

УДК 624.21:625.745.2

DOI: 10.15587/1729-4061.2018.123002

ОЦІНКА НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ МЕТАЛЕВОЇ ГОФРОВАНОЇ КОНСТРУКЦІЇ ТИПУ MULTIPLATE MP 150 ПРИ ВЗАЄМОДІЇ ІЗ ҐРУНТОМ ЗАСИПКИ

В. В. Ковальчук

Кандидат технічних наук

Кафедра рухомий склад і колія

Львівська філія Дніпропетровського національного університету
залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна

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

E-mail: kovalchuk.dii@gmail.com

Ю. Є. Ковальчук

Асистент*

E-mail: tzov.lviv.bud@gmail.com

М. П. Сисин

Кандидат технічних наук, доцент

Кафедра проектування залізничної інфраструктури

Дрезденський Технічний Університет

вул. Гетнерштрассе, 3/353, Дрезден, Німеччина, D-01069

E-mail: mykola.sysyn@tu-dresden.de

В. З. Станкевич

Кандидат фізико-математичних наук, доцент

Відділ обчислювальної механіки деформівних систем

Інститут прикладних проблем механіки і математики

ім. Я. С. Підстригача НАН України

вул. Наукова, 3-б, м. Львів, Україна, 79060

E-mail: stan_volodja@yahoo.com

О. В. Петренко

Кандидат технічних наук, доцент*

E-mail: olexapetrenko@gmail.com

*Кафедра будівельне виробництво

Національний університет «Львівська політехніка»

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

Проведено оцінку напруженого стану залізничної конструкції типу Multiplate MP 150 із врахуванням ступеню ущільнення ґрунтової засипки. Встановлено, що у початковий період експлуатації металева гофрована конструкція є нестійкою проти утворення пластичного шарніра, коли ґрунтова засипка ще не досягла нормативного ступеню ущільнення. З метою недопущення розвитку залишкових деформацій металевої гофрованої труби необхідний технічний нагляд за трубою протягом року експлуатації

Ключові слова: залишкова деформація, несуча здатність, гофрована конструкція, модуль пружності, нерівність на залізничній колії

Проведена оценка напряженного состояния железнодорожной конструкции типа Multiplate MP 150 с учетом степени уплотнения грунтовой засыпки. Установлено, что в начальный период эксплуатации металлическая гофрированная конструкция является неустойчивой против образования пластического шарнира, когда грунтовая засыпка еще не достигла нормативного степени уплотнения. С целью недопущения развития остаточных деформаций металлической гофрированной трубы необходим технический надзор за трубой в течение года эксплуатации

Ключевые слова: остаточная деформация, несущая способность, гофрированная конструкция, модуль упругости, неравенство на железнодорожном пути

1. Вступ

На сьогодні прийнято оцінювати роботу гофрованих металевих труб на залишкові деформації за критерієм відносних вертикальних і горизонтальних деформацій, відносно діаметра труби. Згідно з джерелами [1, 2], залишкова вертикальна деформація труб не повинна перевищувати 3,0 % в період експлуатації.

Технічні спостереження за відносними деформаціями металевої труби на дільниці Вадул-Сірет – Держкордон Львівської залізниці (Україна) [3] показали, що у по-

чатковий період експлуатації труби відносні деформації труби накопичуються. Проте залишкові деформації після одного року експлуатації труби зменшилися. Це пов'язано із самоущільненням ґрунтів під власною вагою і вагою рухомого залізничного навантаження.

З метою фактичного визначення положення рейкової колії у профілі, над трубою і підходах, та для контролю за положенням конструкції труби були проведені інструментальні вимірювання із застосуванням геодезичних приладів та інструментів, згідно програми спеціальних спостережень [4]. Положення рейкової колії та точок нагляду на

конструкціях у профілі визначалось методом нівелювання від тимчасового репера. Для визначення запису осідання при проїзді вагона-колієвимірювача розглянемо розрахункову схему запису осідання (рис. 1). Запис осідань здійснюється як різниця перевищень букс колісних пар одного візка, які вимірюються відносно бази вагона.

На рис. 1 використані наступні позначення: $V(x)$ – функція відмітки головки рейки; V_1, V_2, V_3, V_4 – відмітки головки рейки під колесами колієвимірювального вагона; Y_1, Y_2 – відстані від букс коліс вимірювального візка до поздовжньої осі вагона; ΔY – запис осідання в одному положенні вагона; $2l_6$ – довжина бази вагона 17 м; $2l_b$ – довжина бази візка вагона 2,7 м.

Осідання, що записується вагоном-колієвимірювачем, згідно з рис. 1, розраховується за формулою:

$$\Delta Y = Y_2 - Y_1. \quad (1)$$

При значеннях відміток головки рейки під колесами колієвимірювального вагона V_1, V_2, V_3, V_4 та поздовжнього нахилу осі вагона α , формула розрахунку осідань буде мати вигляд:

$$\Delta Y = V_2 - V_1 - 2l_6 \cdot \alpha. \quad (2)$$

Виразивши поздовжній нахил осі вагона α через відмітки, формула розрахунку осідань буде мати наступний вигляд:

$$\Delta Y = V_2 - V_1 - \left(\frac{V_2 + V_1}{2} - \frac{V_4 + V_3}{2} \right) \frac{2l_6}{2l_b}. \quad (3)$$

Значення відміток V_1, V_2, V_3, V_4 розраховуються за наступними виразами:

$$\begin{aligned} V_1 &= V(x), \\ V_2 &= V(x + 2l_b), \\ V_3 &= V(x + 2l_b + 2l_6), \\ V_4 &= V(x + 4l_b + 4l_6). \end{aligned} \quad (4)$$

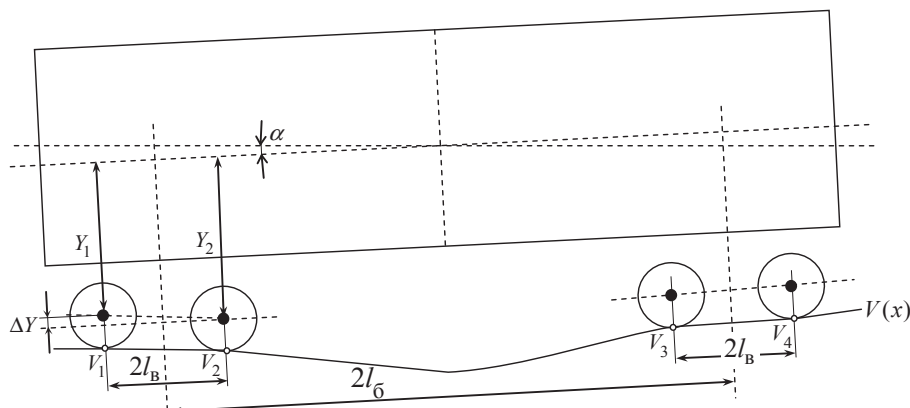


Рис. 1. Схема запису осідання вагоном-колієвимірювачем при проходженні нерівності колії

Вихідні дані нівелювання профілю колії та результати знаходження запису проїзду вагоном-колієвимірювачем осідання колії показано на рис. 2.

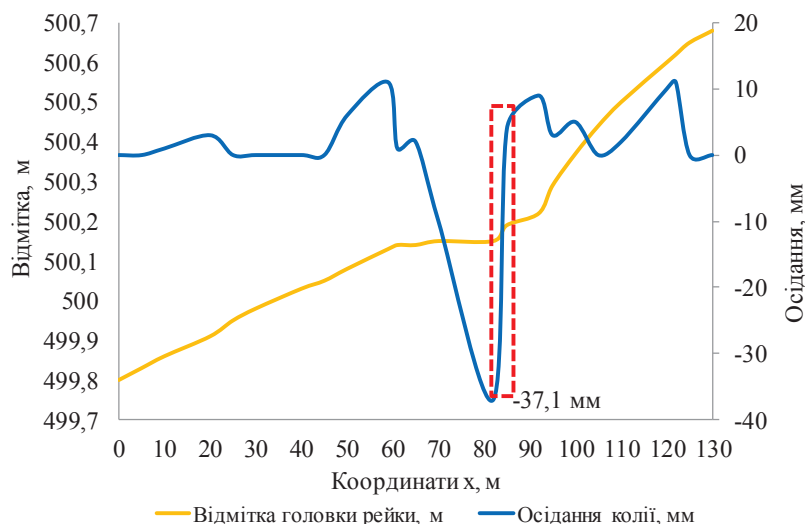


Рис. 2. Результати нівелювання профілю колії та запис проїзду вагоном-колієвимірювачем осідання колії над трубою

Із рис. 2 видно, що у поздовжньому напрямку (в профілі) рейкова колія над трубою, на ділянці довжиною 60 м має ламаний профіль з сідловиною по осі труби.

Оцінка несучої здатності металевої гофрованої конструкції, яка має залишкові деформації вертикального діаметру, є актуальною задачею. Це пов'язано з тим, що на залізницях України немає розроблених методик такої оцінки, а побудована конструкція вперше експлуатується в експериментальному порядку на магістралях України.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Металеві гофровані конструкції (МГК) застосовуються в транспортному будівництві з кінця XIX ст. при будівництві штучних споруд на автомобільних і залізних дорогах поряд із залізобетонними конструкціями. Споруди з металевих гофрованих конструкцій мають ряд переваг, тому їх впровадження у транспортному будівництві є перспективним і необхідним напрямком для України і для світу взагалі.

Основним завданням при проектуванні металевих гофрованих конструкцій (далі МГК) є необхідність врахування спільної роботи з ґрунтом засипки, одним з основних параметрів якого є модуль деформації (модуль пружності). Тому важливим питанням розрахунку МГК є задання модуля загальної деформації ґрунту засипки E_0 [5].

Проблеми створення та вдосконалення методів розрахунку металевих гофрованих конструкцій у ґрунтовому середовищі

почали розвиватися паралельно з впровадженням у практику будівництва [6]. Оскільки діаграма «напруження – деформація» при навантаженні нескільких ґрунтів має нелінійний характер, то ґрунт можна в першому наближенні охарактеризувати чотирма пружними характеристиками [7]: початковим модулем пружності $E_y^{(0)} = \operatorname{tg} \alpha_y$, умовним пластичним модулем $E_{пл} = \operatorname{tg} \alpha_{пл}$, модулем загальної деформації $E_0 = \operatorname{tg} \alpha_0$ і модулем пружності при розвантаженні $E_y = \operatorname{tg} \alpha_p$. Завдання ускладнюється тим, що зазначені характеристики істотно залежать від напруженого стану, насамперед – статичного тиску в ґрунті. З цієї причини модулі деформації ґрунту значно зростають із глибиною.

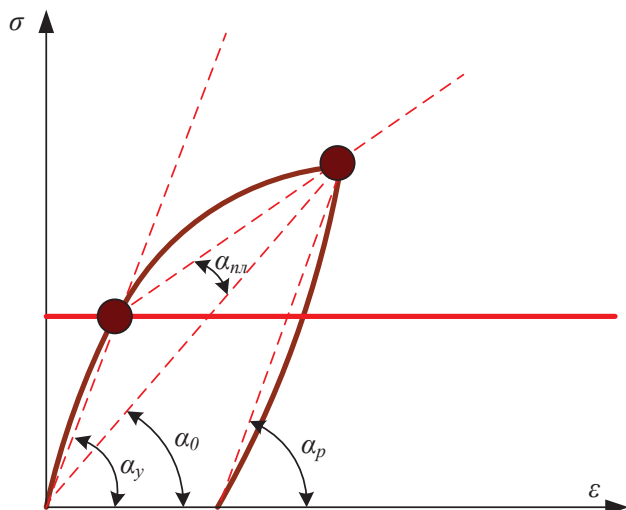


Рис. 3. Характерна діаграма «σ–ε» для ґрунту

Незважаючи на такий складний характер роботи ґрунтів, у більшості розрахунків обмежуються його моделюванням як пружного тіла із гістерезисом [8, 9]. Основною і єдиною характеристикою пружності ґрунту в наших нормах [1] є модуль загальної деформації ґрунту E_0 . Однак саме значення модуля деформації E_0 істотно залежить від напруженого стану ґрунту [10, 11].

У роботі [12] показано, що підвищення модуля деформації ґрунту засипки зменшує вплив згинальних моментів на напружено-деформований стан металевої гофрованої 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 в стінках труби. Це досягнуто введенням у розрахунки відповідного коефіцієнта запасу. Акцентовано увагу на ущільненні засипки.

У роботі [13] встановлено вплив тертя ґрунту на величину стискуєчої сили, що виникає у металі труби. В результаті цього зроблено висновок, що ущільнення ґрунтової засипки має безпосередній вплив на несучу здатність конструкції вцілому.

Одна з найновіших методик, що використовується у світовій практиці, – це методика Sundquist-Pettersson [14]. Ґрунтується на основі досвіду, набутого з проведених експериментів по руйнуванню конструкцій, використовує аналітичні підходи теорії пружності і геотехніки. В основу методики покладена передумова, що різна деформативність конструкції та оточуючих її бічних призм ґрунту призводить до нерівномірного осіданні

вищерозміщеного ґрунту. Внаслідок цього настає стан граничної рівноваги засипки, розташованої над трубою. Виникаючі по площинах ковзання сили тертя спрямовані таким чином, що в гнучких трубах зменшують вертикальний тиск на трубу. Для оцінки несучої здатності враховується осьова сила і згинальний момент, кут внутрішнього тертя засипки та динамічне навантаження від рухомого транспортного засобу.

Згідно із роботою [15], металева гофрована труба разом з навколишнім ґрунтом засипки утворює єдину конструкцію, що сприймає діючі на конструкцію навантаження. При цьому труба сприймає в основному розтягуючі напруження і за рахунок наявності гофри усуває згинальні моменти. Ґрунтова обойма сприймає стискаючі напруження. Тому допускається застосовувати розрахункові схеми, що враховують тільки роботу труби на стиск і нехтувати малими величинами згинальних моментів при спільному розгляді металевої гофрованої труби і ґрунтової обойми.

Порівнюючи закордонні [16, 17] та українські [18] норми проектування, виявлені суттєві відмінності в граничних висотах насипу над металевою гофрованою трубою (далі МГТ) при однаковій товщині стінки гофри. Як виявилось, труби іноземних проектів витримують вагу набагато вищих насипів. Ця обставина призвела до появи проблеми освоєння нових форм МГК. Реальна ж причина крилася у принципових розходженнях норм у частині розрахунку МГК. В Україні розрахунок водопропускних труб з діаметром до 3 м виконується згідно норм [18]. Відповідно до них перший граничний стан визначається граничною статичною рівновагою взаємодії системи «конструкція – ґрунт» і виходячи з якого можна знайти несучу здатність труби. Рекомендована формула містить ряд емпіричних коефіцієнтів та не включає безпосередніх міцнісних характеристик металу труби. Однак саме ця умова в більшості випадків є лімітуючою.

За кордоном [17, 19] оцінюють міцність та стійкість стінки гофри при впливі на склепіння труби ваги стовпа ґрунту та тиску від тимчасового навантаження на рівні верху труби. Спільна робота МГК з ґрунтом при достатній висоті засипки над склепінням враховується шляхом введення знижуючого коефіцієнту до суми тимчасового та постійного навантажень, який залежить від ступеня ущільнення ґрунтової призми навколо споруди. Подібна перевірка міцності та стійкості стінки труби входить в норми Росії, однак майже ніколи не буває лімітуючою. Таким чином, розрахунок труби за граничною статичною рівновагою взаємодії системи «конструкція – ґрунт» і є те проблемне місце, яке обмежує область застосування конструкцій.

У процесі експлуатації спостерігаються залишкові деформації металевих гофрованих труб, які перевищують допустимі деформації. Це пов'язано в першу чергу з тим, що протягом тривалого часу будівельники і проектантні недооцінювали роль ґрунтової засипки в роботі МГК при їх проектуванні. Тільки в останні роки з'явилися можливості коректного аналізу взаємодії МГК з ґрунтовою засипкою при статичних і динамічних навантаженнях.

Із науково-дослідних робіт видно, що досвід утримання та експлуатації МГК в даний час практично не забезпечується їх технічний ресурс, який повинен відповідати проектній довговічності. Однією із причин є специфіка роботи МГК, яка визначається характером взаємодії металевої оболонки і ґрунту засипки. Оскільки значення модуля пружності ґрунтової засипки напряму залежить від ступеню ущільнення ґрунту в період будівництва

конструкції. Тому дослідження несучої здатності МГК із врахуванням достовірних значень модуля пружності ґрунтової засипки є перспективними. Вони дозволять проектувальникам приймати достовірні значення модуля пружності ґрунту засипки на стадії проектування металевих гофрованих конструкцій. При цьому необхідно врахувати дію динамічного навантаження від рухомого складу залізниць, а також залишкові деформації вертикального діаметру металевої труби.

3. Ціль та задачі дослідження

Метою роботи є оцінка несучої здатності металевої гофрованої конструкції типу Multiplate MP 150, що експлуатується на залізничній колії у залежності від модуля пружності ґрунтової засипки та ступеню ущільнення.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- встановити фізико-механічні характеристики ґрунту засипки у залежності від ступеню ущільнення;
- провести оцінку еквівалентних напружень в металевій гофрованій трубі в результаті проектного стану колії і експлуатаційної нерівності;
- встановити механізм причин виникнення деформації залізничної колії та металевої труби;
- обчислити відсотковий вплив багатоваріантних факторів на розвиток пластичних деформацій у металі гофрованої труби та накопичення вертикальних нерівностей на залізничній колії.

4. Матеріали та методи досліджень

4.1. Методика оцінка модуля пружності ґрунту засипки

Зв'язок між величиною E_0 і значенням вертикального обтиску σ_z ґрунтується на співвідношенні між об'ємною деформацією ϵ_v і сумою головних напружень [15] $\theta = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$:

$$\epsilon_v = \frac{(1-2\nu)\theta}{E}, \quad (5)$$

де ν – коефіцієнт Пуассона ґрунту.

При умові всестороннього стиску:

$$\theta = \sigma_z (1+2\xi), \quad (6)$$

де

$$\xi = \frac{\sigma_x}{\sigma_z} = \frac{\sigma_y}{\sigma_z} = \frac{1+\nu}{1-\nu}. \quad (7)$$

Із врахуванням рівняння (5) отримуємо:

$$E = \frac{(1-2\nu)(1+\nu)\sigma_z}{\epsilon_v(1-\nu)}. \quad (8)$$

Об'ємна деформація пропорційна зміні об'єму пор $\Delta V_{\text{пор}}$:

$$\epsilon_v = \frac{\Delta V_{\text{пор}}}{V_{\text{пор}} + V_{\text{ск}}} = \frac{\Delta e}{1+e}, \quad (9)$$

де $V_{\text{ск}}$ – об'єм скелета ґрунту; $e = V_{\text{пор}}/V_{\text{ск}}$ – пористість ґрунту $0 < e < \infty$; Δe – зміна пористості по відношенню до пористості e в стані статичної рівноваги.

Величина обтиску σ_z , що викликає зміна пористості Δe , являє собою приріст напружень по відношенню до напружень статичної рівноваги σ . Між зміною пористості і зміною напружень є логарифмічна залежність [1], яка записується у вигляді:

$$\Delta e = -a \lg \frac{\sigma + \sigma_z}{\sigma} = -a \lg \left(1 + \frac{\sigma_z}{\sigma} \right) \approx a \left(2,3 \frac{\sigma_z}{\sigma} \right). \quad (10)$$

Підставляючи отриманий вираз (10) у формулу (9) для обчислення значення ϵ_v і отримане значення у формулу (8) для визначення E , отримаємо:

$$E = \frac{(1-2\nu)(1+\nu)}{(1-\nu)} 2,3 \frac{1+e}{a} \sigma = 2,3\beta \frac{1+e}{a} \sigma. \quad (11)$$

Статичний тиск ґрунтової товщі збільшується із глибиною:

$$\sigma = \gamma z. \quad (12)$$

Нормативне значення E_0 відноситься до ґрунтів на глибині порядку від 2 м до 3 м. У деяких випадках, при необхідності працювати із товщиною ґрунту модуль деформації і модуль пружності рекомендується збільшувати із глибиною. У відповідності з рівнянням (12) для врахування зміни модуля деформації з глибиною z необхідно використовувати формулу:

$$E = 2,3 \cdot \gamma \cdot h \cdot \frac{1+e}{a} \beta, \quad (13)$$

де γ – об'ємна вага ґрунту; e – коефіцієнт пористості, який для матеріалу засипки рівний 0,6; a – коефіцієнт компресійного стиску, який рівний 0,04 для свіжо укладеного ущільненого ґрунту і 0,02 – для ґрунту після 2–3 річної експлуатації; β – коефіцієнт, який визначається у залежності від коефіцієнта поперечного розширення ν :

$$\beta = \frac{(1-2\nu)(1+\nu)}{1-\nu}. \quad (14)$$

Знаючи коефіцієнт поперечного розширення ґрунту, за формулою (13) розрахуємо модуль деформації ґрунту на будь-якій глибині ґрунтового масиву.

4.2. Методи моделювання гофрованої оболонки

На даний момент часу у літературі є три підходи моделювання гофрованої оболонки. Перший підхід ґрунтується на заміні гофрованої ізотропної оболонки гладкою ортотропною [20–23].

Ізотропний матеріал гофрованої оболонки (модуль Юнга E , коефіцієнт Пуассона ν) замінюють ортотропним з механічними характеристиками E_x , E_y , ν_x , ν_y , причому:

$$E_x = E \frac{A_a}{ah}, \quad E_y = E \left(\frac{t}{h} \right)^3, \quad \nu_x = \nu, \quad \nu_y = \nu \frac{E_y}{E_x}, \quad h = \sqrt{12(1-\nu_x^2) \frac{I_a}{A_a}}. \quad (15)$$

Тут I_a , A_a – відповідно момент інерції та площа поперечного перерізу труби, віднесені до довжини хвилі a гофра; t – висота гофра; h – прийнята товщина ортотропної оболонки; R – радіус кривини серединної поверхні.

Другий підхід полягає у заміні оболонки сіткою стержневих елементів з накладанням певних кінематичних

умов [21]. Стержні розташовані по коловій координаті та вздовж твірної циліндра, а геометричні характеристики їх поперечних перерізів визначаються співвідношеннями:

$$A_x = \frac{A_0}{a} a_y, I_x = \frac{I_0}{a} a_y, A_y = \frac{a_x a_y}{\pi R^3} \left(\frac{t}{R} \right)^3, I_y = \frac{a_x a_y}{12 \pi r^3} r^3. \quad (16)$$

Описані два підходи дають завищені результати напружено-деформівного стану оболонки [22].

Третій підхід передбачає побудову гофрованої оболонки з наступним скінченно-різницеvim розбиттям [24]. Отримані числові результати за третім підходом є найбільш вірогідними і максимально наближені до натурних випробувань. Водночас підготовка моделі вимагає великого об'єму часу, високої кваліфікації дослідника, значних ресурсів обчислювальної техніки.

5. Результати досліджень напружено-деформованого стану металевих гофрованих конструкцій типу Multiplate MP 150

Для оцінки впливу фізико-механічних властивостей ґрунту та залишкових деформацій труби на несучу здатність труби була проведена серія багатоваріантних розрахунків. При цьому розглядалася металева труба довжиною 12,69 м, вертикальним діаметром 6,2 м та горизонтальним діаметром 6,57 м (рис. 4). Металеві листи труби виготовлені із гофрованих конструкцій типу Multiplate MP 150 з довжиною хвилі гофра 150 мм, висотою хвилі гофра 50 мм і товщиною металевих листів 6 мм. Модуль пружності сталі труби – $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа; коефіцієнт Пуассона матеріалу споруди – $\nu = 0,25$. Конструкція має ґрунтову засипку із питомою вагою ґрунту $\gamma = 20$ кН/м³.

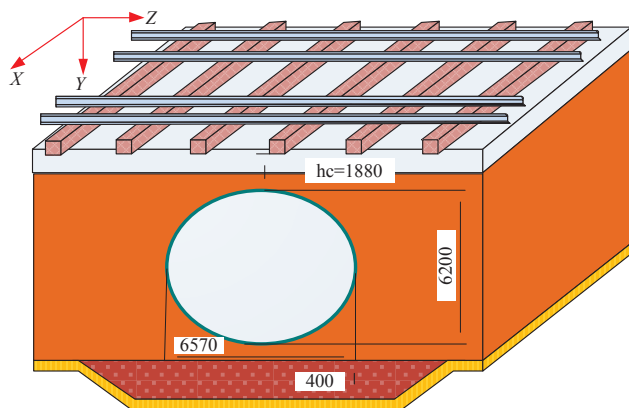


Рис. 4. Розрахункова модель задачі

Оцінка несучої здатності металевих труби виконана методом скінченних елементів за допомогою програмного забезпечення FEMAP with MSC NASTRAN.

Пластична поведінка матеріалу гофрованої труби визначається згідно з критерієм пластичності фон Мізеса.

Взаємозв'язок між напруженнями і деформаціями для ізотропного матеріалу в матричному вигляді закону Гука запишемо у наступному вигляді:

$$\{\sigma\} = [D] \{\varepsilon\}, \quad (17)$$

де $[D]$ – матриця пружності.

Напруження визначаємо за формулою:

$$\{\sigma\} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{yy} & \sigma_{zz} & \sigma_{xy} & \sigma_{yz} & \sigma_{zx} \end{bmatrix}. \quad (18)$$

Деформації визначаємо за формулою:

$$\{\varepsilon\}^T = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{zz} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{yz} & \varepsilon_{zx} \end{bmatrix}. \quad (19)$$

Пластична поведінка матеріалу засипки і матеріалу баластного шару визначається за критерієм пластичності Мора-Кулона.

Вважається, що плинність починається тоді, коли напруження відповідають критеріям пластичності:

$$F(\{\sigma\}, x) = 0, \quad (20)$$

де x – параметр зміцнення.

Якщо $F(\{\sigma\}, x) = 0$, то матеріал поводить себе пружно, в іншому випадку відбувається приріст пластичних деформацій з компонентами, нормальними до поверхні плинності, яка визначається функцією пластичного потенціалу Q . За небезпеки виникнення пластичних деформацій у металі труби під час розрахунків задаємо критерій фон Мізеса. Тому до параметрів модуля пружності, коефіцієнта Пуассона і густини (E, ν, ρ) додатково задаємо значення межі текучості σ_m . У розрахунках приймаємо ідеально-пластичну модель ґрунту типу Мора-Кулона і Друккера-Прагера. Для цього задаємо шість характеристик ґрунту засипки. Дві пружні характеристики – модуль деформації E (аналог модуля Юнга) і коефіцієнт Пуассона ν і густину ρ ґрунту засипки. А також три характеристики пластичності ґрунту – кут внутрішнього тертя ϕ , коефіцієнт зчеплення c і кут дилатансії ψ .

Зазначимо, що моделей ґрунту існує багато, для частини з них створені спеціальні типи скінченних елементів.

Металеву трубу моделюємо плоскими скінченними елементами 2-D типу Plate, а простір ґрунту в пазах гофра заповнюємо тетраедрами, а потім з видаленням від оболонки ґрунт моделюють гексаедрами. Схема скінченно-елементної просторової моделі конструкції залізничної колії із металевою гофрованою трубою наведена на рис. 5.

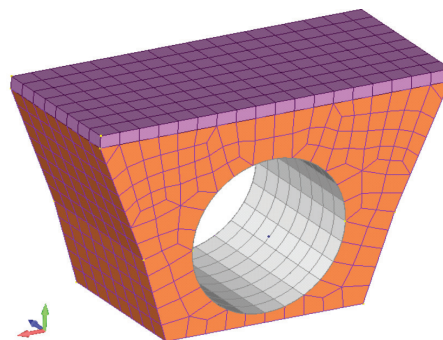


Рис. 5. Схема скінченно-елементної просторової моделі конструкції залізничної колії із металевою гофрованою трубою

Вплив ступеню ущільнення матеріалу баластного шару і матеріалу засипки визначався за методикою Петерсона [25] і відомими в нормативній літературі табличними залежностями фізико-механічних характеристик від коефіцієнта пористості. Результати розрахунків фізико-механічних параметрів ґрунтів наведені у табл. 1.

Візуалізація результатів розрахунку напружень та деформацій методом скінченних елементів наведена на рис. 6, 7.

Таблица 1

Розрахункові характеристики ґрунтів при різних ступенях ущільнення

Ступінь ущільнення ґрунтової засипки RP , %	Характеристики ґрунтів		
	Коефіцієнт пористості, e	Кут внутрішнього тертя ϕ , град	Модуль деформації ґрунту E , МПа
85	0,425	36	6,584
90	0,40	38	11,54
95	0,329	40	21,089
97	0,30	40,8	27,27

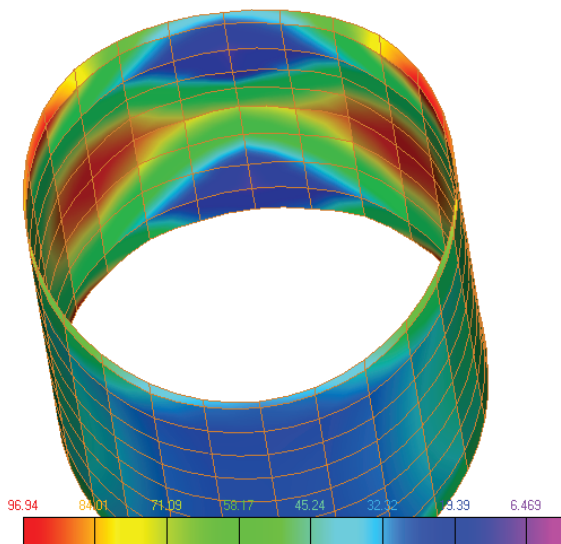


Рис. 6. Розподіл напружень у металевій гофрованій конструкції

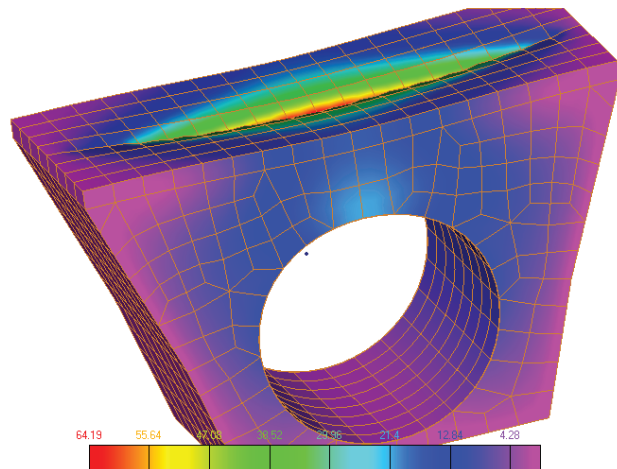


Рис. 7. Розподіл деформацій у металевій гофрованій конструкції

Процес зміни ступеня ущільнення і залишкової нерівності в часі не є відомим, тому виконується багато-варіантний розрахунок з урахуванням ряду можливих значень початкового ступеня ущільнення і параметрів нерівності залізничної колії. Для аналізу причин виникнення деформацій вибирається найбільш несприятливий випадок поєднання цих двох чинників.

Аналіз отриманих числових результатів показує, що найбільші деформації і напруження (еквівалентні за гіпотезою Мізеса) виникають у стінках металевої гофрованої оболонки посередині її прогону (рис. 8, 9).

Із проведених результатів досліджень можна побачити, що із збільшенням ступеню ущільнення ґрунтової засипки напруження в металевій трубі зменшуються майже вдвічі. Набагато швидше збільшуються напруження з ростом нерівності на залізничній колії.

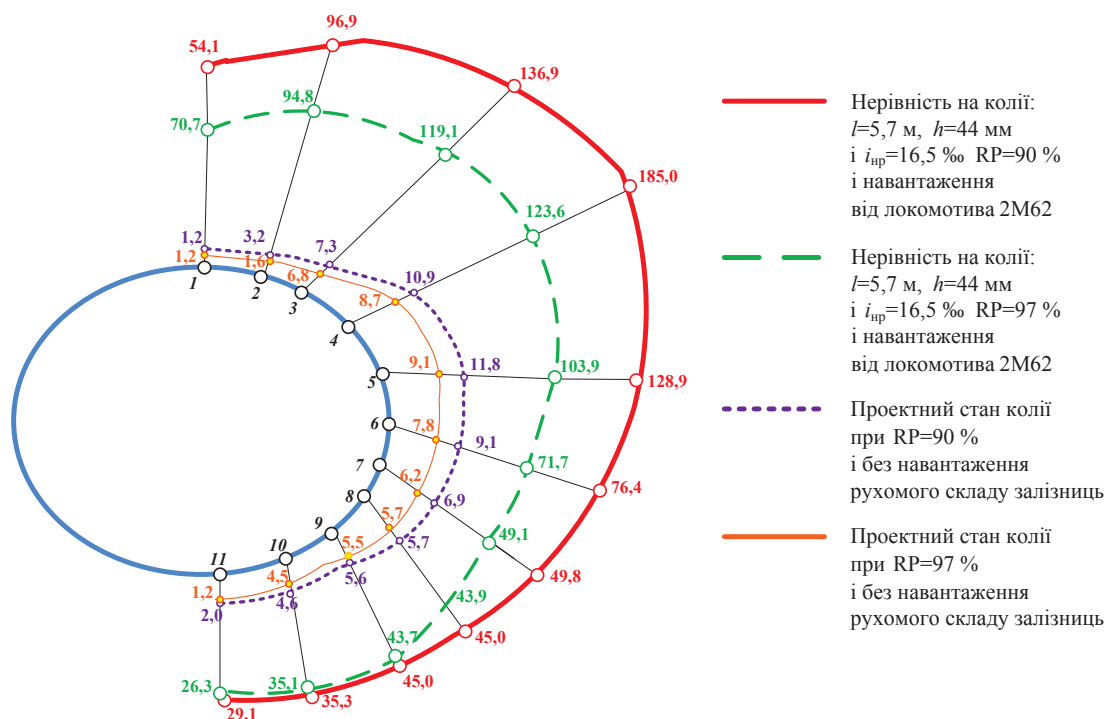


Рис. 8. Еквівалентні напруження в металевій гофрованій трубі в результаті проектного стану колії і експлуатаційної нерівності та ступеню ущільнення ґрунтової засипки 90 % і 97 %

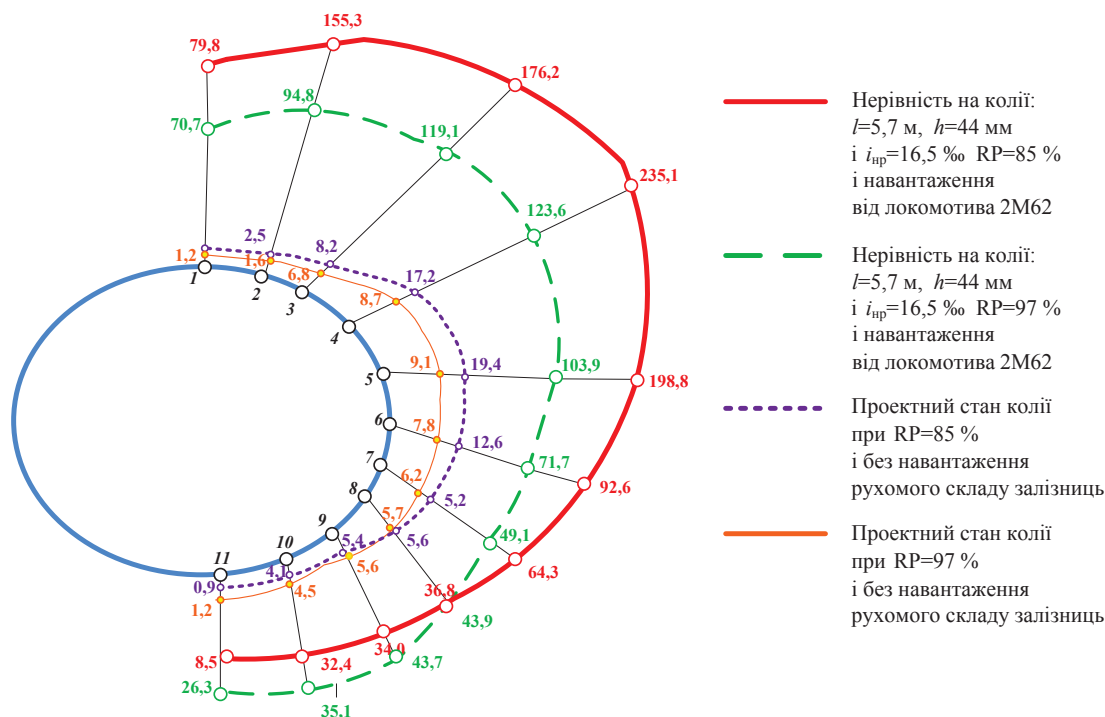


Рис. 9. Еквівалентні напруження в металевій гофрованій трубі в результаті проектного стану колії і експлуатаційної нерівності та ступеню ущільнення ґрунтової засипки 85 % і 97 %

Числові розрахунки показали, що еквівалентні напруження перевищують допустиму величину 235 МПа при ступені ущільнення ґрунтової засипки нижче 90 % і розвитку експлуатаційної нерівності колії. Це є загрозою переходу металу гофрованої труби в пластичний стан.

Механізм зародження деформацій залізничної колії та металеві труби наведений на рис. 10. Даний механізм враховує вплив людських і технічних факторів, які могли у взаємозв'язку призвести до виникнення залишкових деформацій металеві труби.

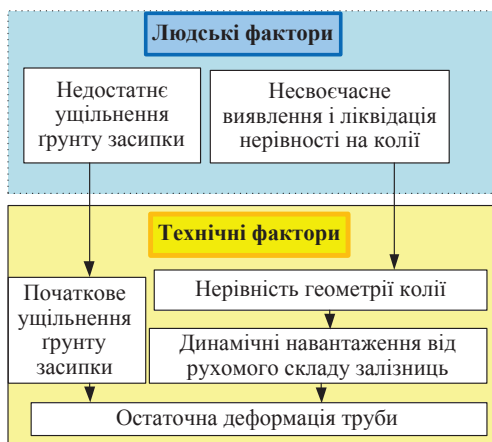


Рис. 10. Механізм виникнення деформації залізничної колії та металеві труби

З моменту спорудження металеві гофрованої конструкції і пропуску поїздів відбувається ущільнення ґрунтової засипки. Внаслідок цього виникає нерівномірне осідання верхньої будови колії, що проявляється у виникненні вертикальних нерівностей геометрії колії з одночасним ростом вертикальних нерівностей вершини

труби. Це призводить до збільшення динамічного навантаження рухомого складу на залізничну колію і в результаті на всю конструкцію.

6. Обговорення результатів досліджень несучої здатності металеві гофрованої труби типу Multiplate MP 150

Практика побудови металевих гофрованих конструкцій показує, що ідеальну симетрію моделі конструкції, ущільнення ґрунту і характеру навантаження в процесі експлуатації забезпечити неможливо. Розглянуті конструкції дуже чутливі до несиметричних навантажень, тому в процесі експлуатації можна очікувати несиметричне деформування. Враховуючи це, слід рекомендувати при будівництві таких конструкцій приділяти велику увагу однорідності ґрунту засипки і симетричного ступеня ущільнення.

При забезпеченні проектного ущільнення ґрунтової засипки 97 % по методу Проктора, критерії міцності та допустимі вертикальні деформації металеві гофрованої конструкції забезпечуються. Це пов'язане з тим, що бокові стінки металеві труби мають достатній опір проти горизонтальних деформацій. Проте при ущільненні ґрунтової засипки нижче 90 % перевірка утворення пластичного шарніру металеві труби не забезпечується.

Щодо впливу на несучу здатність металеві гофрованої конструкції нерівності на колії і ступеню ущільнення можна сказати, що обидва чинники мають істотний вплив. Найбільш низьке значення несучої здатності існує в початковий період експлуатації, безпосередньо після її спорудження. Проте при забезпеченні своєчасного усунення нерівності на залізничній колії, навіть при недостатньому ущільненні ґрунтової засипки, запас несучої здатності становить 58 %. Тоді як при нормальному ступені ущільнення запас міцності становить близько 80 %.

Збільшення нерівності верхньої будови залізничної колії вище нормативних значень призводить до швидкого зростання динамічних навантажень від рухомого складу і надалі до відповідного зниження несучої здатності. Слід зазначити, що навіть при наднормативній нерівності може забезпечуватися стійка робота труби, якщо ґрунтова засипка має достатній ступінь ущільнення.

Разом з цим, значним недоліком критерію відносних деформацій є вплив конструктивний діаметру труби, оскільки критерій є одним для всіх можливих діапазонів металевих гофрованих труб. Тому абсолютне значення деформацій труби може бути в кожному випадку різним. Отже, відносна деформація для обчислення положення колії не є придатна. Разом з нею повинні враховуватися також і абсолютні деформації. Тому у подальших дослідженнях необхідно проводити оцінку напружено-деформованого стану із врахуванням абсолютних деформацій металевої труби. Це пов'язано з тим, що горизонтальні деформації поперечного перерізу труби не мають впливу на горизонтальні деформації верхньої будови колії та на динамічні навантаження рухомого складу.

5. Висновки

1. На початковому етапі експлуатації металевої гофрованої труби необхідне підвищення рівня технічного

контролю за зміною вертикального і горизонтального діаметрів труби, оскільки ґрунтова засипка ще не досягла нормативного ступеню ущільнення 97 %. При збільшенні ступеню ущільнення ґрунтової засипки RP з 85 % до 97 % модуль деформації ґрунту засипки збільшується у три рази.

2. Проведені дослідження показують, що несуча здатність конструкції залежить від двох взаємозв'язаних факторів, а саме – величини нерівності на залізничній колії та ступеню ущільнення ґрунту засипки. Із збільшенням ступеню ущільнення ґрунтової засипки напруження в металевій трубі зменшуються майже вдвічі. Набагато швидше збільшуються напруження з ростом нерівності на залізничній колії. Числові розрахунки показали, що еквівалентні напруження перевищують допустиму величину 235 МПа при ступеню ущільнення ґрунтової засипки нижче 90 % і розвитку експлуатаційної нерівності колії. Це є загрозою переходу металу гофрованої труби в пластичний стан. У спільному впливі обох причин переважне значення має ступінь ущільнення ґрунтової засипки, частка впливу якого складає 42 %, а частка розвитку нерівності становить 22 %.

3. Досліджувана металева конструкція в нормальних умовах експлуатації має великий запас несучої здатності, який досягає 80 %. Проте дані конструкції, незважаючи на високий початковий запас міцності, є чутливими до зростання зовнішніх динамічних навантажень, внаслідок виникнення нерівності на залізничній колії.

Література

1. Посібник до ВБН В.2.3-218-198:2007. Споруди транспорту. Проектування та будівництво споруд із металевих гофрованих конструкцій на автомобільних дорогах загального користування: Рекомендовано науково-технічною радою ДерждорНДІ від 17 листопада 2006 р. № 14. К., 2007. 122 с.
2. Коваль П. М., Баб'як І. П., Сітдикова Т. М. Нормування при проектуванні і будівництві споруд з металевих гофрованих конструкцій // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. 2010. № 39. С. 114–117.
3. Лучко Й. Й., Ковальчук В. В., Набоченко О. С. Дослідження несучої здатності металевої гофрованої конструкції за критерієм розвитку пластичного шарніру у вершині труби // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. 2015. № 5 (59). С. 180–194. doi: 10.15802/stp2015/55340
4. Die Tragfähigkeit von Eisenbahndurchlässen in Abhängigkeit von der Bauausführung und der Instandhaltung / Sysyn M., Kowalt-schuk W., Nabotschenko O., Gerber U. // ETR – Eisenbahntechnische Rundschau. 2016. P. 39–44.
5. Лучко Й. Й. Ґрунтознавство, механіка ґрунтів, основи та фундаменти. Львів: Каменярь, 2013. 320 с.
6. Research and analysis of the stressed-strained state of metal corrugated structures of railroad tracks / Kovalchuk V., Luchko J., Bondarenko I., Markul R., Parneta B. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2016. Vol. 6, Issue 7 (84). P. 4–9. doi: 10.15587/1729-4061.2016.84236
7. Wysokowski A., Janusz L. Mostowe konstrukcje gruntowo – powlokowe. Laboratoryjne badania niszczone. Awarie w czasie budowy i eksploatacji // XXIII konferencja naukowo-techniczna. Szczecin, 2007. P. 541–550.
8. Esmaili M., Zakeri J. A., Abdulrazagh P. H. Minimum depth of soil cover above long-span soil-steel railway bridges // International Journal of Advanced Structural Engineering. 2013. Vol. 5, Issue 1. P. 7. doi: 10.1186/2008-6695-5-7
9. Modeling the Dynamic Failure of Railroad Tank Cars Using a Physically Motivated Internal State Variable Plasticity/Damage Nonlocal Model / Ahad F. R., Enakoutsa K., Solanki K. N., Tjiptowidjojo Y., Bammann D. J. // Modelling and Simulation in Engineering. 2013. Vol. 2013. P. 1–11. doi: 10.1155/2013/815158
10. Новодзинский А. Л., Клевеко В. И. Учет влияния толщины гофрованного элемента на прочность и устойчивость металлической водопропускной трубы // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. 2014. № 1. С. 81–94.
11. Saat M. R., Barkan C. P. L. Generalized railway tank car safety design optimization for hazardous materials transport: Addressing the trade-off between transportation efficiency and safety // Journal of Hazardous Materials. 2011. Vol. 189, Issue 1-2. P. 62–68. doi: 10.1016/j.jhazmat.2011.01.136
12. AASHTO: Standart Specifications for Highway Bridges. American Association of State Highway and Transportation Officials, 444 N. Capitol St., N. W., Ste. 249, Washington, D. C., 2001.
13. Handbook of steel drainage and highway construction products. American Iron and Steel Institute. Canada, 2002.
14. Waster M. RORBROAR. Verifiering av nytutvecklat dimensioneringsprogram samt vidareutveckling for jernvagstrafik. Orebro University, Sweden, 2008. 143 p.

15. Machelski C. Modelowanie mostowych konstrukcji gruntowo-powlokowych. Dolno-slaskie Wydawnictwo Edukacyjne, 2008. 208 p.
16. ОДМ 218.2.001-2009. Рекомендации по проектированию водопропускных металлических гофрированных труб: Распоряжение Федерального дорожного агентства от 21 июля 2009 г. № 252-р.
17. Pettersson L., Sundquist H. Design of soil steel composite bridges. Structural Desing and Bridges, Stockholm, 2007. 84 p.
18. Посібник до ВБН В.2.3-218-198:2007. Споруди транспорту. Проектування та будівництво споруд із металевих гофрованих конструкцій на автомобільних дорогах загального користування. К., 2007. 122 с.
19. Mechelski C. Vodelowanie mostowych konstrukcji gruntowo-powlokowych. Wroclaw, 2008. 205 p.
20. El-Sawy K. M. Three-dimensional modeling of soil-steel culverts under the effect of truckloads // Thin-Walled Structures. 2003. Vol. 41, Issue 8. P. 747–768. doi: 10.1016/s0263-8231(03)00022-3
21. Machelski C. Kinematic method for determining influence function of internal forces in the steel shell of soil-steel bridge. Studia Geotechnica et Mechanica. 2010. Vol. XXXII, Issue 3. P. 28–40.
22. Elshimi T. M. Three-dimensional nonlinear analysis of deep-corrugated steel culverts. Queen's University Publ., 2011. 738 p.
23. Barbato M., Bowman M., Herbin A. Performance evaluation of buried pipe installation. Louisiana State University Publ., 2010. 123 p.
24. Ковальчук В. В. Вплив товщини гофрованого елемента на напружено-деформований стан металевих гофрованих конструкцій // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. 2015. № 3 (57). С. 199–207. doi: 10.15802/stp2015/46079
25. Pettersson L., Leander J., Hansing L. Fatigue design of soil steel composite bridges // Archives of institute of civil engineering. 2002. Issue 12. P. 237–242.