досягають до 14 м, а згідно з ДБН В.2.3-6:2009

«Мости та труби. Обстеження і випробування» [29] випробуванню підлягають труби металеві гофровані з отвором більше 3,0 м. Проте під час обстеження та випробування транспортних споруд із МГК інженери зіткнулися з низкою проблем. Виявилося, що діючого нормативного забезпечення використання МГК у транспортних спорудах недостатньо для вирішення ряду практичних задач. Транспортні споруди з МГК мають значні особливості у своїх конструкціях, у роботі елементів за навантаження та змін температури, в розрахунках.

Норми [30, 31] направлено в основному на вирішення питань технології влаштування та монтажу МГК, встановлення конструктивних вимог до МГК, систематизації існуючих перерізів МГК при будівництві та реконструкції транспортних споруд, раціонального використання економічних, матеріальних, енергетичних, трудових ресурсів, охорони навколишнього середовища та забезпечення належної якості при будівництві та проектуванні металевих гофрованих конструкцій. В основу ВБН В.2.3-218-198:2007 «Споруди транспорту. Проектування та будівництво споруд із металевих гофрованих конструкцій на автомобільних дорогах загального користування» [30], розроблений у 2006 на замовлення Державної служби автомобільних доріг України «Укравтодор» інститутом ДП ДерждорНДІ, закладено принципи інженерного досвіду проектування транспортних споруд із металевих гофрованих конструкцій.

Тому подальший розвиток нормативної бази України щодо використання металевих гофрованих конструкцій у транспортному будівництві повинен включати вдосконалення методів розрахунку, а також розроблення методів проведення обстеження та випробування таких конструкцій як під час будівництва, так і в умовах експлуатації. Саме це є ключовою умовою забезпечення належної якості побудованих споруд із МГК та надійності їх роботи в умовах експлуатації.

Мета роботи полягає в розробленні аналітичного й експериментального методів оцінки несної здатності транспортної споруди з металевих гофрованих конструкцій, яка експлуатується в тілі насипу автомобільної дороги, під час проведення її обстеження та випробування.

Основна частина

Наведемо розроблену нами методику обстеження та випробування тунельного шляхопроводу, який експлуатується на км 228+160 автомобільної дороги Київ–Харків–Довжанський (рис. 2).



a)



b)

Рисунок 2 — Тунельний шляхопровід на км 228+160 автомобільної дороги Київ – Харків – Довжанський: a) фасад тунельного шляхопроводу з лівого боку; b) укріплення та підпірні стінки насипу підходів

Тунельний шляхопровід збудований під автомобільною дорогою I категорії та пропускає автомобільну дорогу II категорії [32]. Технічні параметри шляхопроводу: матеріал конструкції — гофрований оцинкований метал; розмір гофра — 380 мм × 140 мм; товщина листа гофра — 7 мм; поперечний переріз — горизонтальний еліпс; ширина конструкції — 13,026 м; висота конструкції — 8,831 м; довжина шляхопроводу — 41,99 м; розташування в плані — 65,32°; висота насипу над конструкцією — 2,0 м; позовжній ухил конструкції — 10 %; ширина автомобільної дороги в шляхопроводі — 9,0 м; ширина тротуарних проходів — 1,0 м; габарит по висоті — 5,62 м; границя міцності сталі гофрованого листа конструкції — 390 МПа; з'єднання листів — болтові Ø20 мм; границя міцності сталі болтів — 800 МПа.

Обстеження та випробування тунельного шляхопроводу проведено відповідно до нормативних документів [29–31, 33–37]. Програма обстеження тунельного шляхопроводу включає проведення наступних робіт: огляд внутрішніх і зовнішніх (не закритих ґрунтом) поверхонь тунельного шляхопроводу; вимірювання вертикальних і горизонтальних розмірів тунельного шляхопроводу; обміри в натурі геометричних параметрів тунельного шляхопроводу та його окремих елементів, складання обмірних креслень плану та розрізів; перевірка профілю та положення осі в плані тунельного шляхопроводу; огляд укріплених укосів конусів, вхідного та вихідного оголовків тунельного шляхопроводу; якість і стан захисного покриття; правильність виконання стиків; аналіз результатів обстеження та складання висновків.

Програма випробування тунельного шляхопроводу включає такі роботи: перевірочний розрахунок тунельного шляхопроводу на нормоване навантаження НК-100 (АК-15); розрахунок тунельного шляхопроводу на випробувальні навантаження; завантаження статичним навантаженням за такими схемами: симетричні й односторонні з установкою почергово на правій та лівій смугах проїздів; обробка й аналіз результатів випробування, порівняння теоретичних і експериментальних даних та складання висновків за результатами випробувань.

У рамках даної статті зупинимося на аналітичній та експериментальній частині обстеження та випробування тунельного шляхопроводу із металевих гофрованих конструкцій.

Аналітична методика визначення напружено-деформованого стану тунельного шляхопроводу. На основі значень осьових сил та згинальних моментів розраховуємо максимальні напруження у стінці металевій гофрованій конструкції за формулою:

$$\sigma = \frac{N}{A} + \frac{M}{W} < f_{yd}, \quad (1)$$

де N, M — відповідно осьові сили та моменти сил у стані нормальної експлуатації споруди;
 A, W — відповідно площа поперечного перерізу та момент опору перерізу на одиницю довжини конструкції;

f_{yd} — границя текучості сталі гофрованої конструкції.

Осьову силу від оточуючого ґрунту засипки та транспортного навантаження визначають за формулою:

$$N = \frac{h_s}{D_h} (q_{st} + p_{tr}), \quad (2)$$

де h_s — висота ґрунтової засипки над вершиною конструкції;

D_h — горизонтальний переріз металевій гофрованої конструкції;

q_{st} — статичне навантаження, яке враховує навантаження від ґрунтової засипки та конструкції автомобільної дороги;

p_{tr} — тимчасове навантаження від транспортних засобів.

Згинальний момент залежить від відношення жорсткості ґрунтової засипки до жорсткості конструкції. Це відношення називається жорсткістю споруди і визначається за формулою:

$$\lambda_f = E_{jd} \cdot D_h^3 / (EI)_s, \quad (3)$$

де E_{jd} — модуль деформації ґрунтової засипки;
 E — модуль Юнга сталі конструкції;
 I_s — осьовий момент інерції одиниці довжини конструкції.

Згинальний момент, який виникає від навантажень ґрунту, як для межі граничного стану працездатності, так і в граничному стані, визначається за формулою:

– під час обчислення згинального моменту на вершині конструкції:

$$M_j = D_v^3 S_{ar} \frac{(\gamma_s h_s + \gamma_b h_b)}{D_v} \left(\frac{R_t}{R_s} \right)^{0,75} f_{cover}, \quad (4)$$

– під час обчислення згинального моменту на бокових сторонах конструкції:

$$M_j = -f_{surr} \rho_{cv} D_h^3, \quad (5)$$

де S_{ar} — арковий коефіцієнт;
 γ_s — питома вага ґрунтової засипки; γ
 γ_b — питома вага матеріалів дорожнього покриття;
 h_b — товщина дорожнього покриття;
 R_s — боковий радіус перерізу конструкції;
 R_t — вертикальний радіус перерізу конструкції;
 D_v — вертикальний розмір перерізу конструкції;
 f_{cover} , f_{surr} — функції, які обчислюють залежно від геометричних та фізичних характеристик ґрунтової засипки [38], зокрема від параметра жорсткості споруди λ_f , і визначають за формулами:

$$f_{surr} = 0,0046 - 0,0010 \cdot \log_{10}(\lambda_f), \quad f_{cover} = 0,018 - 0,004 \cdot \log_{10}(\lambda_f). \quad (6)$$

Формула (4) ґрунтується на експериментальних спостереженнях: у разі зворотної засипки відбувається ущільнення навколо пружної конструкції, вона стискається всередину по горизонтальних стінках, тоді на вершині конструкції виникає від’ємний згинальний момент. Цей момент досягає екстремуму, коли рівень засипки досягає рівня вершини конструкції. Коли засипка продовжується, вище рівня склепіння конструкції, конструкція стискається вниз і від’ємний момент знижується. Тому у формулі (4) уведено арковий коефіцієнт S_{ar} .

Згинальний момент, який виникає від дії еквівалентного лінійного навантаження транспортних засобів p_{tr} , розраховуємо за формулою:

$$M_{tr} = f_4'' D_h p_{tr} + S_{ar} \left(\frac{R_t}{R_s} \right)^{0,75} \cdot f_{cover} \cdot 4D_h^2, \quad (7)$$

$$f_4'' = 0,120 \cdot \left(1 - 0,15 \cdot \log_{10}(\lambda_f) \right). \quad (8)$$

Крім того, умова $f_4'' < 1,0$ повинна завжди виконуватися.

Проектні згинальні моменти у конструкції від ґрунту та рухомого навантаження мають різні напрямки у різних точках її поперечного перерізу. Для встановлення максимального варіанта суперпозиції навантажень будемо сумувати значення моментів від дії постійного навантаження M_s та дії тимчасового навантаження M_{tr} :

$$M = M_s + M_{tr}. \quad (9)$$

Наступним важливим моментом оцінки несної здатності металеві гофрованої конструкції є перевірка утворення пластичного шарніру на максимально навантаженій ділянці конструкції за формулою [38]:

$$\left(\frac{N_{d.u}}{\omega f_{yd} A} \right) + \left(\frac{M_{d.u}}{M_u} \right) \leq 1,0, \quad (10)$$

де $N_{d.u}$, $M_{d.u}$ — нормальна сила та момент сили у гранично можливому стані експлуатації конструкції;

A — площа поперечного перерізу одиниці довжини конструкції;

M_u — допустиме значення згинального моменту одиниці довжини конструкції, за якого досягаються напруження текучості;

ω — сила вигину при повній пластичності металеві гофрованої конструкції [39], яку розраховують за формулою:

$$\omega = \frac{N_{cr}}{A f_{yd}}, \quad (11)$$

де N_{cr} — критичне навантаження відповідно до теорії авторів Klöppel & Glock [40].

Слід зазначити, що транспортні споруд із МГК — це система «грунт — конструкція», які працюють спільно, і несна здатність такої системи залежить від модуля деформації ґрунтової засипки. Тому перейдемо до його визначення. Проектне значення модуля деформації ґрунтової засипки пропонується визначати за формулою, яка наведена у роботах [38, 41]:

$$E_{s.d} = \frac{1}{\gamma_n \gamma_m} 0,42 \cdot m \cdot 100 \cdot k_v \left(\frac{(1 - \sin \varphi_k) \cdot \rho \cdot S_{ar} (h_s + H / 2)}{100} \right)^{1-\beta}, \quad (12)$$

де $\gamma_n \gamma_m$ — коефіцієнти, які залежать від класу безпеки конструкції;

h_s — висота ґрунтової засипки;

100 — перевідний коефіцієнт, кПа;

k_v — розрахунковий параметр, який залежить від кута внутрішнього тертя ґрунтової засипки φ_k і визначається за формулою:

$$k_v = \frac{\sin \varphi_k (3 - 2 \sin \varphi_k)}{2 - \sin \varphi_k}. \quad (13)$$

Обчислення модуля деформації ґрунтової засипки включає декілька етапів. На першому етапі обчислюють коефіцієнт пористості ґрунту за формулою:

$$e = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1, \quad (14)$$

де ρ_s — щільність твердих частинок ґрунту;

ρ_d — істинна щільність скелета ґрунту.

Модульне співвідношення m розраховуємо за формулою:

$$m = 282 \cdot C_u^{-0,77} \cdot e^{-2,83}, \quad (15)$$

де C_u — коефіцієнт однорідності, який залежить від співвідношень розмірів частинок ґрунту $C_u = d_{60} / d_{10}$.

Показник напружень β визначають за формулою:

$$\beta = 0,29 \cdot^{10} \log \left(\frac{d_{10}}{0,01} \right) - 0,065 \cdot^{10} \log (C_u). \quad (16)$$

Кут внутрішнього тертя ґрунтової засипки розраховують за формулою:

$$\varphi_k = 26^\circ + 10 \cdot (RP - 75) / 25 + 0,4 \cdot C_u + 1,6 \cdot \log_{10} (d_{50}), \quad (17)$$

де RP — відносний ступень ущільнення ґрунтової засипки;

d_{50} — розмір частинок матеріалу, частка яких становить 50 %.

Ступінь ущільнення ґрунтової засипки RP споруди визначають випробуванням зразків ґрунту за методом Проктора [38]:

$$\rho_{cv} = \rho_{opt} \frac{RP}{100}, \quad (18)$$

де ρ_{cv} — середня щільність ґрунтової засипки над вершиною конструкції;

ρ_{opt} — оптимальна щільність ґрунту.

Коефіцієнт S_{ar} відображає арковий ефект розподілу навантажень ґрунтової засипки на металеву конструкцію, який виникає за великої висоти засипки та визначається за формулами:

$$S_{ar} = \frac{1 - e^{-\kappa}}{\kappa}, \quad \kappa = 2S_v \frac{h_s}{D_h}, \quad S_v = \frac{0,8 \tan \varphi_{cv.d}}{\left(\sqrt{1 + \tan^2 \varphi_{cv.d}} + 0,45 \tan \varphi_{cv.d}\right)^2}, \quad (19)$$

де S_v, κ — розрахункові параметри;

$\varphi_{cv.d}$ — проектний кут внутрішнього тертя ґрунту, який залежить від коефіцієнтів запасу несної здатності γ_n, γ_m та природнього кута внутрішнього тертя ґрунту:

$$\tan \varphi_{cv.d} = \frac{\tan \varphi_k}{\gamma_n \gamma_m}. \quad (20)$$

У формулі (20) значення γ_m , як правило, дорівнює 1,3, а $\gamma_n = 1,1$.

Далі наведемо практичне застосування аналітичної методики при оцінці несної здатності тунельного шляхопроводу із металевих гофрованих конструкцій, який експлуатується у тілі насипу автомобільної дороги.

Перевіряння металевих гофрованих конструкцій шляхопроводу за допустимими напруженнями та величини коефіцієнту пластичного шарніру. Для оцінки несної здатності тунельного шляхопроводу із МГК в умовах експлуатаційних навантажень прийнято чотири схеми завантаження шляхопроводу автосамоскидами IVECO, вагою по 38 т кожний (рис. 3): схема завантаження № 1 — один автосамоскид (A1) розташований над шляхопроводом із МГК; схема завантаження № 2 — два автосамоскиди (A1, A2) на одній смузі руху автомобільної дороги; схема завантаження № 3 — два автосамоскиди (A1, A2) на одній смузі руху і один автосамоскид (A3) на другій смузі руху та схема завантаження № 4 — чотири автосамоскиди над віссю шляхопроводу по два (A1 та A2, A3 та A4) на різних смугах руху автомобільної дороги.

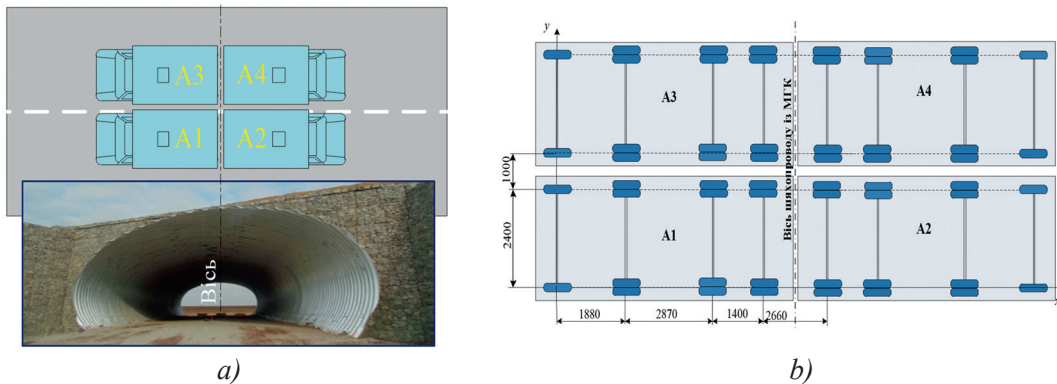


Рисунок 3 — Схеми завантаження шляхопроводу з МГК автосамоскидами (а) та геометрична схема колісних баз автосамоскидів IVECO (б)

Результати розрахунку розподілу вертикальних тисків від автосамоскидів на металеві гофровані конструкції тунельного шляхопроводу наведено на рис. 4. У разі завантаження за

схемою № 1 вертикальний тиск становить — 33,51 кПа; схемою № 2 — 38,92 кПа; схемою № 3 — 58,41 кПа та за схемою № 4 — 62,31 кПа.

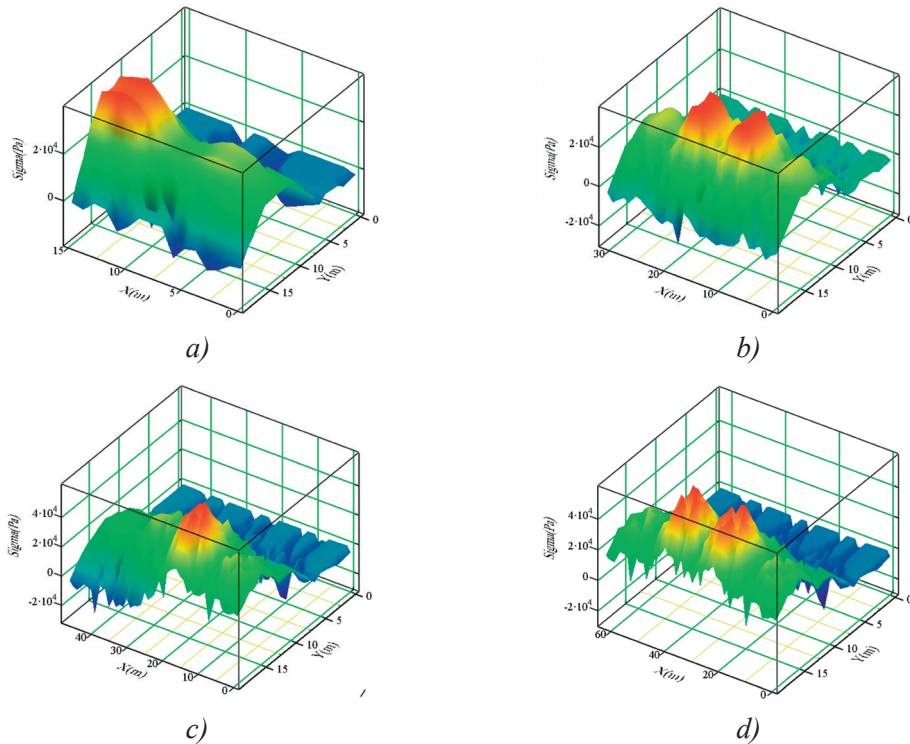


Рисунок 4 — Вертикальний тиск на металеві гофровані конструкції тунельного шляхопроводу від автосамоскидів при схемах завантаження: *a)* схема № 1; *b)* схема № 2; *c)* схема № 3; *d)* схема № 4

Далі проводимо оцінку несної здатності тунельного шляхопроводу залежно від схеми завантаження автосамоскидами. У розрахунку було прийнято, що ступінь ущільнення щебеневопіщаної ґрунтової засипки тунельного шляхопроводу становить $RP = 97\%$, а модуль деформації ґрунтової засипки — $E = 30$ МПа.

Розрахунок напружень і величин коефіцієнта пластичного шарніру в металевій гофрованій конструкції тунельного шляхопроводу із МГК залежно від схеми завантаження наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Результати розрахунку напружень та величин коефіцієнта пластичного шарніру

Схеми завантаження тунельного шляхопроводу	Напруження, МПа	Величина коефіцієнту пластичного шарніру
Схема №1	61,51	0,155
Схема №2	63,41	0,163
Схема №3	70,23	0,193
Схема №4	71,59	0,199

Із даних табл. 1 можна побачити, що максимальні напруження виникають під час завантаження шляхопроводу з МГК чотирма автосамоскидами та становлять 71,59 МПа, а величина коефіцієнта пластичного шарніру за заданого навантаження становить 0,199. Слід зазначити, що схема завантаження шляхопроводу автосамоскидами не значно впливає на величину напружень: різниця напружень, отриманих під час завантаження шляхопроводу одним автосамоскидом і чотирма становить до 15 %. Це дозволяє зробити припущення щодо ефективного розподілення навантаження від транспортних засобів у ґрунтовій засипці споруд із металевих гофрованих конструкцій.

Величина несної здатності металевих гофрованих конструкцій тунельного шляхопроводу при завантаженні його на 81 % від нормативного навантаження забезпечується, оскільки величина максимальних напружень становить до 20 % від допустимих значень напружень.

Скінченно-елементний розрахунок несної здатності тунельного шляхопроводу. Оцінку несної здатності тунельного шляхопроводу із МГК проведено також методом скінченно-елементного розрахунку при завантаженні його чотирма автосамоскидами IVECO. Геометричні та фізико-механічні параметри металевих гофрованих конструкцій шляхопроводу та ґрунтової засипки приймаємо ті, що наведені у попередніх вихідних даних. Результати напружено-деформованого стану металевих гофрованих конструкцій шляхопроводу наведені на рис. 5.

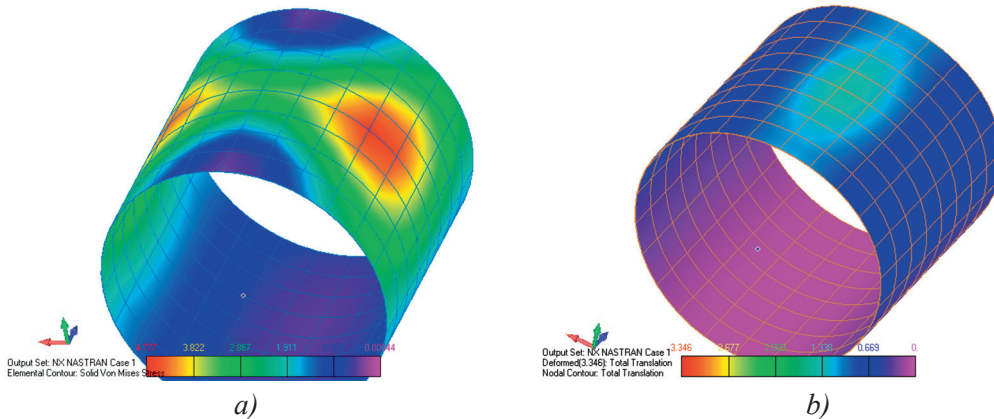


Рисунок 5 — Напружено-деформований стан металевих гофрованих конструкцій тунельного шляхопроводу: *a)* розподіл напружень; *b)* розподіл деформацій

Із результатів розрахунку видно, що максимальні напруження виникають не у склепінні металевої гофрованої конструкції, а на бокових стінках шляхопроводу при відхиленні від вертикальної осі на 20°. Величина напружень від експлуатаційного навантаження становить 4,77 МПа.

Величина вертикальних деформацій металевих гофрованих конструкцій тунельного шляхопроводу становить 1,57 мм. Таким чином величина відносних вертикальних деформацій металевих гофрованих конструкцій шляхопроводу при завантаженні за схемою № 4 становить 0,02 %, тобто відносні вертикальні деформації металевих гофрованих листів є меншими за 3 %, які регламентуються нормами [30, 31].

Експериментальні статичні випробування тунельного шляхопроводу. Метою експериментальних випробувань тунельного шляхопроводу із МГК було визначення його фактичного технічного стану та несної здатності в цілому. Схеми завантаження тунельного шляхопроводу та розташування вимірювальних приладів при випробуванні наведені на рис. 6.

Випробувальним навантаженням були 4 автосамоскиди IVECO вагою по 38 т кожен,

розташовані на двох смугах послідовно на правому проїзді (П) та на лівому проїзді (Л). Максимальна маса тимчасового навантаження становила 172 т. Під час випробувань реалізовано 7 схем завантаження шляхопроводу: схема 1 — правий проїзд, два автомобілі на правій смузі руху, симетричне завантаження відносно вертикальної осі шляхопроводу; схема 2 — правий проїзд, чотири автомобілі (по два автомобілі на кожній смузі руху), симетричне завантаження відносно вертикальної осі шляхопроводу; схема 3 — правий проїзд, чотири автомобілі (по два автомобілі на кожній смузі руху), одностороннє завантаження зліва відносно вертикальної осі шляхопроводу; схема 4 — правий проїзд, чотири автомобілі (по два автомобілі на кожній смузі руху), одностороннє завантаження справа відносно вертикальної осі шляхопроводу; схема 5 — лівий проїзд, чотири автомобілі (по два автомобілі на кожній смузі руху), симетричне завантаження відносно вертикальної осі шляхопроводу; схема 6 — лівий проїзд, чотири автомобілі (по два автомобілі на кожній смузі руху), одностороннє завантаження зліва відносно вертикальної осі шляхопроводу; схема 7 — лівий проїзд, чотири автомобілі (по два автомобілі на кожній смузі руху), одностороннє завантаження справа відносно вертикальної осі шляхопроводу.

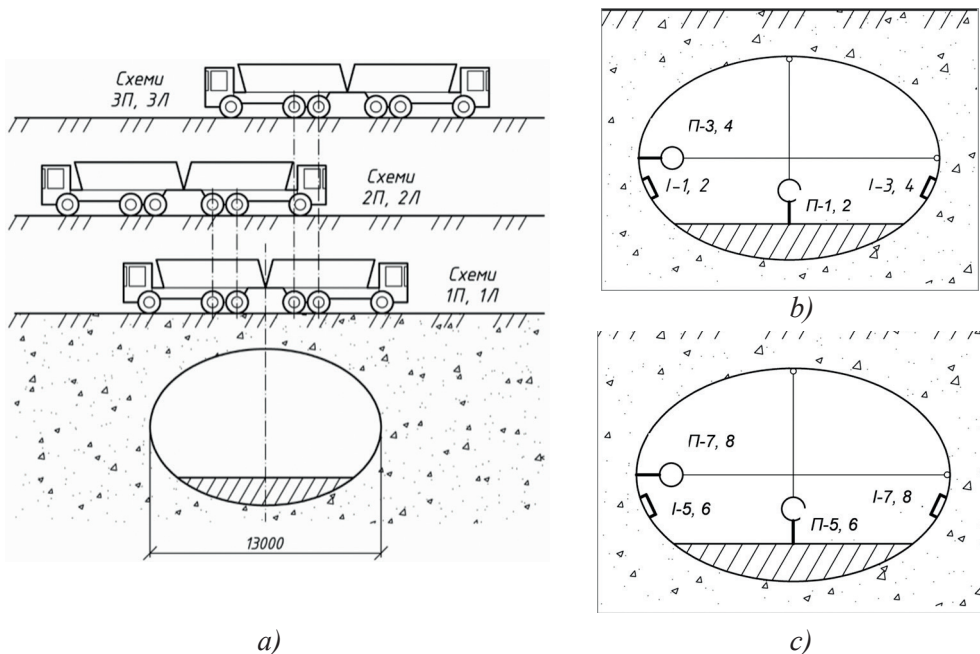


Рисунок 6 — Схеми завантаження шляхопроводу (а) та розташування вимірювальних приладів при випробуванні шляхопроводу по осі правого проїзду (b) та лівого проїзду (c); П — прогиноміри 6-ПАО; І — індикатори годинникового типу з ціною поділки 0,001 мм на базі 200 мм

У шляхопроводі під правим і лівим проїздами для заміру загальних деформацій у вертикальному та горизонтальному напрямках було встановлено прогиноміри системи Аістова 6-ПАО з ціною поділки 0,01 мм, по два в кожному напрямку. Для заміру відносних деформацій металевих конструкцій тунельного шляхопроводу встановлено індикатори годинникового типу (ІГТ) з ціною поділки 0,001 мм на базі 200 мм в місцях найбільших відносних деформацій, на рівні горизонтальної осі шляхопроводу, по два з кожного боку (рис. 6, b, c). Загальний вигляд встановлених приладів наведено на рис. 7.



Рисунок 7 — Розміщення вимірювальних приладів на металевій гофрованій конструкції: а) прогиномірів П-1, П-2 та ПТГ I-1 та I-2; б) прогиномірів П-5, П-6

Вигляд натурних експериментальних випробувань тунельного шляхопроводу наведено на рис. 8.



Рисунок 8 — Вигляд схем завантаження шляхопроводу із МГК із лівого проїзду (а) та правого проїзду (б) чотирма автосамоскидами IVECO

Перед початком випробувань фіксувалися покази по всіх приладах без навантаження («нульові» покази, тобто умовні нулі). Автомобілі IVECO встановлювалися на смуги проїзду відповідно до схем завантаження. Після 15-хвилинної витримки під навантаженням знімалися покази на приладах під навантаженням конструкції шляхопроводу. Після з'їзду автомобілів із шляхопроводу через 15 хвилин знімалися покази на приладах для фіксації залишкових деформацій конструкції. Такі експериментальні випробування повторювалися для всіх схем завантаження.

Результати статичних випробувань (покази приладів) та загальні деформації в перерізах шляхопроводу наведено в табл. 2.

Із табл. 2 видно, що максимальний прогин (по осі z) отримано при завантаженні за схемою 2 — він становив 1,65 мм. При розрахунку за методикою скінченно-елементного моделювання отримано максимальний прогин по осі z шляхопроводу величиною 1,57 мм.

Таблиця 2

Результати вимірювання прогинів конструкції

№ схеми	Кількість машин	П-1	П-2	П-3	П-4	П-5	П-6	П-7	П-8
		f, см							
0	0	-	-	-	-	-	-	-	-
1	2	0	-0,001	0	0	0,059	0,060	-	-
2	4	0	-0,020	0	0	0,159	0,165	-	-
0	0	0	-0,028	0	0	0,102	0,131	-	-
3	4	0	-0,028	0	0	0,131	0,143	-	-
0	0	0	-0,028	0	0	0,110	0,131	-	-
4	4	0	-0,028	0	0	0,158	0,154	-	-
0	0	0	-0,054	0	0	0,121	0,131	-	-
5	4	0	-0,054	-0,056	0	-	-	0,142	0,142
0	0	0	-0,054	-0,056	0	-	-	0,075	0,088
6	4	0	-0,054	-0,056	0	-	-	0,114	0,120
0	0	0	-0,054	-0,056	0	-	-	0,081	0,096
7	4	0	-0,054	-0,056	0	-	-	0,122	0,121
0	0	0	-0,054	-0,056	0	-	-	0,084	0,099

Відхилення експериментального прогину від теоретичного становить 8,83 %, при чому розрахунок дає певний запас міцності. Отже, порівняння теоретичних і експериментальних даних свідчить про коректність виконаних розрахунків конструкції шляхопроводу.

Результати вимірювання відносних деформацій конструкції шляхопроводу по ІГТ І-1-І-8 наведено у табл. 3.

Із табл. 3 видно, що максимальні відносні деформації металевих листів при випробувальному навантаженні становили 2×10^{-5} мм. Це свідчать про те, що напруження в листах (420 кг/см^2) менші ніж граничні.

Під час випробування шляхопроводу було досягнуто рівень навантаження 81 % від нормативного навантаження НК100.

Таблиця 3

Результати вимірювання відносних деформацій конструкції

№ схеми	Кількість машин	I-1	I-2	I-3	I-4	I-5	I-6	I-7	I-8
		$\epsilon \times 10^{-5}$							
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0	-	-	-	-	-	-	-	-
1	2	0,5	1,0	0	0,5	0	0	-0,5	-1,0
2	4	1,0	1,5	0	0,5	0	0	-1,5	-1,5
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0	0	0,5	0	0,5	0	0	-0,5	-0,5

Кінець таблиці 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3	4	1,5	2,0	0	0,5	0	0	-1,0	-1,0
0	0	0	0,5	0	0,5	0	0	-0,5	-0,5
4	4	0,5	1,0	0	0,5	0	0	-1,5	-2,0
0	0	0	0,5	0	0,5	0	0	-1,0	-1,0
5	4	0,5	1,0	0	1,5	0,5	1,05	-1,0	-1,0
0	0	0,5	1,0	0	0,5	0,5	0,5	-1,0	-1,0
6	4	0,5	1,0	0	1,5	0,5	1,0	-0,5	-1,0
0	0	0,5	1,0	0	0,5	0,5	0,5	-0,5	-1,0
7	4	0,5	1,0	0	0,5	0,5	1,5	-0,5	-1,0
0	0	0,5	1,0	0	0,5	0,5	0,5	-0,5	-1,0

Із результатів експериментальних досліджень металевих гофрованих конструкцій шляхопроводу на 228 км автомобільної дороги Київ – Харків – Довжанський при завантаженні його на 81 % від нормативного навантаження, чотирма автосамоскидами IVECO, встановлено, що максимальні напруження становлять 4,2 МПа, а максимальні теоретичні напруження, отримані за допомогою аналітичної методики, — 4,61 МПа та методом скінченних елементів — 4,77 МПа. Збіжність результатів напружень, визначених за допомогою удосконаленої аналітичної методики із експериментальними вимірюваннями напружено-деформованого стану споруди, становить 8,9 %, а при порівнянні із методом скінченних елементів — 11,9 %.

Значення прогинів, отриманих при статичних експериментальних випробуваннях металевих гофрованих конструкцій шляхопроводу, становлять 1,65 мм, а у разі скінченно-елементного розрахунку — 1,57 мм. Збіжність результатів складає 4,8 %.

У результаті обстеження і випробування тунельного шляхопроводу на км 228+160 автомобільної дороги М03 Київ – Харків – Довжанський встановлено, що шляхопровід має великий запас несної здатності і може експлуатуватись під навантаженням, яке відповідає нормованому навантаженню НК-100.

Висновки

1. Із результатів теоретичного розрахунку тунельного шляхопроводу із металевих гофрованих конструкцій автомобільної дороги Київ – Харків – Довжанський встановлено, що максимальні напруження при завантаженні шляхопроводу чотирма автосамоскидами IVECO вагою по 38 т становлять 71,59 МПа, а величина коефіцієнта пластичного шарніра за заданого навантаження становить 0,199, що складає запас несної здатності шляхопроводу до 80 %.

2. Встановлено, що схема завантаження шляхопроводу автосамоскидами незначно впливає на величину напружень, які виникають у склепінні металевих гофрованих конструкцій. Різниця напружень, отриманих при завантаженні шляхопроводу одним автосамоскидом, у порівнянні з чотирма становить до 15 %. Дані результати пояснюються ефективним розподілом навантажень від транспортних засобів у ґрунтовій засипці споруд із металевих гофрованих конструкцій.

3. Експериментальними дослідженнями встановлено, що при завантаженні шляхопроводу із МГК на 81 % від нормативного навантаження чотирма автосамоскидами IVECO, максимальні напруження становлять 4,2 МПа, а максимальні теоретичні напруження, отримані за допомогою

аналітичної методики — 4,61 МПа (збіжність 8,9 %), та методом скінченних елементів — 4,77 МПа (збіжність 11,9 %). Тому удосконалена аналітична методика пропонується до практичного застосування під час оцінювання несучої здатності транспортних споруд із металевих гофрованих конструкцій.

Список літератури

1. Компанія ViaCon. URL: <http://viacon.ua/gallery.html> (дата звернення: 20.04.2020).
2. Коваль П. М., Бабяк І. П., Сітдикова Т. М. Нормування при проектуванні і будівництві споруд з металевих гофрованих конструкцій. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. Дніпропетровськ, 2010. №39. С.114–117.
3. Металлические гофрированные конструкции: достоинства и перспективы. *Евразия Вести. Транспортная газета*. Москва, 2008. № 2.
4. ARMTEG/Gonsiraction Products; 15 Campbell Road, P:0; Box3000, Ontario, N1H6P2.
5. Fracasso. Catalogo Generale. Metalmeccanica Fracasso SpA, Italy, MOD.301/1000/3.2001/LP.
6. Алтунин В. И., Черных О.Н., Федотов М. В. Водопропускные сооружения транспортных магистралей из металлических гофрированных структур Москва, 2016. 304 с.
7. Свечников В.А. Совершенствование конструкций мостовых сооружений из металлических гофрированных элементов с применением армогрунтовых систем: дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2015. 139 с.
8. Ковальчук В. В. Основні засади розрахунку металевих гофрованих конструкцій методом скінченних елементів при взаємодії з ґрунтовою засипкою. *Вісник ОДАБА*. Одеса, 2014. Вип. № 56. С. 94–102.
9. Стасюк Б. М., Станкевич В. З., Ковальчук В. В., Лучко Й. Й. Дослідження напружено-деформованого стану металевих гофрованих конструкцій при взаємодії з ґрунтом засипки. *Збірник наук. праць Дніпропетровського нац. ун-ту залізн. транспорту ім. академ. В. Лазаряна «Мости та тунелі: Теорія, дослідження, практика»*. Дніпропетровськ, 2014. Вип. 5. С. 105–111.
10. Ковальчук В. В. Скінченно-елементний розрахунок напружено-деформованого стану металевих гофрованих конструкцій при взаємодії із ґрунтом засипки у програмному середовищі NX NASTRAN. *Вісник Львівського національного аграрного університету*. Львів, 2015. № 16. С. 19–25.
11. Ковальчук В. В. Перспективи застосування металевих гофрованих конструкцій на залізничних та автомобільних дорогах України. *Науково-практичний журнал «Залізничний транспорт України»*. Київ, 2015. № 2 (111). С. 32–37.
12. Ковальчук В. В. Характер зміни величини тиску на вершину металевої гофрованої труби у залежності від висоти засипки над нею при дії рухомого складу залізниць. *Збір. наук. праць «Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди»*. Рівне, 2015. № 30. С. 441–447.
13. Ковальчук В. В. Вплив товщини гофрованого елемента на напружено-деформований стан металевих гофрованих конструкцій. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна «Наука та прогрес транспорту»*. Дніпропетровськ, 2015. Вип. 3 (57). С. 199–207. DOI: <http://dx.doi.org/10.15802/stp2015/46079> (дата звернення: 20.04.2020).
14. Ковальчук В. В. Напружено-деформований стан залізобетонних труб, підсилених металевою гофрованою трубою, при взаємодії із ґрунтовою засипкою. *Вісник ОДАБА*. Одеса, 2015. Вип. 58. С. 176–185.

15. Лучко Й. Й., Ковальчук В. В., Набоченко О. С. Дослідження несучої здатності металеві гофрованої конструкції за критерієм розвитку пластичного шарніру. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна «Наука та прогрес транспорту»*. Дніпропетровськ, 2015. Вип. 5 (59). С. 180–194.

16. Luchko Josef, Kovalchuk Vitalii Methods of assessing the bearing capacity of corrugated metal structures. *Вісник Тернопільського національного технічного університету*. 2016. № 3 (83). С. 79–90.

17. V. Kovalchuk, J. Luchko, I. Bondarenko, R. Markul, B. Parneta Research and analysis of the stressed-strained state of metal corrugated structures of railroad tracks. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Kharkov, 2016. N 6/7 (84). P. 4–10. DOI: <http://dx.doi.org/10.15587/1729-4061.2016.84236> (дата звернення: 20.04.2020).

18. Лучко Й. Й., Ковальчук В. В., Ковальчук Ю. Є. Напружено-деформований стан металевих гофрованих конструкцій при взаємодії із ґрунтом засипки. *Вісник національного університету «Львівська політехніка»*. Серія: Теорія і практика будівництва. Львів, 2017. № 877. С. 131–136.

19. Kovalchuk V. The study of strength of corrugated metal structures of railroad tracks / V. Kovalchuk, R. Markul, O. Bal, A. Milyanych, A. Pentsak, B. Parneta, O. Gajda. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Kharkov, 2017. N 2/7 (86). P. 18–25. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.96549> (дата звернення: 20.04.2020).

20. Kovalchuk V. Study of the stress-strain state in defective railway reinforced concrete pipes restored with corrugated metal structures. V. Kovalchuk, R. Markul, A. Pentsak, B. Parneta, O. Gajda, S. Braichenko. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Kharkov, 2017. N 5/1 (89). P. 37–44. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.109611> (дата звернення: 20.04.2020).

21. Kovalchuk Vitalii. Estimation of carrying capacity of metallic corrugated structures of the type multiplate mp 150 During interaction with backfill soil. Vitalii Kovalchuk, Yuri Kovalchuk, Mykola Sysyn, Volodymyr Stankevych, Oleksiy Petrenko. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Kharkov, 2018. N 1/1 (91). P. 18–26. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.123002> (дата звернення: 20.04.2020).

22. Luchko Josef. Investigation of influence of the metal corrugated pipe diameter on its stress-strain state / Josef Luchko, Vitalii Kovalchuk, Ivan Kravets. *Вісник Тернопільського національного технічного університету*. 2018. № 3 (91). P. 26–35.

23. Kovalchuk Vitalii. Study of the temperature field and the thermos-elastic state of the multilayer soil-steel structure. Vitalii Kovalchuk, Yuriy Hnativ, Joseph Luchko, Mykola Sysyn. *Drogi i Mosty*. 19 (2020) 65–78. DOI: <http://dx.doi.org/10.7409/rabdim.020.004> (дата звернення: 20.04.2020).

24. Luchko J.J. Experimental researches of temperature distribution on surfaces of transport facilities from metal corrugated structures / J.J. Luchko, V.V. Kovalchuk, I.B. Kravets, V.S. Dzhus. *ODABA Bulletin*. Odessa, 2019. Issue № 76. P. 52–62. (Лучко Й. Й. Експериментальні дослідження розподілу температур на поверхнях транспортних споруд із металевих гофрованих конструкцій. Й. Й. Лучко, В. В. Ковальчук, І. Б. Кравець, В. С. Джус. *Вісник ОДАБА*. Одеса, 2019. Вип. № 76. С. 52–62.

25. Nabochenko O. Studying the railroad track geometry deterioration as a result of an uneven subsidence of the ballast layer. O. Nabochenko, M. Sysyn, V. Kovalchuk, Yu. Kovalchuk, A. Pentsak, S. Braichenko. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Kharkov, 2019. N 1/7(97). P. 50–59. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.154864> (дата звернення: 20.04.2020).

26. Gera B. A study of the effects of climatic temperature changes on the corrugated structure of a culvert of a transportation facility. B. Gera, V. Kovalchuk. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Kharkov, 2019. N 3/7(99). P. 26–35. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.168260> (дата звернення: 20.04.2020).

27. Sysyn M. P. Die Tragfähigkeit von Eisenbahndurchlässen in Abhängigkeit von der Bauausführung und der Instandhaltung. M. P. Sysyn, W. W. Kowaltschuk, O. S. Nabotschenko, Ulf Gerber. *ETR. Eisenbahntechnische Rundschau*. Euralpres, Deutschland, 2016. Vol. 5. S. 39–44.

28. Gerber U. Assessment of the load-carrying capacity of flexible metal culverts with residual deformations on the Ukrainian Railways. U. Gerber, M. P. Sysyn, V. V. Kovalchuk, O. S. Nabochenko. *Věda a výzkum pro práce na železniční dopravní cestě*. 2016. P. 188–191.
29. ДБН В.1.2-15:2009 Мости та труби. Навантаження і впливи. Київ, 2009. 84 с. (Інформація та документація).
30. ВБН В.2.3-218-198:2007 Споруди транспорту. Проектування та будівництво споруд із металевих гофрованих конструкцій на автомобільних дорогах загального користування. Київ, 2007. (Інформація та документація).
31. Посібник до ВБН В.2.3-218-198:2007 Споруди транспорту. Проектування та будівництво споруд із металевих гофрованих конструкцій на автомобільних дорогах загального користування. Київ, 2007. 122 с. (Інформація та документація).
32. Звіт з обстеження та випробування тунельного шляхопроводу із металевих гофрованих конструкцій на км 228+160 автомобільної дороги М-03 Київ–Харків–Довжанський. Київ, 2015. 124 с. (Інформація та документація).
33. ДБН В.2.3-14-2006 Мости та труби. Правила проектування. Київ, 2006. – 217 с. (Інформація та документація).
34. ДБН В.2.3-22:2009 Мости та труби. Основні вимоги проектування. Київ, 2009. 73 с. (Інформація та документація).
35. ДБН В.2.3-6:2009 Мости та труби. Обстеження і випробування. Київ, 2009. 49 с. (Інформація та документація).
36. ДСТУ-Н Б.В.2.3-23:2009 Споруди транспорту. Настанова з оцінювання і прогнозування технічного стану автодорожніх мостів. Київ, 2009. 54 с.
37. ДБН В.2.3-20-2008 Мости та труби. Виконання та приймання робіт. Київ, 2008. 102 с. (Інформація та документація).
38. Pettersson L. Fatigue design of soil steel composite bridges. L. Pettersson, J. Leander, L. Hansing. *Archives of institute of civil engineering*. 2002. Nr. 12. P. 237–242.
39. BSK 99 Boverkets handbok om stålkonstruktioner, Boverket, 1999. (In Swedish, The National Board of Housing, Building and Planning: Design standard for steel structures).
40. Kloppel K. Theoretische und experimentelle Untersuchungen zu den Traglastproblemen beigewiecher, in die Erde eingebetteter Rohre. K. Kloppel, D. Glock. *Veröffentlichung des Instituts Statik und Stahlbau der Technischen Hochschule Darmstadt*. 3/1979, H-10.
41. Wysokowski A. Mostowe konstrukcje gruntowo-powłokowe. Laboratoryjne badania niszczące. A. Wysokowski, L. Janusz. *Awarie w czasie budowy i eksploatacji: XXIII konferencja naukowo-techniczna*. Szczecin, 2007. S. 541–550.

References

1. ViaCon. URL: <http://viacon.ua/gallery.html> (Last accessed: 20.04.2020) [in Ukrainian].
2. Koval P. M. Normuvannya pry proektuvanni i budivnytstvi sporud z metalovykh hofrovanykh konstrukttsii (Standardization during design and construction of facilities made of metal corrugated structures). *Visnik Dnipropetrovs'kogo nacional'nogo universitetu zaliznynogo transportu*. Dnipropetrovsk, 2010. № 39. P. 114–117. [in Ukrainian].
3. Metallicheskie gofrirovannyye konstrukttsii: dostoinstva i perspektivy (Metal corrugated structures: advantages and prospects). *Eurasia Vesti. Transport newspaper*. Moscow, 2008. N 2. [in Russian].
4. RMTEG/Gonsiraction Products; 15 Campbell Road, P:0; Box3000, Ontario, N1H6P2 [in English].

5. Fracasso. Catalogo Generale. Metalmeccanica Fracasso SpA, Italy, MOD.301/1000/3.2001/LP [in English].
6. Altunin V. I. Vodopropusknyie sooruzheniya transportnyih magistraley z metallicheski hgofrirovanyih struktur (Culverts of transport highways from metal corrugated structures). V. I. Altunin, O. N. Chernykh, M. V. Fedotov. Moscow, MADI, 2016. 304 p. [in Russian].
7. Svechnikov V.A. Sovershenstvovanie konstruktivnykh mostovykh i hsooruzheniy z metallicheski hgofrirovanyih elementov s primeneniem armogruntovyih sistem (Perfection of bridge designs from metal corrugated elements with application of reinforced soil systems): PhD Thesis. Moscow, 2015. 139 p. [in Russian].
8. Kovalchuk V.V. Osnovni zasady rozrakhunku metalevykh hofrovanykh konstruktivnykh metodom skinchenykh elementiv pry vzaiemodii z gruntovoiu zasypkoiu (Basic principles of calculation of metal corrugated structures by the method of finite elements at the interaction with the soil backfill). *Visnyk Odeskoi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury*. Odessa, 2014. N 56. P. 94–102. [in Ukrainian].
9. Stasiuk B.M. Doslidzhennia napruzhenno-deformovanoho stanu metalevykh hofrovanykh konstruktivnykh pry vzaiemodii z gruntom zasypky (Investigation of the stress-strain state of metal corrugated structures at the interaction with the soil backfill). B.M. Stasiuk, V.Z. Stankevych, V.V. Kovalchuk, J.J. Luchko. *Collection of Scientific works of Dnipropetrovsk National University of railway transport named after Academician V. Lazarian «Bridges and tunnels: Theory, research, practice*. Dnipropetrovsk, 2014. Issue 5. P. 105–111. [in Ukrainian].
10. Kovalchuk V.V. Skinchenno-elementnyi rozrakhunok napruzhenno-deformovanoho stanu metalevykh hofrovanykh konstruktivnykh pry vzaiemodii iz gruntom zasypky u prohramnomu seredovyschi NX NASTRAN (Finite element calculation of the stress-strain state of metal corrugated structures at the interaction with the soil backfill in the software environment NX NASTRAN). *Bulletin of Lviv National Agrarian University*. Lviv, 2015. № 16. P. 19–25. [in Ukrainian].
11. Kovalchuk V.V. Perspektyvy zastosuvannya metalevykh hofrovanykh konstruktivnykh na zaliznychnykh ta avtomobilnykh dorohakh Ukrainy (Prospects of the use of metal corrugated structures on railways and highways of Ukraine). *Scientific and practical journal «Railway Transport of Ukraine»*. Kyiv, 2015. N 2 (111). P. 32–37. [in Ukrainian].
12. Kovalchuk V.V. Kharakter zminy velychyny tysku na vershynu metalevoi hofrovanoi truby u zalezhnosti vid vysoty zasypky nad neiu pry dii rukhomoho skladu zaliznyts (The nature of the change in the pressure on the top of the metal corrugated culvert depending on the height of the backfill above it under the impact of railway rolling stock). *Collection of Scientific works «Resource-saving materials, structures, buildings and structures»*. Rivne, 2015. № 30. P. 441–447. [in Ukrainian].
13. Kovalchuk V. V. Vplyv tovshchyny hofrovanooho elementa na napruzhenno-deformovanyi stan metalevykh hofrovanykh konstruktivnykh (Impact of corrugated element thickness on stress-strain state of metal corrugated structures). *Bulletin of Dnipropetrovsk National University of railway transport named after Academician V. Lazarian «Science and progress of transport»*. Dnipropetrovsk, 2015. N 3 (57). P. 199–207. DOI: <http://dx.doi.org/10.15802/stp2015/46079> (Last accessed: 20.04.2020) [in Ukrainian].
14. Kovalchuk V.V. Napruzhenno-deformovanyi stan zalizobetonnykh trub, pidsylenykh metalevoiu hofrovanoi truboiu, pry vzaiemodii iz gruntovoiu zasypkoiu (Stress-strain state of reinforced concrete culverts reinforced with metal corrugated culvert at the interaction with the soil backfill). *Visnik Dnipropetrovs'kogo nacional'nogo universitetu zaliznicnogo transportu*. Odessa, 2015. Issue 58. P. 176-185. [in Ukrainian].
15. Luchko J.J. Doslidzhennia nesuchoi zdatnosti metalevoi hofrovanoi konstruktivnykh za kryteriiem rozvytku plastychnoho sharniru (Investigation of the bearing capacity of a metal corrugated structure according to the criterion of plastic hinge development). *Bulletin of Dnipropetrovsk National*

University of railway transport named after Academician V. Lazarian «Science and progress of transport». Dnipropetrovsk, 2015. N 5 (59). P. 180–194. [in Ukrainian].

16. Luchko Josef. Methods of assessing the bearing capacity of corrugated metal structures. Josef Luchko, Vitalii Kovalchuk. *Visnik Ternopil's'kogo nacional'nogo tehničnogo unіversitetu.* Ternopil, 2016. N 3 (83). P. 79–90. [in English].

17. Kovalchuk V. Research and analysis of the stressed-strained state of metal corrugated structures of railroad tracks. V. Kovalchuk, J. Luchko, I. Bondarenko, R. Markul, B. Parneta. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* Kharkov, 2016. N 6/7 (84). P. 4–10. DOI: <http://dx.doi.org/10.15587/1729-4061.2016.84236> (Last accessed: 20.04.2020) [in English].

18. Luchko J.J. Napruzhenno-deformovanyi stan metalevykh hofrovanykh konstruktsii pry vzaiemodii iz gruntom zasypky (The stress-strain state of metal corrugated structures at the interaction with the soil backfill). *Visnik Nacional'nogo unіversitetu "L'viv's'ka politehnika". Seriâ: Teoriâ i praktika budivnictva.* Lviv, 2017. № 877. P. 131–136. [in Ukrainian].

19. Kovalchuk V. The study of strength of corrugated metal structures of railroad tracks. V. Kovalchuk, R. Markul, O. Bal, A. Milyanych, A. Pentsak, B. Parneta, O. Gajda // *Eastern-European journal of enterprise technologies.* Kharkov, 2017. N 2/7 (86). P. 18–25. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.96549> (Last accessed: 20.04.2020) [in English].

20. Kovalchuk V. Study of the stress-strain state in defective railway reinforced concrete pipes restored with corrugated metal structures. V. Kovalchuk, R. Markul, A. Pentsak, B. Parneta, O. Gajda, S. Braichenko. *Eastern-European journal of enterprise technologies.* Kharkov, 2017. N 5/1 (89). P. 37–44. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.109611> (Last accessed: 20.04.2020) [in English].

21. Kovalchuk Vitalii. Estimation of carrying capacity of metallic corrugated structures of the type multiplate mp 150 During interaction with backfill soil. Vitalii Kovalchuk, Yuri Kovalchuk, Mykola Sysyn, Volodymyr Stankevych, Oleksiy Petrenko. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* Kharkov, 2018. N 1/1 (91). P. 18–26. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.109611> (Last accessed: 20.04.2020) [in English].

22. Luchko Josef. Investigation of influence of the metal corrugated pipe diameter on its stress-strain state. Josef Luchko, Vitalii Kovalchuk, Ivan Kravets. *Visnik Ternopil's'kogo nacional'nogo tehničnogo unіversitetu.* 2018. N 3 (91). P. 26–35 [in English].

23. Kovalchuk Vitalii. Study of the temperature field and the thermos-elastic state of the multilayer soil-steel structure / Vitalii Kovalchuk, Yuri Hnativ, Joseph Luchko, Mykola Sysyn. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty.* N 19 (2020). P. 65–78. DOI: <http://dx.doi.org/10.7409/rabdim.020.004> (Last accessed: 20.04.2020) [in English].

24. Luchko Y. Y. Eksperymentalni doslidzhennia rozpodilu temperatur na poverkhniakh transportnykh sporud iz metalevykh hofrovanykh konstruktsii (Experimental researches of temperature distribution on surfaces of transport facilities from metal corrugated structures). Y. Y. Luchko, V. V. Kovalchuk, I. B. Kravets, V. S. Dzhus. *Visnyk Odeskoi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury.* Odesa, 2019. N 76. P. 52–62. [in Ukrainian].

25. Nabochenko O. Studying the railroad track geometry deterioration as a result of an uneven subsidence of the ballast layer. O. Nabochenko, M. Sysyn, V. Kovalchuk, Yu. Kovalchuk, A. Pentsak, S. Braichenko. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* Kharkov, 2019. N 1/7(97). P. 50-59. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.154864> (Last accessed: 20.04.2020) [in English].

26. Gera B. A study of the effects of climatic temperature changes on the corrugated structure of a culvert of a transportation facility. B. Gera, V. Kovalchuk. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* Kharkov, 2019. N 3/7(99). P. 26–35. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.168260> (Last accessed: 20.04.2020) [in English].

27. Sysyn M. P. Die Tragfähigkeit von Eisenbahndurchlässen in Abhängigkeit von der Bauausführung und der Instandhaltung. M. P. Sysyn, W. W. Kowaltschuk, O. S. Nabotschenko, Ulf Gerber. *ETR. Eisenbahntechnische Rundschau*. Euralpres, Deutschland, 2016. N 5. P. 39–44 [in German].
28. Gerber U. Assessment of the load-carrying capacity of flexible metal culverts with residual deformations on the Ukrainian Railways. U. Gerber, M. P. Sysyn, V. V. Kovalchuk, O. S. Nabochenko. *Věda a výzkum pro práce na železniční dopravní cestě*. 2016. P. 188–191. [in English].
29. State Building Norms (DBN V.1.2-15: 2009) Mosty ta truby. Navantazhennia i vplyvy (Bridges and culverts. Loads and impacts). Kyiv, 2009. 84 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
30. Departmental building standards of Ukraine (VBN V.2.3-218-198:2007) Sporudy transportu. Proektuvannia ta budivnytstvo sporud iz metalevykh hofrovanykh konstruksii na avtomobilnykh dorohakh zahalnoho korystuvannia (Transport facilities. Design and construction of facilities made of corrugated metal structures on public roads). Kyiv, 2007. (Information and documentation) [in Ukrainian].
31. Posibnyk do VBN V.2.3-218-198:2007 Sporudy transportu. Proektuvannia ta budivnytstvo sporud iz metalevykh hofrovanykh konstruksii na avtomobilnykh dorohakh zahalnoho korystuvannia (Manual to VBN V.2.3-218-198:2007 Transport facilities. Design and construction of facilities made of corrugated metal structures on public roads). Kyiv, 2007. 122 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
32. Zvit z obstezhennia ta vyprobuvannia tunelnogo shliakhoprovodu iz metalevykh hofrovanykh konstruksii na km 228+160 avtomobilnoi dorohy M-03 Kyiv–Kharkiv–Dovzhanskyi (Report on inspection and testing of the tunnel overpass made of corrugated metal structures at km 228 + 160 of the highway M-03 Kyiv – Kharkiv – Dovzhanskyi). 2015. 124 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
33. State Building Norms (DBN V.2.3-14:2006) Mosty ta truby. Pravyla proektuvannia (Bridges and pipes. Design rules). Kyiv, 2006. 217 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
34. State Building Norms (DBN V.2.3-22:2009) Mosty ta truby. Osnovni vymohy proektuvannia (Bridges and pipes. Basic design requirements). Kyiv, 2009. 73 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
35. State Building Norms (DBN V.2.3-6:2009) Mosty ta truby. Obstezhennia i vyprobuvannia (Bridges and pipes. Inspection and tests). Kyiv, 2009. 49 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
36. State Standard of Ukraine (DSTU-N BV.2.3-23:2009) Sporudy transportu. Nastanova z otsiniuvannia i prohnozuvannia tekhnichnoho stanu avtodorozhnykh mostiv (Transport facilities. Guidelines for assessing and forecasting the technical condition of road bridges). Kyiv, 2009. 54 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
37. State Building Norms (DBN V.2.3-20-2008) Mosty ta truby. Vykonannia ta pryimannia robit (Bridges and pipes. Fullfilment and acceptance of works). Kyiv, 2008. 102 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
38. Pettersson L. Fatigue design of soil steel composite bridges. L.Pettersson, J. Leander, L. Hansing. *Archives of institute of civil engineering*. 2002. N 12. P. 237–242. [in English].
39. BSK 99 Boverkets handbok om stålkonstruktioner, Boverket, 1999. (In Swedish, The National Board of Housing, Building and Planning: Design standard for steel structures) [in English].
40. Kloppel K. Theoretische und experimentelle Untersuchungen zu den Traglastproblemen beigewiecher, in die Erde eingebetteter Rohre. K. Kloppel, D. Glock. *Veroffentlichung des Instituts Statik und Stahlbau der Technischen Hochschule Darmstadt*. 3/1979, H-10. [in German].
41. Wysokowski A. Mostowe konstrukcje gruntowo–powlokowe. Laboratoryjne badania niszczone. A. Wysokowski, L. Janusz. *Awarie w czasie budowy i eksploatacji: XXIII konferencja naukowo-techniczna*. Szczecin, 2007. S. 541–550. [in Poland].

Vitalii Kovalchuk,¹ Ph.D., <https://orcid.org/0000-0003-4350-1756>

Petro Koval,² Ph.D., Prof., <https://orcid.org/0000-0002-0040-5900>

Maksym Koval,³ Ph.D., <https://orcid.org/0000-0003-1244-1738>

¹Lviv Branch of Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lviv, Ukraine

²National Academy of Fine Arts and Architecture, Kiev, Ukraine

³Scientific –industrial enterprise «Triada» Ltd., Co, Lviv, Ukraine

**METHODS OF TUNNEL INSPECTION AND
TESTING OF METAL CORRUGATED STRUCTURES
AT KM 228 + 160 OF KYIV-KHARKIV-DOVZHANSKY HIGHWAY**

Abstract

Introduction. Brief information on manufacturers of metal corrugated structures in Ukraine and abroad is presented. Examples of transport structures made of metal corrugated structures (MCS) are presented. The necessity of improvement of the regulatory base of Ukraine as for calculation, inspection and testing of transport constructions made of metal corrugated structures is substantiated.

Problem statement. Experience in operating corrugated metal structures indicates that, in some cases, they do not have a standardized service life, which should correspond to the design durability. When operating, constructions with MCSs are prone to the formation of residual deformations in structure cross-section, which affects their bearing capacity. In order to prevent these damages, it is necessary to carry out inspections and testing of such transport facilities. This, in turn, requires the development of reliable analytical methods for assessing the load-bearing capacity of transport constructions made of corrugated metal structures when interacting with soil compaction backfill, and the improvement of experimental methods for these structure testing for static and dynamic loads.

Purpose. The purpose of the work is to develop analytical and experimental methods for assessing the load-bearing capacity of a transport structure made of metal corrugated structures, which is operated in the body of a highway embankment, during its examination and testing.

Results. The program of inspection and testing of a tunnel underpass made of metal corrugated structures on the highways of Ukraine is offered. The analytical method of estimation of load-bearing capacity of metal corrugated structures of an underpass under the influence of static loads from motor vehicles is presented, and the stress distribution in the structures at different combinations of tunnel underpass loading is obtained. The load-bearing capacity of metal corrugated structures was evaluated by the finite element method. The technique of experimental testing of a tunnel underpass made of corrugated metal structures is offered and full-scale experimental tests of an underpass for static loads are conducted.

Conclusions. The difference between the stresses obtained by loading the underpass with one and four dump trucks is up to 15 %, which leads to the conclusion that the load distribution angle is less than 45 degrees. Therefore, such structures can be used under multi-lane highways or multi-lane railways, provided that the height of the soil backfill is greater than 2.0 m. The reserve capacity of the tunnel underpass is 80 %.

Key words: test, corrugated metal structure, stress-strain state, bearing capacity, transport structure.