

УДК 624.014.27-422.12.13

DOI: 10.15587/1729-4061.2016.84236

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА АНАЛІЗ НАПРУЖЕНО- ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ МЕТАЛЕВИХ ГОФРОВАНИХ КОНСТРУКЦІЙ ЗАЛІЗНИЧНИХ КОЛІЙ

В. В. Ковальчук

Кандидат технічних наук*

E-mail: kovalchuk.diit@mail.ru

Й. Й. Лучко

Доктор технічних наук, професор*

E-mail: luchko.diit@mail.ru

І. О. Бондаренко

Кандидат технічних наук, доцент**

E-mail: irina_bondarenko@ua.fm

Р. В. Маркуль

Кандидат технічних наук**

E-mail: guaranga_mr@mail.ru

Б. З. Парнета

Кандидат технічних наук, доцент

Кафедра «Будівельне виробництво»

Національний університет Львівська політехніка

вул. С. Бандери, 12, м. Львів, Україна, 79013

E-mail: f_termit@yahoo.com

*Кафедра «Рухомий склад і колія»

Львівська філія Дніпропетровського національного університету

залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна

вул. І. Блажкевич, 12 а, м. Львів, Україна, 79052

**Кафедра «Колія та колійне господарство»

Дніпропетровський національний університет залізничного

транспорту ім. академіка В. Лазаряна

вул. Лазаряна, 2, м. Дніпро, Україна, 49010

Проведено дослідження та аналіз несучої здатності металевих гофрованих конструкцій залізничної колії. Виконано розрахунок еквівалентних сил, які виникають від рухомого складу залізниць. Встановлено, що накопичення залишкових деформацій склепіння труби у часі може вплинути на появу текучості матеріалу металевих гофрованих конструкцій, а це, у свою чергу, може призвести до утворення пластичного шарніру металу труби

Ключові слова: металева гофрована конструкція, товщина металевої гофрованої труби, еквівалентні сили, динамічне навантаження, напруження

Проведено исследование и анализ несущей способности металлических гофрированных конструкций железнодорожного пути. Выполнен расчет эквивалентных сил, возникающих от подвижного состава железных дорог. Установлено, что накопление остаточных деформаций свода трубы во времени может повлиять на появление текучести материала металлических гофрированных конструкций, а это, в свою очередь, может привести к образованию пластического шарнира металла трубы

Ключевые слова: металлическая гофрированная конструкция, толщина металлической гофрированной трубы, эквивалентные силы, динамическая нагрузка, напряжение

1. Вступ

У процесі експлуатації металевих гофрованих конструкцій (МГК) зафіксовані наступні дефекти: просідання склепіння труби, надлишкові деформації вертикального та горизонтально діаметрів труби, викривлення металу поблизу болтових з'єднань, корозія металу труби, тощо.

При спостереженні за поведінкою металевої гофрованої труби у процесі експлуатації [1, 2] виявилось, що вони мають незатухаючий характер. Так, аналіз інтенсивності накопичення залишкових деформацій за один рік служби металевої гофрованої труби показав, що відносні деформації труби не збільшуються, а поступово зменшуються.

Проведені дослідження спрямовані на встановлення причин появи таких дефектів, є необхідними

та актуальними на сьогоднішній день. Відповідний моніторинг дозволить прийняти своєчасні інженерні рішення для підвищення несучої здатності МГК.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Світова практика проектування і експлуатації металевих гофрованих конструкцій показує, що вирішальний вплив на напружено-деформований стан МГК має ступінь ущільнення ґрунтової засипки [1–3]. Рекомендоване ущільнення повинно сягати ступеня 0,95–0,97. Разом з тим, у роботі [1] зазначено, що зниження ущільнення ґрунту навіть з 0,95 до 0,8 призводить до зменшення модуля деформації ґрунту у 4 рази, що, у свою чергу, є причиною значного зростання у стінках конструкції напружень і деформацій.

Проведення багаторічного моніторингу понад 900 об'єктів з гофрованих труб, збудованих протягом 1951–1965 рр. в штаті Огайо (США) [4, 5] дозволило зробити наступний висновок: у всіх випадках для конструкцій, які не зазнали руйнувань, великі деформації становили 22–34 %; для конструкцій, які зазнали руйнувань, такі деформації сягали 45–55 %. Дані дослідження однозначно довели, що причиною надмірних деформацій було недостатнє ущільнення ґрунту, або використання для засипки невластивого типу матеріалу. За даними [6–8], якщо деформації перебувають в межах 15–20 %, а висота шару над трубою більша за 1,8 м, то конструкція не вимагає для свого зміцнення додаткових заходів.

Розширення області застосування МГК не має достатнього наукового і нормативного забезпечення. Наявні нормативні документи [3, 9, 10] відносяться тільки до круглих труб діаметром до 3 м і засновані на розрахунковому аналізі деформацій труб при спрощених гіпотезах про тиск ґрунту на трубу.

Таким чином, досвід застосування МГК в ґрунтовому середовищі переконливо показав, що розглянуті конструкції при їх позитивних властивостях характеризуються відносно низькою надійністю і довговічністю. У процесі експлуатації у багатьох випадках спостерігається зростання недопустимих деформацій, а саме збільшення горизонтального та зменшення вертикального діаметрів труби. Для виключення недопустимих деформацій труб необхідно у подальшому розвинути методи розрахунку МГК, які працюють спільно з ґрунтом засипки, що дозволяють прогнозувати міцність і довговічність МГК.

При розрахунку МГК відомо ряд методик. До відомих методик оцінки несучої здатності труб відноситься методика взаємодії труб із ґрунтом, яку запропонували Duncan і Drawsky [11]. Методика розроблена на підставі багаторічних досліджень інженерних споруд, проведених на моделях спостережень та виконаних числових розрахунків методом скінченних елементів. У даній методиці враховано як вплив стискуєчих сил, так і згинальних моментів на стінки конструкції, та нелінійні напруження і деформації ґрунту. Показано, що підвищення жорсткості ґрунту (модуля деформації) зменшує вплив згинальних моментів на напружено-деформований стан конструкції. Тому у методиці враховано дві фази роботи конструкції:

- 1) фаза монтажу, коли засипка досягла верху труби;
- 2) кінцева фаза, коли засипка досягла проектної висоти.

За критерій роботоздатності взято недопущення початку пластичних деформацій у стінках труби. Це досягнуто введенням у розрахунки відповідного коефіцієнта запасу. Проте у даній методиці розрахунки проводяться для труб малого діаметру, тільки до 3 м.

Методика Vaslestada [12] запропонована для конструкцій великих поперечних перерізів. За якою можна оцінити несучу здатність стінок труби на стиск та деформацію верху конструкції під час укладання та ущільнення засипки та вплив тертя ґрунту на величину стискуєчої сили. Дана методика описує появу явища розширення конструкції під дією верхнього шару ґрунту над трубою. Проте вона враховує дію лише осьових сил, приймається, що значна частина навантажень сприймається ґрунтом.

Методики OHBDC (Ontario Highway Bridge Design Code) та CHBDC (Canadian Highway Bridge Design Code) [13], розроблені на основі американських та канадських норм проектування мостів. Ґрунтуються на припущенні домінуючої ролі осьових сил в стінках труби. Методики враховують випадок труб розімкнутого поперечного перерізу та явище розширення конструкції і вплив ступеня ущільнення ґрунту на величину модуля його деформації. Враховано також податливість конструкції, що дозволяє проектувати конструкції скринькового перерізу. У даних методах нехтується впливом згинальних моментів і враховуються лише осьові сили.

Методика AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) [14]. Американська методика розроблена відповідно до норм проектування мостів американської спілки працівників автострад і транспорту. Подібно до методики OHBDC нехтує впливом згинальних моментів і враховує лише осьові сили. Наведені розрахунки міцності швів, випучування (втрата стійкості) стінок конструкції, монтажної жорсткості, враховано можливість виникнення пластичних деформацій у стінках труби. Дає можливість досліджувати конструкції з перерізом типу рами та врахування динамічних коефіцієнтів для випадку змінних навантажень.

Одна з найновіших методик – це методика Sundquista-Pettersona [15, 16]. Ґрунтується на основі описаних вище методик та досвіду, набутого з проведених експериментів по руйнуванню конструкцій, використовує аналітичні підходи теорії пружності і геотехніки. Для оцінки несучої здатності враховує осьову силу і згинальний момент, кут внутрішнього тертя засипки та динамічне навантаження від рухомого транспортного засобу. Характеризується достатньою універсальністю і враховує податливість конструкцій з гофрованих металевих листів.

Проведений літературний аналіз показує, що оцінка несучої здатності металевих гофрованих конструкцій проводилась тільки для труб малого діаметру до 6 м. Труби великих діаметрів при граничному навантаженні від рухомого складу залізниць не досліджувались на напружено-деформований стан. Також у даних роботах відсутній аналіз несучої здатності металевих гофрованих труб у залежності від типу гофр, характеристик ґрунтів та ступеню ущільнення ґрунту при будівництві та експлуатації труб.

3. Ціль та задачі дослідження

Метою роботи є провести дослідження та аналіз несучої здатності металевих гофрованих конструкцій, які експлуатуються на залізничних коліях.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- виконати розрахунок еквівалентних сил від рухомого складу залізниць, при яких експлуатується металева гофрована труба;
- за методикою Петерсона провести багатоваріантні розрахунки напружено-деформованого стану труби із врахуванням наступних параметрів: ступіня ущільнення ґрунтового засипки, розміру типу гофр та еквівалентного навантаження від рухомого складу залізниць;
- провести перевірку умови виникнення пластичного шарніру у вершині металевої гофрованої труби.

4. Матеріали та методи дослідження впливу рухомого складу на напружено-деформований стан МГК в умовах роботи залізничних колій промислових підприємств

4.1. Формування вихідних даних щодо опису напружено-деформованого стану МГК

У роботах [2, 3] зазначено, що для оптимального проектування МГК необхідно враховувати вплив товщини металевго гофрованого листа на міцність і стійкість всієї конструкції. У результаті проведених досліджень міцності МГК арочного типу у залежності від товщини металевго гофрованого листа встановлено, що найбільший вплив товщина металевго листа має на напружений стан конструкції та вертикальні деформації МГК. Як об'єкт дослідження обрана конструкція типу горизонтальний еліпс (рис. 1).

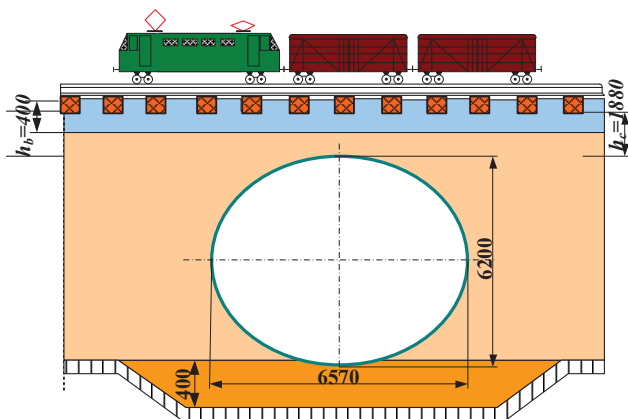


Рис. 1. Розрахункова схема до розрахунку міцності металевих гофрованих конструкцій поперечного перерізу типу горизонтальний еліпс

Основними параметрами, що впливають на НДС конструкції, є: модуль деформації ґрунту засипки, типорозмір гофра, стадійність будівництва. Для розрахунку обрані три типи гофри 150×50×6 мм, 200×55×6 мм, 380×140×6 мм при засипці над вершиною металевго гофрованої труби 1,88 м при модулі деформації ґрунту засипки 33 МПа, модулем пружності сталі – E=2,1·10⁵ МПа; коефіцієнтом Пуассона матеріалу споруди – ν=0,3.

Навантаження на МГК змінювали наступним чином: навантаження від власної ваги труби, засипки, шару щебеню та рейко-шпальної решітки залишали незмінними, показник RP (ступінь ущільнення ґрунтової засипки) приймали рівним 1,0; 0,95; 0,9. Динамічне навантаження на шпали від рухомого складу пропорційно збільшували і перераховували відповідні напруження у точках контуру перерізу труби. Розподіл навантажень по шпалах вздовж колії отримали із розрахунків колії на міцність [17].

4.2. Визначення нормальних сил на МГК

Розрахунками передбачається, що обчислюються максимальна нормальна сила і момент. Несуча здатність перевіряється з точки зору нормальної сили, так і комбінації нормальної сили й моменту за методикою Петерсона [15, 16]. Розрахунки напружено-деформованого стану металевго гофрованої конструкції проведено за допомогою методу Петерсона [15, 16].

Нормальні сили в стінках труби внаслідок p_{трафик} розраховуються наступним чином:

при h_{c,red} / D ≤ 0,25;

$$N_t = p_{трафик} + (D/2)q, \tag{1}$$

при 0,25 < h_{c,red} / D ≤ 0,75;

$$N_t = (1,25 - h_{c,red} / D)p_{трафик} + (D/2)q, \tag{2}$$

при 0,75 < h_{c,red} / D;

$$N_t = 0,5p_{трафик} + (D/2)q, \tag{3}$$

де q – розподілене навантаження від рухомого складу, власної ваги земляного полотна та елементів ВБК; D – діаметр труби.

Нормальна сила від оточуючого ґрунту визначається за формулою

$$N_j = 0,2 \frac{H}{D} \rho_1 D^2 + S_{ar} \left(0,9 \frac{h_{c,red}}{D} - 0,5 \frac{h_{c,red}}{D} \frac{H}{D} \right) \rho_{cv} D^2, \tag{4}$$

де ρ₁ – середня питома вага матеріалу засипки (до верху труби); ρ_{cv} – середня питома вага матеріалу засипки (над верхом труби до висоти h_{c,red}).

Коефіцієнт S_{ar} бере до уваги арочний ефект розподілу навантажень у ґрунті над водопропускною трубою, який виникає при великій висоті засипки:

$$S_{ar} = \frac{1 - e^{-k}}{k},$$

$$k = 2S_v \frac{h_c}{D},$$

$$S_v = \frac{0,8 \tan \phi_{cv,d}}{\left(\sqrt{1 + \tan^2 \phi_{cv,d}} + 0,45 \tan \phi_{cv,d} \right)^2}, \tag{5}$$

де φ_{cv,d} – проектний кут внутрішнього тертя ґрунту для металевгої частини труби за формулою, виходячи з параметрів запасу γ_n, γ_m та природного кута внутрішнього тертя ґрунту.

$$\tan \phi_{cv,d} = \frac{\tan \phi_{cv,k}}{\gamma_n \gamma_m}. \tag{6}$$

У формулі (6) значення γ_m, як правило, рівне 1,3. Кут внутрішнього тертя, який використовується у формулі, відноситься до ґрунту вище верху труби.

Проектні нормальні сили у стані нормальної експлуатації визначається за формулами:

$$N_{d,s} = (\psi\gamma)_{j,s} \cdot N_j + (\psi\gamma)_{t,s} \cdot N_t; \tag{7}$$

в гранично можливому стані:

$$N_{d,u} = (\psi\gamma)_{j,u} \cdot N_j + (\psi\gamma)_{t,u} \cdot N_t; \tag{8}$$

в стані довготривалих втомлювальних навантажень:

$$N_{d,f} = (\psi\gamma)_{t,f} \cdot N_t, \tag{9}$$

де $\Psi_{j,s}$, $\Psi_{j,u}$, $\Psi_{t,f}$ – коефіцієнти безпеки, що вибираються відповідно зі стандартом для відповідних граничних станів.

4. 3. Визначення згинальних моментів на МГК

Згинальний момент в стінці труби залежить від співвідношення між жорсткістю ґрунту і жорсткістю труби. Це відношення позначається через λ_f , і визначається за формулою:

$$\lambda_f = E_{jd} \cdot D^3 / (EI_s), \quad (10)$$

де E_{jd} – модуль зсуву для ґрунту; EI_s – жорсткість на згин труби.

Модуль зсуву для матеріалу ґрунту залежить від переважаючого розподілу напружень у ґрунті. Для конструкції водопропускних труб з різними матеріалами ґрунту на висоті $(h_c+H/2)$ використовується середнє значення E_{jd} при розрахунку λ_f . У спрощених розрахунках потрібно тільки значення ступеня ущільнення. Він може бути визначений із використанням методів випробувань ґрунтів: стандартного методу Проктора [16] – RP^{std} або модифікованого методу Проктора – RP^{mod} . Відношення між результатами по стандартному методу Проктора та модифікованому методу для незв'язних матеріалів приймається наступним:

$$RP^{std} = RP^{mod} + 5 \%. \quad (11)$$

Згинальний момент у трубі від оточуючого ґрунту, викликаний навантаженням ґрунту, як для межі граничного стану працездатності і в граничному стані, виражається формулою:

$$\frac{M_j}{\rho_1 D^3} = -f_1 f_3 f_{2,surr} + S_{ar} \frac{\rho_{cv}}{\rho_1} \frac{h_c}{D} \left(\frac{R_t}{R_s} \right)^{0.75} f_1 f_{2,cover}. \quad (12)$$

Рівняння (12) ґрунтується на експериментальних спостереженнях: коли при зворотній засипці ущільнення відбувається навколо пружної конструкції труби, вона стискається всередину по боках, і на вершині труби створюється негативний згинальний момент. Цей момент досягає максимуму, коли рівень заповнення досягає рівня вершини труби, що представлено першим доданком у правій частині рівняння (12). Коли заповнення продовжується далі, вище рівня вершини труби, конструкція труби стискається вниз і негативний момент знижується. Якщо висота засипки достатньо велика, то в цей час момент у вершині труби може змінювати знак і стає позитивним.

У випадку профілю, при якому $R_t/R_s \geq 1$, момент в бічних стінках труби обчислюється як $2/3$ від моменту, розрахованого за формулою (12).

Згинальний момент, що виникає від дії рухомого складу, через еквівалентне лінійне рівномірно розподілене навантаження $p_{traffik}$, розраховується наступним чином:

$$M_t = f_4^I f_4^{II} f_4^{III} f_4^{IV} D p_{traffik} + S_{ar} \left(\frac{R_t}{R_s} \right)^{0.75} f_1 f_{2,cover} q D^2, \quad (20)$$

де f_1 , $f_{2,surr}$, $f_{2,cover}$, f_3 , f_4^I , f_4^{II} , f_4^{III} , f_4^{IV} , – коефіцієнти, що розраховуються в залежності від геометричних та фізичних

характеристик ґрунтової засипки і розраховуються за методикою Петерсона [16, 17].

У випадку поперечного профілю труби, коли $R_t/R_s \geq 1$, згинальний момент в бічних сторонах труби обчислюється як $1/3$ від моменту, розрахованого за формулою (12).

Проектні згинальні моменти у трубі від ґрунту та навантаження від дії рухомого складу мають різні напрямки у різних точках поперечного перерізу. Тому для встановлення максимального варіанта суперпозиції навантажень повинні бути виконані перевірки у відповідності з наступними формулами. Проектні моменти сил в стані нормальної експлуатації визначаються відповідно до формули:

$$M_{d,s} = M_{jd,s} + M_{td,s}. \quad (21)$$

Проектні моменти сил від дії рухомого складу у гранично можливому стані визначаються відповідно до формул:

$$\begin{cases} M_{td,s}^{max} = (\psi_j)_{t,s}^{max} M_t; \\ M_{td,s}^{min} = (\psi_j)_{t,s}^{min} (-M_t / 2). \end{cases} \quad (22)$$

У гранично можливому стані проектні моменти розраховуються відповідно до формули:

$$M_{d,u} = M_{jd,s} + M_{td,u}. \quad (23)$$

У стані довготривалих втомлювальних навантажень діапазон моментів розраховується за формулою:

$$\Delta M_{d,f} = (\psi_j)_{t,f} \cdot M_t \cdot 1.5. \quad (24)$$

Далі за вище наведеним алгоритмом Петерсона розраховуємо напружено-деформований стан металеві гофрованої конструкції залізничної колії.

5. Результати досліджень напружено-деформованого стану МГК

Результати еквівалентних сил отриманих від локомотива 2М62 наведені на рис. 2. Числові розрахунки еквівалентних сил показали, що максимальні сили досягають значення до 450 кН, при наступних параметрах нерівності: довжині – 5,7 м, висоті – 44,7 мм та ухилі – 16,5 %.

Методика оцінки напружено-деформованого стану МГК була наступною: за отриманими значеннями еквівалентних сил розраховуємо максимальні напруження у стінці труби, використовуючи рівняння Нав'є:

$$\sigma = \frac{N_{d,s}}{A} + \frac{M_{d,s}}{W} < f_{yd}, \quad (25)$$

де $N_{d,s}$, $M_{d,s}$ – сили та моменти сил у стані нормальної експлуатації; A – площа поперечного перерізу та момент опору перерізу на одиницю довжини труби; f_{yd} – границя текучості сталі труби; W – момент опору одиниці довжини труби.

Відносні зміни вертикального та горизонтального діаметрів металевої гофрованої труби визначаються за формулою:

$$\zeta = \frac{\frac{\gamma(h+R)}{E}}{\frac{\delta}{R} + \frac{E_0}{E}(1-\nu^2)}, \quad (26)$$

де R – радіус споруди; E₀ – модуль деформації ґрунту засипки; E – модуль пружності сталі; δ – товщина металевої гофрованої труби; ν=0,25 – коефіцієнт Пуассона матеріалу споруди; γ – питома вага матеріалу споруди; h – висота засипки над вершиною металевої гофрованої труби рахуючи від підшови шпал (рис. 1).

Результати розрахунків напружень та величини пластичного шарніру МГК наведені у табл. 1.

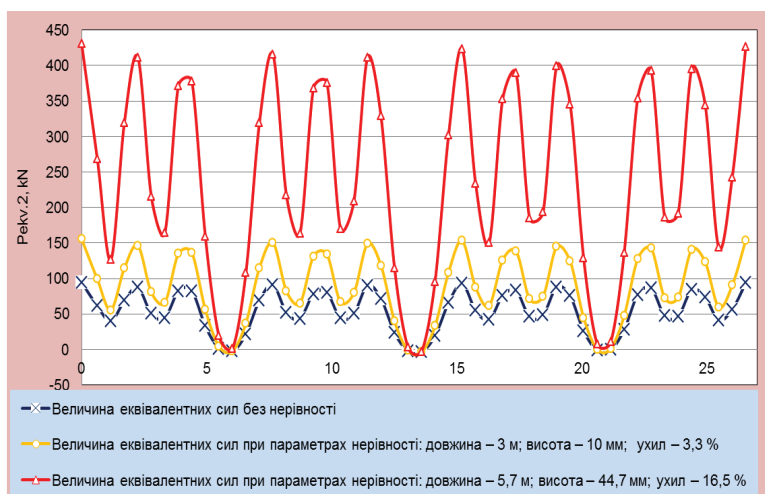


Рис. 2. Величина еквівалентних сил від локомотива 2М62 при значенні модуля пружності підрейкової основи 92,1 МПа

Отримані результати напружень показали (табл. 1), що міцність елементів МГК, яка виконана із гофрованої структури Multiplate MP150 товщиною гофрованого листа 6 мм із розміром хвиль гофрів 150×50 мм та 380×140 мм, забезпечена при ступенях ущільнення ґрунтової засипки від 0,9 до 1,0. Проте у металевої гофрованої конструкції, яка виготовлена із гофрованих листів розміром 200×55 мм при ступені ущільнення ґрунтової засипки 0,9, виникають напруження, які перевищують допустимі, що призводить до утворення пластичного шарніру величина якого рівна 1,141.

6. Обговорення результатів дослідження з метою формування оцінки стану міцності елементів МГК в умовах роботи залізничних колій

Проведені аналітичні дослідження напружено-деформованого стану, величини пластичного шарніру, поздовжніх сил та згинальних моментів, відносних деформацій МГК при взаємодії з ґрунтом засипки із врахуванням комплексу факторів – ступеня ущільнення ґрунтової засипки, величини динамічного навантаження від рухомого складу, впливу конструкції ВБК та різній товщині металевої гофрованої труби. При проектному ущільненні ґрунтової засипки, яке становить 97 % по методу Проктора, критерій міцності та допустимі вертикальні деформації МГК забезпечуються. Це пов'язане з тим, що бокові стінки металевої труби мають достатній опір проти горизонтальних деформацій. Проте при ущільненні ґрунтової засипки нижче 90 % перевірка утворення пластичного шарніру металевої труби не забезпечується.

Аналіз несучої здатності МГК за наведеною методикою надає можливість оцінити працездатність МГК у залежності від типу розмірів гофр труби та фізико-механічних характеристик ґрунту засипки. Також використання даної методики дозволяє визначити, при яких геометричних, силових та швидкісних параметрах рухомого складу можлива втрата несучої здатності металевих гофрованих конструкцій.

Отже, отримані результати підтверджують, що при проектуванні МГК необхідно забезпечити коефіцієнт ущільнення ґрунтової засипки не нижче 95 %. Отримані результати несучої здатності МГК можуть бути використані інженерами Мостовипробувних станцій Укрзалізниці та Укравтодору та проектними організаціями, з метою подальшого проектування металевих гофрованих конструкцій.

Визначений напружено-деформований стан МГК надає межі формування нормативної бази з надійності транспортних споруд залізниць із врахуванням комплексу вихідних факторів впливу на їх несучу здатність.

Таблиця 1

Результати розрахунку нормальних напружень та відносних деформацій МГК

№ п/п	Досліджувані параметри		Ступінь ущільнення	Розмір типу гофри		
				150×50×6	200×55×6	380×140×6
1	Напруження, МПа		0,9	235,815	256,756	232,592
			0,95	175,196	191,722	200,526
			1,0	117,744	130,048	169,709
2	Поздовжні сили, кН/м	На вершині МГТ, кН/м	0,9	138,483	138,541	141,618
			0,95	146,497	146,551	149,427
			1,0	154,595	154,644	157,269
	По сторонах МГТ, кН/м	0,9	71,268	71,268	71,268	
		0,95	75,227	75,227	75,227	
		1,0	79,186	79,186	79,186	
3	Згинальні моменти, кНм/м	На вершині МГТ, кН м/м	0,9	4,405	4,407	8,384
			0,95	4,662	4,662	7,291
			1,0	4,918	4,919	5,868
	По сторонах МГТ, кНм/м	0,9	-8,273	-8,273	-14,605	
		0,95	-8,732	-8,732	-12,876	
		1,0	-9,192	-9,192	-10,605	
4	Величина пластичного шарніру		0,9	1,045	1,141	1,074
			0,95	0,742	0,827	0,892
			1,0	0,463	0,534	0,716

Одним із недоліків проведених досліджень є те, що у дослідженні несучої здатності МГК використано двовимірну модель. Тому у подальших науково-дослідних роботах оцінка несучої здатності МГК буде проводитись методом скінченних елементів з метою формування оціночних критеріїв з надійності та функціональної безпеки транспортних споруд залізничної колії.

7. Висновки

1. Числові розрахунки еквівалентних сил показали, що максимальні сили від локомотива 2М62 досягають значення до 450 кН, при наступних параметрах нерівності залізничної колії: довжині – 5,7 м, висоті – 44,7 мм та ухилі – 16,5 %.

2. Міцність елементів МГК, яка виконана із гофрованої структури Multiplate MP150 товщиною гофрованого листа 6 мм забезпечена при ступенях ущільнення

грунтової засипки від 0,9 до 1,0. У металевій гофрованій трубі, що виготовлена із гофрованих листів розміром 200×55 мм при ступені ущільнення ґрунтової засипки 0,9, розвиваються напруження, які перевищують допустимі. В подальшому при накопиченні залишкових напружень це може вплинути на появу текучості матеріалу МГК, а це у свою чергу може призвести до утворення пластичного шарніру.

3. Аналіз багатоваріантних розрахунків перевірки умови виникнення пластичного шарніру у вершині склепіння труби показав, що зародження пластичного шарніру, яке має місце у склепінні МГК, виконується тільки при умові несприятливого впливу двох факторів (причин): допущення розвитку нерівності колії за межі допустимих значень (перша причина) та зниження ступеня ущільнення ґрунтової засипки нижче 90 % (друга причина). При відсутності однієї з причин зародження пластичного шарніру не відбудеться.

Література

1. Ковальчук, В. В. Вплив товщини гофрованого елемента на напружено-деформований стан металевих гофрованих конструкцій [Текст] / В. В. Ковальчук // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. – 2015. – № 3 (57). – С. 199–207. doi: 10.15802/stp2015/46079
2. Лучко, Й. Й. Дослідження несучої здатності металеві гофрованої конструкції за критерієм розвитку пластичного шарніру у вершині труби [Текст] / Й. Й. Лучко, В. В. Ковальчук, О. С. Набоченко // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. – 2015. – № 5 (59). – С. 180–194. doi: 10.15802/stp2015/55340
3. Коваль, П. М. Нормування при проектуванні і будівництві споруд з металевих гофрованих конструкцій [Текст] / П. М. Коваль, І. П. Баб'як, Т. М. Сітдикова // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту зал. трансп. ім. ак. В. Лазаряна. – 2010. – № 39. – С. 114–117.
4. Новодзинский, А. Л. Учет влияния толщины гофророванного элемента на прочность и устойчивость металлической водопропускной трубы [Текст] / А. Л. Новодзинский, В. И. Клевеко // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. – 2012. – № 1. – С. 81–94.
5. Wysokowski, A. Mostowe konstrukcje gruntowo – powlokowe. Laboratoryjne badania niszczone. Awarie w czasie budowy i eksploatacji [Text] / A. Wysokowski, L. Janusz // XXIII konferencja naukowo-techniczna. – Szczecin, 2007. – P. 541–550.
6. Esmaili, M. Minimum depth of soil cover above long-span soil-steel railway bridges [Text] / M. Esmaili, J. A. Zakeri, P. H. Abdulrazagh // International Journal of Advanced Structural Engineering. – 2013. – Vol. 5, Issue 1. – P. 7. doi: 10.1186/2008-6695-5-7
7. Ahad, F. R. Modeling the Dynamic Failure of Railroad tank cars using a physically motivated internal state variable plasticity / damage nonlocal model [Text] / F. R. Ahad, K. Enakoutsa, K. N. Solanki, Y. Tjiptowidjojo, D. J. Bammann // Modelling and Simulation in Engineering. – 2013. – P. 1–11. doi: 10.1155/2013/815158
8. Saat, M. R. Generalized railway tank car safety design optimization for hazardous materials transport: Addressing the trade-off between transportation efficiency and safety [Text] / M. R. Saat, C. P. L. Barkan // Journal of Hazardous Materials. – 2011. – Vol. 189, Issue 1-2. – P. 62–68. doi: 10.1016/j.jhazmat.2011.01.136
9. ДБН В.2.3-14: 2006. Споруди транспорту. Мости та труби. Правила проектування [Текст]. – К., 2006. – 359 с.
10. ВБН В.2.3-218-198:2007. Споруди транспорту. Проектування та будівництво споруд із металевих гофрованих конструкцій на автомобільних дорогах загального користування [Текст]: посібник. – К., 2007. – 122 с.
11. Duncan, J. M. Design Procedures for Flexible Metal Culvert Structures. Reports No. UCB/GT/83-02 [Text] / J. M. Duncan, R. H. Drawsky. – Berkeley, 1983.
12. Vaslestad, J. Long-term behaviour of flexible large-span culverts. Publication No. 74 [Text] / J. Vaslestad. – Oslo, 1994. – P. 38–56.
13. Handbook of steel drainage and highway construction products, American Iron and Steel Institute [Text]. – 2-ed ed. – Canada, 2002. – 482 p.
14. AASHTO: Standart Specifications for Highway Bridges. American Association of State Highway and Transportation Officials [Text]. – Washington, D. C., 2001.
15. Waster, M. Verifiering av nyutvecklat dimensioneringsprogram samt vidareutveckling for jernvagstrafik [Text] / M. Waster. – Sweden, 2008. – 143 p.
16. Pettersson, L. Design of soil steel composite bridges [Text] / L. Pettersson, H. Sundquist. – Stockholm, 2007. – 84 p.
17. Даніленко, Е. І. Правила розрахунків залізничної колії на міцність і стійкість. ЦП-0117 [Текст] / Е. І. Даніленко, В. В. Рибкін. – К.: Транспорт України, 2006. – 168 с.