

# ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ МЕТАЛЕВИХ ГОФРОВАНИХ КОНСТРУКЦІЙ ЗАЛІЗНИЧНОЇ КОЛІЇ

**В. В. Ковальчук**

Кандидат технічних наук\*

E-mail: kovalchuk.diit@mail.ru

**Р. В. Маркуль**

Кандидат технічних наук

Кафедра «Колія та колійне господарство»

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна

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

E-mail: guaranga\_mr@mail.ru

**О. М. Баль**

Кандидат технічних наук, доцент\*

E-mail: olenabal79@gmail.com

**А. Р. Мілянчик**

Кандидат технічних наук\*

E-mail: e-mail milyan\_74@ukr.net

**А. Б. Пенцак**

Кандидат технічних наук, доцент\*\*

E-mail: apentsak1963@gmail.com

**Б. З. Парнета**

Кандидат технічних наук, доцент\*\*

E-mail: f\_termit@yahoo.com

**О. М. Гайда**

Кандидат технічних наук, доцент\*\*

E-mail: gajda@ukr.net

\*Кафедра «Рухомий склад і колія»

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

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

\*\*Кафедра будівельного виробництва

Національний університет «Львівська політехніка»

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

*Наведено основні дефекти металевих гофрованих водопропускних труб, які виникають внаслідок експлуатації та висвітлено проблеми забезпечення їх довговічності та міцності. Проаналізовано проблеми адаптації закордонних нормативних документів щодо проектування металевих гофрованих конструкцій на залізничних та автомобільних дорогах України. Наведено результати експериментальних та теоретичних розрахунків несучої здатності металевих гофрованих конструкцій*

*Ключові слова: залишкові деформації, проектування, пластичний шарнір, рухомий склад залізниць, щільність ґрунтової засипки*

*Приведены основные дефекты металлических гофрированных водопропускных труб, возникающие вследствие эксплуатации, и освещены проблемы обеспечения их долговечности. Проанализированы проблемы адаптации иностранных нормативных документов по проектированию металлических гофрированных конструкций на железных и автомобильных дорогах Украины. Приведены результаты экспериментальных и теоретических расчетов несущей способности металлических гофрированных конструкций*

*Ключевые слова: остаточные деформации, проектирование, пластический шарнир, подвижной состав железных дорог, плотность грунтовой засыпки*

## 1. Вступ

Металеві гофровані конструкції (далі МГК) були відомі ще з кінця XIX століття [1, 2]. У Росії перші згадки про спорудження МГК зустрічаються, ще з 1875 р. коли на Закаспійській залізниці було укладено близько 1300 погонних метрів труб. У період з 1887 р. до 1914 р. уклали ще 64000 погонних метрів, що склало п'ять тисяч споруд. На сьогоднішній день розпорядженням Міністерства транспорту Російської Федерації рекомендовано застосування гофрованих металевих труб при будівництві і реконструкції автомобільних та залізничних доріг [3].

У США вперше МГК з'явилися у 1896 р. [2]. Спочатку будували труби невеликих отворів (до двох метрів), пізніше, в міру виготовлення потужнішого металевого

профілю, стали зводити великі споруди: мости (типу арокних), шляхопроводи, тунелі, потужні огорожі. Дослідивши довговічність, корозійну стійкість і надійність оцинкованих МГК, американці визнали їх придатними, як для суворих умов Канади та Аляски, так і для тропіків Африки, Азії та Південної Америки.

В інших країнах гофровані труби знайшли широке застосування тільки в останні 50 р. На даний час відомі канадська фірма ARMTEC (гофри 152×51 і 400×150 мм при товщині 3–7 мм), італійська FRACASSO (152×51, товщина 3–7 мм), норвезько-шведсько-фінська фірма VIACON (150×50, товщина 3–7 мм). Вони забезпечують потреби в металевих гофрованих конструкціях країни Європи, Америки, Африки та Австралії.

Особлива увага дослідженням МГК приділяється у таких країнах, як Польща, Швеція, Італія, США, і

застосування МГК на сьогоднішній день динамічно розвивається.

В Україні будівництво МГК почало розвиватися, в основному, з середини 90-их рр. ХХ століття [4]. Такі конструкції використані при будівництві транспортних розв'язок та перепуску водотоків в АР Крим на автомобільній дорозі Київ – Одеса, Харків – Сімферополь [4] на залізниці споруджено МГК на ділянці Вадул-Сирет – Держкордон [5].

При спостереженні за поведінкою металевої гофрованої труби у процесі експлуатації [5, 6] 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

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

З метою вибору ефективних рішень щодо запобігання подальшому руйнуванню і посиленню конструкцій труб необхідно виявити основні фактори цього руйнування.

У роботі [7] зазначено, що можливими факторами, які впливають на руйнування труб, можуть бути: навантаження і деформації від постійних та динамічних навантажень; морозне руйнування стінок труби.

З аналізу науково-дослідної роботи [8] випливає, що факторним впливом на руйнування труби є і утворення корозії металу труби, як наслідок застою води біля хвиль гофрів. Корозійні процеси, які поширюються поверхнею труби, можуть мати негативний вплив на стабільність роботи гофрованих металевих водопропускних труб, а також впливати на ефективність гідравлічної системи. Крім цього проведенні дослідження підкреслюють ефект погіршення матеріалу водопропускних труб, які експлуатуються у ґрунті.

При проектуванні МГК, проектувальники зіткнулися з низкою проблем. Так порівнюючи закордонні [3, 9] та українські [10] норми проектування були 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.

На початковому етапі припустили, що різниця в несучій здатності МГК зумовлена розходженням фі-

зико-механічних властивостей металу труби. Проте вивчення іноземних норм показало, що марки українських сталей, які використовуються при будівництві МГК, є міцнішими, аніж за кордоном. 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 [10]. 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 міцністних характеристик металу труби. Однак саме ця умова в більшості випадків є лімітуючою.

За кордоном [9, 11] перевіряють 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 уведення 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 [3]. 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 у металевих гофрованих трубах виникає ряд дефектів. Найпоширенішими серед них є руйнування додаткового захисного покриття внутрішньої поверхні труби та лотків, надлишкові деформації вертикального та горизонтального діаметрів труби (рис. 1), викришування металу біля болтових з'єднань (рис. 2), корозія металевих труб (рис. 3) і втра- та стійкості гофри [6].

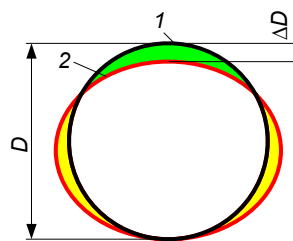


Рис. 1. Схема деформування поперечного перерізу металеві гофрованої труби: D – проектний діаметр поперечного перерізу труби;  $\Delta D$  – величина деформування; 1 – проектне положення; 2 – деформований стан

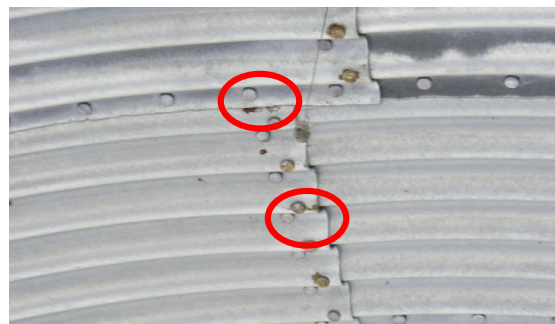


Рис. 2. Викришування металу у зоні болтових з'єднань

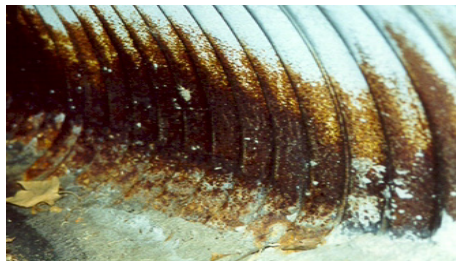


Рис. 3. Корозія металевих гофрованих водопропускних труб

По різному визначається і тиск від тимчасового навантаження. При однаковій висоті засипки над трубою частка тимчасового навантаження в сумарному тиску на склепіння труби, як правило, за українськими [10] нормами буде більшою, хоча в іноземних нормах [3, 9, 11] враховують динаміку, а при мінімальних засипках інтенсивність іноземного нормативного навантаження є більшою, ніж аналогічного українського.

Отже, 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 гофри, характеристик ґрунтів та ступеню ущільнення ґрунту при будівництві та експлуатації труб.

### 3. Ціль та задачі дослідження

Метою роботи є проведення експериментальних та теоретичних досліджень міцності металевих гофрованих конструкцій залізничної колії, які у процесі експлуатації мають залишкові деформації вертикального і горизонтального діаметрів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- провести аналіз основних дефектів і пошкоджень МГК у період експлуатації та навести результати експериментальних вимірювань залишкових деформацій вертикального і горизонтального діаметрів металевої гофрованої труби;
- виконати експериментальні дослідження напружено-деформованого стану МГК при статичних та динамічних навантаженнях від рухомого складу залізниць;
- методом скінченних елементів провести оцінку міцності МГК та порівняти отримані значення із експериментальними вимірюваннями.

### 4. Експериментальні дослідження напружено-деформованого стану металевої гофрованої конструкції

При спостереженні за деформаціями вертикального та горизонтального діаметрів металевої гофрованої труби у процесі експлуатації виявилось, що вони мають незатухаючий характер. Так, аналіз інтенсивності накопичення залишкових деформацій за один рік служби МГК показав, що відносні деформації труби не збільшуються, а поступово зменшуються. Графік за-

лишкових вертикальних та горизонтальних деформацій із окресленням граничної (допустимої) величини цього значення наведено на рис. 4.

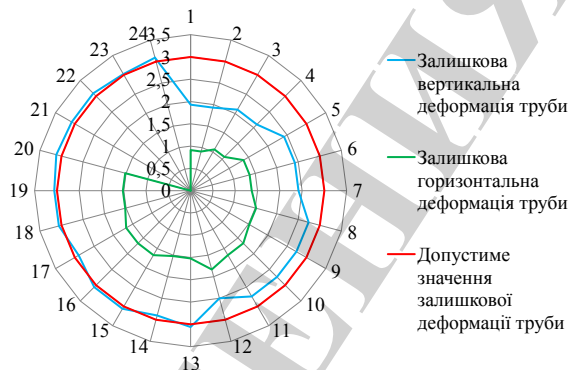


Рис. 4. Інтенсивність накопичення залишкових деформацій МГК

Проводились дослідження МГК типу Multiplate MP 150 типу горизонтальний еліпс з наступними параметрами: внутрішнім вертикальним діаметром 6,20 м, внутрішнім горизонтальним діаметром 6,57 м, довжиною хвилі 150 мм, висотою хвилі 50 мм, товщиною металевого листа 6 мм. У поздовжньому напрямку тіло труби складається з 14 кілець. Кожне кільце складається з 10 листів, які з'єднані болтами. Оголовки труби виконані за допомогою габіонів системи Терраемеш. Модулі розташовуються горизонтальними ярусами. Основою для оголовок служать габіонні матраци Рено 3:2:0,23, вкладені на геотекстиль та сітку «Секугрід».

Висота верхового та низового оголовок – 7,5 м. Довжина укріплення лівобережного та правобережного укосів земляного полотна відповідно складають 12 м і 28 м.

Для визначення дійсного напруженого стану елементів (МГТ) з метою оцінки її несучої здатності були проведені статичні і динамічні випробування. При випробуванні вимірювались фіброві напруження у гофрованих стінках труби, та вертикальні і горизонтальні переміщення середини МГТ. У якості випробувального навантаження при статичних випробуваннях використовували тепловоз ЧМЭ 3.

#### 4. 1. Статичні випробування

При статичних випробуваннях використовували такі схеми завантаження МГК рухомим складом залізниць (рис. 5).

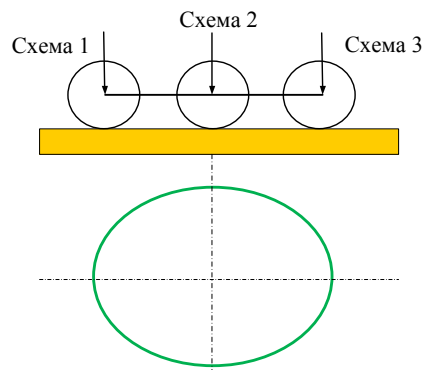


Рис. 5. Схеми завантаження металевої гофрованої труби

Схема 1 – перша вісь локомотива встановлювалась над віссю труби.

Схема 2 – друга вісь локомотива встановлювалась над віссю труби для створення максимального згинального моменту.

Схема 3 – третя вісь локомотива встановлювалась над вершиною труби.

Схема розміщення тензодатчиків та датчиків для визначення переміщень на МГК наведена на рис. 6, 7 відповідно.

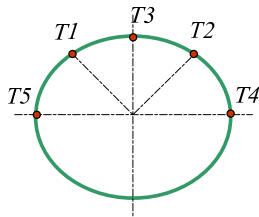


Рис. 6. Схема розташування тензодатчиків на металевій гофрованій трубі

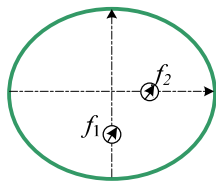


Рис. 7. Схема розташування датчиків для визначення переміщень на металевій гофрованій трубі

Результати експериментальних досліджень фібрових напружень металеві гофрованої труби на статичні навантаження наведені на рис. 8.

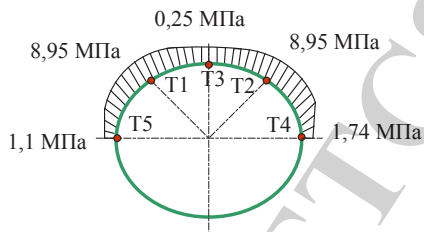


Рис. 8. Епюра напружень на металевій гофрованій трубі від дії статичного навантаження при проході локомотиву ЧМЕ-3

При статичних випробуваннях труби зафіксовано, що вертикальна відносна деформація (прогин) у середній частині труби становить 2,05 мм при завантаженні за схемою 2. Максимальні фіброві напруження у верхній точках становили 8,95 МПа, що не перевищують допустимих напружень. Отже, метал труби працює у пружному стані без переходу у пластичний.

**4. 2. Динамічні випробування**

При динамічних випробуваннях використовували графікові поїзди з тепловозом 2М62 з вагонами вантажного та пасажирського парку, які курсували зі швидкістю 25 км/год.

Результати експериментальних досліджень фібрових напружень металеві гофрованої труби на динамічні навантаження наведені на рис. 9.

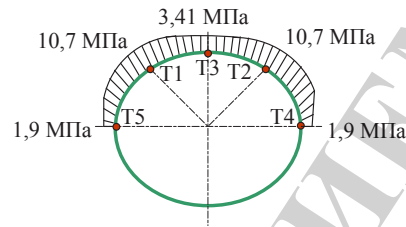


Рис. 9. Епюра напружень на металевій гофрованій трубі від дії динамічного навантаження при проході тепловоза 2М62

При динамічних випробуваннях зафіксовані такі результати:

- максимальна, вертикальна відносна деформація труби зафіксована при проходженні вантажного поїзда і становить 2,74 мм. При цьому залишкова деформація становила 0,21 мм;

- горизонтальна відносна деформація при проходженні вантажного поїзда становила 0,77 мм. При цьому залишкова деформація становила 0,038 мм.

Максимальні фіброві напруження від дії динамічного навантаження, у верхній частині труби у визначених точках становили 10,7 МПа.

**5. Скінченно-елементний розрахунок напружено-деформованого стану металевих гофрованих конструкцій**

В основі теоретичного дослідження роботи залізничної колії із МГТ, з детальною оцінкою напруженого стану в елементах металевих листів від дії рухомого складу залізниць лежить методика, що базується на теорії методу скінченних елементів (МСЕ). Схема просторової математичної моделі для дослідження та детальної оцінки роботи всієї МГК з метою отримання достовірних результатів напруженого стану елементів від зовнішньої дії сил, що передаються від коліс рухомого складу, наведена на рис. 10.

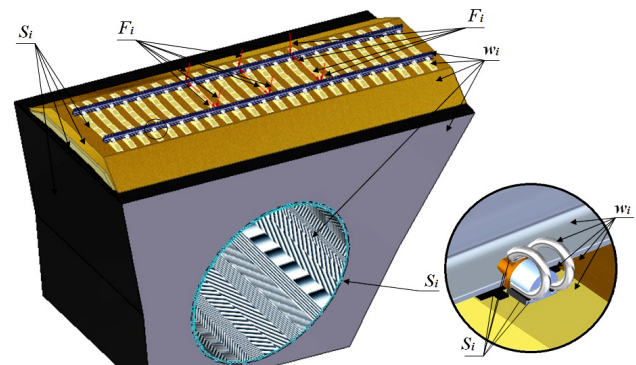


Рис. 10. Схема просторової математичної моделі конструкції залізничної колії із МГТ:  $W_i$  – тверdotілий  $i$ -ий елемент (об'єкт) сукупності елементів колії;  $F$  – сукупність навантажень;  $S_i$  – множина (сукупність) зв'язків між об'єктами

Враховуючи велике розсіювання характеристик залізничної колії та залізничних екіпажів, точність вимірювання вказаних величин під час моделювання знаходиться з допустимою похибкою на рівні  $E=10\%$ . Міра змін цієї величини встановлюється коефіцієнтом

варіації «v», значення якого було прийнято v=10%. При математичному моделюванні під час виконання дискретизації конструкції кількість кроків (рівнів) розбивки області на скінченні елементи (далі СЕ), визначалась виходячи з різниці у результатах не більше чим 5%.

На основі попередньо проведених досліджень отримав подальший розвиток наступний алгоритм [12, 13]:

$$R = f_{MKE}(\Omega, F, P, n | \Delta = 5\%), \quad (1)$$

де

$$\Omega = \{\{\omega_1, \omega_2, \omega_i \dots\}, \{S_1, S_2, S_i \dots\}\}, \quad (2)$$

$$\omega_i = \{\{g_{i1}, g_{i2}, g_{ij} \dots\}, \{\phi_{i1}, \phi_{i2}, \phi_{ij} \dots\}\}, \quad (3)$$

Звідси

$$R = \{\{\sigma_{11}, \sigma_{12}, \sigma_{1k} \dots \sigma_{ik} \dots\}, \{y_{11}, y_{12}, y_{1k} \dots y_{ik} \dots\}\}, \quad (4)$$

де  $\Omega$  – збірка елементів колії;  $\omega_i$  – твердотілий і-ий елемент (об'єкт) сукупності елементів колії (баластний шар, ґрунтова засипка, МГК, шпали, рейки);  $g_{ij}, \phi_{ij}$  – відповідно j-ий елемент сукупності геометричних параметрів і множина фізико-механічних властивостей об'єкта  $\omega_i$ ;  $S = \{S_1, S_2, S_i \dots\}$  – множина (сукупність) зв'язків між об'єктами;  $F$  – сукупність навантажень та закріплень;  $n$  – кількість циклів розрахунку;  $\Delta$  – % на схожість суміжних результатів;  $\sigma_{ik}, y_{ik}$  – k-ий елемент напружень та деформацій об'єкта  $\omega_i$ ;  $R$  – стан моделі відповідно розрахункам МСЕ.

Напруження, що пов'язані із деформаціями, описуються співвідношенням:

$$\{\sigma\} = [D]\{\epsilon^{el}\}, \quad (5)$$

де  $\{\sigma\}$  – вектор напружень;  $[D]$  – матриця жорсткості;  $\{\epsilon^{el}\}$  – вектор пружної деформації.

Вектор напружень визначається з виразу:

$$\{\sigma\} = [\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \sigma_{xy}, \sigma_{yz}, \sigma_{xz}]^T. \quad (6)$$

Вихідний масив, виражений вектором пружної деформації, описується виразом:

$$\{\epsilon\} = \{\epsilon^{th}\} + [D^{-1}]\{\sigma\}, \quad (7)$$

де  $\{\epsilon\}$  – вектор повної деформації;  $\{\epsilon^{th}\}$  – вектор температурної деформації.

Звідси:

$$\{\epsilon\} = \{\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z, \epsilon_{xy}, \epsilon_{yz}, \epsilon_{xz}\}. \quad (8)$$

Вектор температурної деформації визначається з виразу:

$$\{\epsilon^{th}\} = \Delta T [\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z, 0, 0, 0]^T, \quad \Delta T = T - T_{REF}, \quad (9)$$

де  $\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z$  – коефіцієнт темпера x, y, z;  $T$  – існуюча температура в певній точці;  $T_{REF}$  – температура, при якій деформації відсутні.

Вектори деформацій ( $\epsilon$ ) у певних точках x, y, z, xy, yz, xz описуються наступними рівняннями:

$$\begin{aligned} \epsilon_x &= \Delta_x \Delta T + \sigma_x / E_x - \nu_{yx} \sigma_y / E_y - \nu_{zx} \sigma_z / E_z, \\ \epsilon_y &= \Delta_y \Delta T + \sigma_y / E_y - \nu_{xy} \sigma_x / E_x - \nu_{zy} \sigma_z / E_z, \\ \epsilon_z &= \Delta_z \Delta T + \sigma_z / E_z - \nu_{xz} \sigma_x / E_x - \nu_{yz} \sigma_y / E_y, \\ \epsilon_{xy} &= \frac{\sigma_{xy}}{G_{xy}}, \quad \epsilon_{yz} = \frac{\sigma_{yz}}{G_{yz}}, \quad \epsilon_{zx} = \frac{\sigma_{zx}}{G_{zx}}, \end{aligned} \quad (10)$$

де  $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$  – величини деформацій елемента в напрямку осей x, y, z;  $\epsilon_{xy}, \epsilon_{yz}, \epsilon_{zx}$  – деформації зсуву СЕ-точок у площинах xy, yz, xz;  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  – напруження в елементах по осі x, y, z;  $\sigma_{xy}, \sigma_{yz}, \sigma_{zx}$  – напруження зсуву в площинах xy, yz, xz.

Згідно (5), обернена матриця описується наступним виразом:

$$[D^{-1}] = \begin{vmatrix} 1/E_x & -\nu_{yx}/E_y & -\nu_{zx}/E_z & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{yx}/E_x & 1/E_y & -\nu_{zy}/E_z & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{zx}/E_z & -\nu_{zy}/E_y & 1/E_z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_y & 1/G_z \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}, \quad (11)$$

де  $E$  – модуль Юнга по осях x, y, z;  $\nu$  – коефіцієнт Пуассона;  $G$  – модуль зсуву в площинах xy, yz, xz.

Напруження ( $\sigma$ ), що виникають в елементах у напрямку осей x, y, z, та напруження зсуву в площинах xy, yz, xz, описуються за наступними виразами:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= E_x / h \left[ 1 - (\nu_{yx}^2) E_y / E_z \right] (\epsilon_x - \Delta_x \Delta T) + \\ &+ E_x / h \left[ \nu_{yx} + \nu_{zx} \nu_{yz} E_y / E_z \right] \times \\ &\times (\epsilon_y - \Delta_y \Delta T) + E_x / h \left[ \nu_{zx} + \nu_{yz} \nu_{zx} \right] \times (\epsilon_z - \Delta_z \Delta T), \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \sigma_y &= E_y / h \left[ 1 - (\nu_{zx}^2) E_x / E_z \right] (\epsilon_y - \Delta_y \Delta T) + \\ &+ E_x / h \left[ \nu_{yx} + \nu_{zx} \nu_{yz} E_y / E_z \right] \times \\ &\times (\epsilon_x - \Delta_x \Delta T) + E_y / h \left[ \nu_{yx} + \nu_{zx} \nu_{yz} E_x / E_z \right] \times \\ &\times (\epsilon_z - \Delta_z \Delta T), \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \sigma_z &= E_z / h \left[ 1 - (\nu_{yx}^2) E_x / E_y \right] (\epsilon_z - \Delta_z \Delta T) + \\ &+ E_x / h \left[ \nu_{zx} + \nu_{yz} \nu_{yx} \right] \times \\ &\times (\epsilon_x - \Delta_x \Delta T) + E_y / h \left[ \nu_{yz} + \nu_{zx} \nu_{yx} E_x / E_y \right] \times \\ &\times (\epsilon_y - \Delta_y \Delta T), \end{aligned} \quad (14)$$

$$\sigma_{zy} = G_{zy} \epsilon_{zy}, \quad (15)$$

$$\sigma_{zx} = G_{zx} \epsilon_{zx}, \quad (16)$$

де

$$h = 1 - (v_{xy}^2)E_x / E_y - (v_{zy}^2)E_y / E_z - (v_{xz}^2)E_x / E_z - 2v_{xy}v_{zy}v_{xz}E_x / E_z. \tag{17}$$

Модуль зсуву в площинах ху, уз, хz описується наступними виразами:

$$G_{xy} = (E_x E_y) / (E_x + E_y + 2v_{yx} E_x), \tag{18}$$

$$G_{zy} = (E_y E_z) / (E_y + E_z + 2v_{yz} E_y), \tag{19}$$

$$G_{xz} = (E_x E_z) / (E_x + E_z + 2v_{zx} E_x). \tag{20}$$

Чисельний розрахунок напружено-деформованого стану МГК отримано за допомогою ліцензійного програмного комплексу FEMAP MSC NASTRAN. При виконанні даних розрахунків прийнято, що товщина цинкового покриття МГК становить 85 мікрон (567 г/м<sup>2</sup>), питома вага ґрунту засипки становить  $\gamma=20$  кН/м<sup>3</sup>; модуль деформації ґрунту засипки –  $E_0=33$  МПа; відстань від підшви рейок до верху склепіння труби –  $h=1,88$  м; модуль пружності сталі –  $E=2,1 \cdot 10^5$  МПа; коефіцієнт Пуассона матеріалу споруди –  $\nu=0,25$ ; питома вага матеріалу МГК –  $\gamma_{sh}=145,4$  кН/м<sup>2</sup>; площа перерізу однієї хвилі гофри –  $\alpha=0,757 \cdot 15=11,355$  см<sup>2</sup>; розрахунковий опір сталі за межею текучості –  $R_y=235$  МПа; коефіцієнт умов роботи –  $m=0,9$ . Розподіл навантажень по шпалах вздовж колії отримали із розрахунків колії на міцність [10].

У якості навантаження прийняте навантаження від власної ваги ґрунту засипки, а також навантаження від локомотива 2М62. Результати еквівалентних сил, що

виникають від локомотива 2М62 при проходженні нерівностей на залізничній колії, наведені на рис. 11.

Моделювання напружено-деформованого стану МГК виконуємо відповідно до рекомендації із проведення скінченно-елементного моделювання при використанні програмного комплексу NX NASTRAN, що наведені у роботі [11–19].

У випадку виникнення пластичних деформацій у металі труби під час розрахунків задаємо критерій фон Мізеса. В цьому випадку до параметрів  $E, \nu, \rho$  додатково задаємо значення межі текучості металу труби  $\sigma_j$ .

Результати скінченно-елементного розрахунку напружено-деформованого стану МГК наведено у табл. 1.

Проведеними дослідженнями встановлено, що при перевантаженні МГК у 2,5 рази метал труби знаходиться на межі переходу у пластичний стан. У результаті чого напруження у стінках труби досягають значення 235 МПа, що може бути загрозою утворення незворотніх вертикальних деформацій труби.

Безпосередньою причиною виникнення залишкових деформацій металевої гофрованої труби став ріст напружень у металевих листах труби. Умова зародження пластичного шарніру, яка має місце у склепінні МГК, виконується тільки за умови одночасного, несприятливого впливу двох факторів (причин). Першою причиною є допущення розвитку нерівності за межі допустимих значень без виконання заходів щодо її усунення. Друга причина – зниження ступеню ущільнення ґрунтового засипання нижче 90 %. При відсутності однієї із причин зародження пластичного шарніру не може відбутися. У спільному впливі обох причин переважне значення має перша причина, частка впливу якого становить 42 %, частка другої причини становить 22 %.

Таблиця 1

Напружено-деформований стан МГК

№ п/п	Стан колії	RP, %	Точки визначення еквівалентних напружень										
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	Проектний стан колії і без навантаження від рухомого складу залізниць	85	1,2	2,5	8,2	17,2	19,4	12,6	7,2	5,6	5,4	4,1	0,9
		90	1,2	3,2	7,3	10,9	11,8	9,1	5,9	5,7	5,4	4,5	1,1
		95	2,5	4,3	6,9	9,2	9,7	8,1	6,1	5,8	5,9	4,5	1,2
		97	3,0	4,6	6,8	8,7	9,1	7,8	6,2	5,7	5,6	4,5	3,2
2	Проектний стан колії і навантаження від локомотива 2М62	85	17,5	12,2	38,7	52,6	43,8	20,5	5,7	8,1	14,2	7,1	1,5
		90	9,1	19,2	30,2	34,3	28,5	16,9	9,4	9,4	11,1	7,1	4,2
		95	14,4	20,7	27,2	28,8	24,1	16,1	10,6	9,7	10,0	7,9	5,6
		97	15,6	20,9	26,3	27,3	22,9	15,9	10,9	9,7	9,6	7,8	5,8
3	Нерівність яка не обмежується нормативними документами: $l=3$ м; $h=10$ мм; $i_{кр}=3,3$ ‰ і навантаження від локомотива 2М62	85	29,8	20,6	65,2	88,2	73,4	34,3	9,4	13,7	23,8	11,9	2,4
		90	15,2	32,2	50,7	57,6	47,7	28,3	15,8	15,8	18,7	13,2	6,9
		95	24,1	34,8	45,7	48,3	40,4	26,9	17,7	16,3	16,7	13,7	9,3
		97	26,2	35,2	44,0	45,8	38,5	26,6	18,2	16,3	16,1	13,1	9,7
4	Нерівність яка виникла при експлуатації колії: $l=5,7$ м; $h=44,7$ мм; $i_{кр}=16,5$ ‰ і навантаження від локомотива 2М62	85	79,8	155	176,2	235,1	198,1	92,6	64,3	36,8	34	32,4	8,5
		90	54,1	96,9	136,9	185	128,9	76,4	49,8	45,0	45,0	35,3	24
		95	65,2	91,8	123,3	130,5	109,2	72,7	47,9	43,0	45,1	35,0	25,0
		97	70,7	94,8	119,1	123,6	103,9	71,7	49,1	43,9	43,7	35,1	26,3

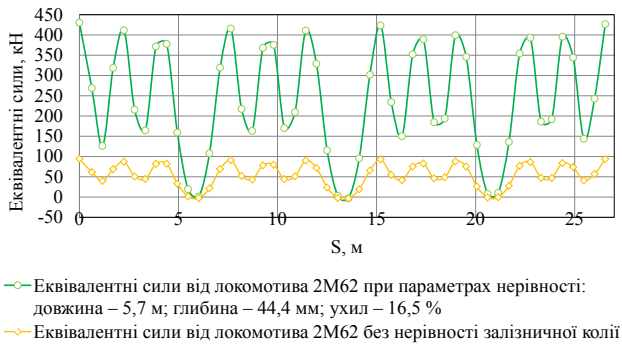


Рис. 11. Еквівалентні сили від локомотива 2М62 при значенні модуля пружності підрейкової основи 92,1 МПа

Результати порівняння теоретичних розрахунків напруженого стану МГК із експериментальними даними отриманими при проектному стані колії та проектному ущільненні ґрунтової засипки наведено на рис. 11. Із даних результатів видно, що максимальні напруження становлять 10,7 МПа (табл. 1). Отже, метал конструкції від тимчасового навантаження працює у пружній стадії і при відсутності критичних деформацій має достатній запас міцності за допустимими напруженнями. Однак визначити напружений стан конструкції в цілому, в якій вже є деформації, і які перевищують граничні величини, потребує подальших досліджень.

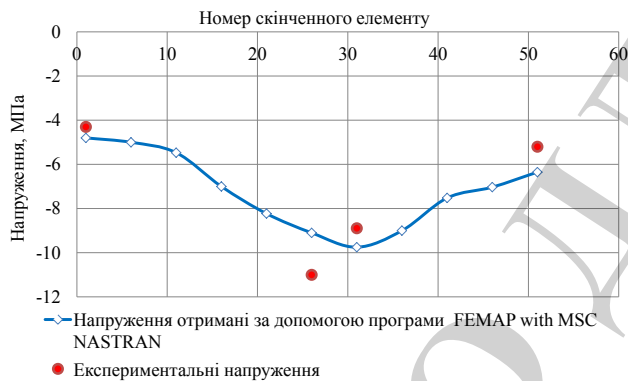


Рис. 12. Порівняльний графік величин напружень отриманих експериментальним та розрахунковим шляхом

Згідно із рис. 12, порівняльна характеристика отриманих експериментальних напружень з теоретичними підтверджує достовірність результатів отриманих математичним моделюванням. Фіброві напруження у гофрі труби від локомотиву 2М62, визначені експериментальним шляхом (при випробуванні), знаходяться в інтервалі 5–10 % від розрахованих теоретично. Тобто конструктивний коефіцієнт  $K < 1,0$ , що свідчить про правильність прийнятих у розрахунках передумов. Тому дана методика рекомендується для подальшого практичного застосування з метою оцінки несучої здатності МГК великого діаметру.

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

Проведені аналітичні та експериментальні дослідження міцності МГК при взаємодії з ґрунтом за-

сипки із врахуванням комплексу факторів – ступеня ущільнення ґрунтової засипки, величини динамічного навантаження від рухомого складу, впливу конструкції ВБК та величини засипки над трубою. При проектному ущільненні ґрунтової засипки, яке становить 95 % по методу Проктора, встановлено, що при перевантаженні МГК у 2,5 рази метал труби знаходиться на межі переходу у пластичний стан. У результаті чого напруження у стінках труби досягають значення 235 МПа, що може бути загрозою утворення незворотних вертикальних деформацій труби. 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.

Аналіз міцності МГК за наведеною методикою надає можливість оцінити працездатність МГК у залежності від діаметру труби та фізико-механічних характеристик ґрунту засипки. А 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.

Одним із недоліків проведених досліджень є те, що у розрахунковій моделі не враховувались деформації, що вже були зароджені у процесі експлуатації МГК. Тому у подальших науково-дослідних роботах оцінка несучої здатності МГК буде спрямована із врахуванням існуючих деформацій. Ці дослідження потребують подальшої роботи, з метою формування оціночних критеріїв з надійності та функціональної безпеки транспортних споруд залізничної колії.

### 7. Висновки

1. Деформації вертикального та горизонтального діаметрів металеві труби у початковий період експлуатації металеві труби мають незатухаючий характер. І тільки у період ущільнення ґрунтової засипки до нормативних значень залишкові деформації зменшуються до нуля. Найпоширенішими видами руйнування труби є викришування металу біля болтових з'єднань, корозія металевих труб і втрата стійкості гофри.

2. При статичних експериментальних випробуваннях труби встановлено, що вертикальна відносна деформація (прогин) у середній частині труби становить 2,05 мм. Максимальні фіброві напруження у верхній точках труби становили 8,95 МПа, що не перевищують допустимих напружень.

3. При динамічних експериментальних випробуваннях встановлено: максимальна, вертикальна відносна деформація труби зафіксована при проходженні вантажного поїзда і становить 2,74 мм. При цьому залишкова деформація становила 0,21 мм; горизонтальна відносна деформація при проходженні вантажного поїзда становила 0,77 мм. При цьому залишкова деформація становила 0,038 мм. Максимальні фіброві напруження від дії динамічного навантаження, у верхній частині труби у визначених точках становили 10,7 МПа. Теоретичним методом розрахунку (методом скінченних елементів) встановлено, що запас міцності металевих гофрованих листів труби становить від 45 % до 34 % залежно від ступеня ущільнення ґрунтової засипки. Для виникнення пластичних незворотніх деформацій зовнішнє навантаження повинна бути перевищене більш ніж у 2,5 рази у порівнянні з навантаженнями при проектному стані колії. Результати порівняння теоретичних розрахунків напруженого стану

МГТ із експериментальними даними отриманими при проектному стані колії показали достатню збіжність результатів отриманих двома методами. Фіброві напруження у гофрі труби від локомотиву 2М62, визначені експериментальним шляхом (при випробуванні) знаходяться в інтервалі 5–10 % від розрахованих теоретично. Тобто конструктивний коефіцієнт  $K < 1,0$ , що свідчить про правильність прийнятих у розрахунках передумов. Тому дана методика рекомендується для подальшого практичного застосування з метою оцінки несучої здатності МГК великого діаметру. Створення рекомендацій з проектування та оцінки несучої здатності МГК потребує великого обсягу експериментальної і теоретичної роботи. Але хороша нормативна база дозволить приймати оптимальні проектні рішення та підвищить якість робіт. У свою чергу, це збільшить термін служби МГК і зробить їх застосування доцільнішим та перспективнішим на залізничних і автомобільних дорогах України.

#### Література

1. Жинкин, А. Проблемы и перспективы типового проектирования металлических гофрированных конструкций [Текст] / А. Жинкин // Транспорт Российской Федерации. – 2011. – № 2. – С. 53–54.
2. Металлические гофрированные конструкции: достоинства и перспективы [Текст] // Евразия Вести. Транспортная газета. Министерство транспорта РФ. – 2008. – № 2.
3. ОДМ 218.2.001-2009. Рекомендации по проектированию водопропускных металлических гофрированных труб [Текст]. – Федеральное дорожное агентство, 2009. – № 252-р.
4. Коваль, П. М. Нормування при проектуванні і будівництві споруд з металевих гофрованих конструкцій [Текст] / П. М. Коваль, І. П. Бабяк, Т. М. Сітдикова // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту зал. трансп. ім. ак. В. Лазаряна. – 2010. – № 39. – С. 114–117.
5. Гнатюк, І. Новий «стиль» старого мосту [Електронний ресурс] / І. Гнатюк // Всеукраїнська транспортна газета Магістраль. – 2011. – Режим доступу: <http://www.magistral-uz.com.ua/>
6. Черепов, В. В. Варіантне проектування при прийнятті інженерного рішення по відновленні експлуатаційного стану водопропускної труби [Текст] / В. В. Черепов, І. В. Шилін // Енерго- та ресурсозберігаючі технології при експлуатації машин та устаткування. – Донецьк, 2012. – С. 164–166.
7. Кочмарук, В. М. Аналіз факторів, які впливають на руйнування труби [Текст] / В. М. Кочмарук // Збірник наукових праць УкрДАЗТ. – 2010. – Вип. 118. – С. 140–143.
8. Taherl, M. E. Stability of deteriorated metal culverts including the effect of soil erosion [Text] / M. E. Taherl, I. D. Moore // GeoEngineering Centre at Queen's – RMC, Queen's University, Kingston, ON. – Toronto, 2009. – 10 p.
9. Pettersson, L. Design of soil steel composite bridges [Text] / L. Pettersson, H. Sundquist // Structural Desing and Bridges. – Stockholm, 2007. – 84 p.
10. Посібник до ВБН В.2.3-218-198:2007. Споруди транспорту. Проектування та будівництво споруд із металевих гофрованих конструкцій на автомобільних дорогах загального користування [Текст]. – К., 2007. – 122 с.
11. Mechelski, C. Modelowanie mostowych konstrukcji gruntowo-powlokowych [Text] / C. Mechelski. – Wroclaw, 2008. – 205 p.
12. Ковальчук, В. В. Скінченно-елементний розрахунок напружено-деформованого стану металевих гофрованих конструкцій при взаємодії із ґрунтом засипки у програмному середовищі NX NASTRAN [Текст] / В. В. Ковальчук // Вісник Львівського національного аграрного університету. – 2015. – № 16. – С. 19–25.
13. Настечик, М. П. Дослідження напруженого стану в елементах вузла проміжного рейкового скріплення типу КПП-5 під дією рухомого складу [Текст] / М. П. Настечик, І. О. Бондаренко, Р. В. Маркуль // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. – 2015. – Вип. 2 (56). – С. 146–156. doi: 10.15802/stp2015/42174
14. 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. – Вип. 3 (57). – С. 199–207. doi: 10.15802/stp2015/46079
15. Лучко, Й. Й. Дослідження несучої здатності металеві гофрованої конструкції за критерієм розвитку пластичного шарніру у верхній частині труби [Текст] / Й. Й. Лучко, В. В. Ковальчук, О. С. Набоченко // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. – 2015. – Вип. 5 (59). – С. 180–194. doi: 10.15802/stp2015/55340



16. Kovalchuk, V. Research and analysis of the stressed-strained state of metal corrugated structures of railroad tracks [Text] / V. Kovalchuk, J. Luchko, I. Bondarenko, R. Markul, B. Parneta // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – Vol. 6, Issue 7 (84). – P. 4–9. doi: 10.15587/1729-4061.2016.84236
17. 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
18. 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. – Vol. 2013. – P. 1–11. doi: 10.1155/2013/815158
19. Sysyn, M. Die Tragfähigkeit von Eisenbahndurchlässen in Abhängigkeit von der Bauausführung und der Instandhaltung [Text] / M. Sysyn, W. Kowaltschuk, O. Nabotschenko, U. Gerber // ETR – Eisenbahntechnische Rundschau. – 2016. – Issue 5. – P. 39–44.

ТОЛЬКО ДЛЯ ЧТЕНИЯ

