

## УДК 625.745.2.03-408.8:624.014.046.2

Й. Й. ЛУЧКО<sup>1\*</sup>, В. В. КОВАЛЬЧУК<sup>2\*</sup>, О. С. НАБОЧЕНКО<sup>3\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Рухомий склад і колія», Львівська філія Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. І. Блажкевич, 12а, Львів, Україна, 79052, тел. +38 (097) 033 18 36, ел. пошта kovalchuk.diit@mail.ru, ORCID 0000-0002-3675-0503

<sup>2\*</sup>Каф. «Рухомий склад і колія», Львівська філія Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. І. Блажкевич, 12а, Львів, Україна, 79052, тел. +38 (097) 223 72 43, ел. пошта kovalchuk.diit@mail.ru, ORCID 0000-0003-4350-1756

<sup>3\*</sup>Каф. «Рухомий склад і колія», Львівська філія Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. І. Блажкевич, 12а, Львів, Україна, 79052, тел. +38 (067) 451 55 93, ел. пошта olganabochenko@mail.ru, ORCID 0000-0001-6048-2556

## ДОСЛІДЖЕННЯ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ МЕТАЛЕВОЇ ГОФРОВАНОЇ КОНСТРУКЦІЇ ЗА КРИТЕРІЄМ РОЗВИТКУ ПЛАСТИЧНОГО ШАРНІРУ

**Мета.** Дане дослідження спрямоване на: 1) проведення розрахунку еквівалентних сил, які виникають від рухомого складу залізниць у зимовий та літній періоди року при різних параметрах нерівностей залізничної колії та модуля пружності підрейкової основи; 2) дослідження несучої здатності металевої гофрованої конструкції (МГК) за показником розвитку пластичного шарніру у вершині металевої труби внаслідок отримання незворотних залишкових деформацій вертикального та горизонтального діаметрів труби.

**Методика.** Розрахунок еквівалентних сил проведений за методикою розрахунку залізничної колії на міцність та стійкість. Далі було розроблено математичний алгоритм у програмному середовищі Mathcad 14, за допомогою якого проводились розрахунки утворення пластичного шарніру у вершині труби при різних величинах нерівності залізничної колії та ступеню ущільнення ґрунтової засипки. При даних дослідженнях розрахунки проводилися при проектному значенні ступеня ущільнення ґрунтової засипки та величини динамічного навантаження від рухомого складу залізниць. **Результати.** 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 за умовою одночасного, несприятливого впливу двох факторів (причин). Це фактори: допущення розвитку нерівності колії за межі допустимих значень без виконання заходів щодо її усунення чи обмеження швидкості руху поїздів (перша причина); зниження ступеня ущільнення ґрунтової засипки нижче 90 % (друга причина). При відсутності однієї із причин зародження пластичного шарніру не відбудеться. **Наукова новизна.** Вперше досліджено несучу здатність металевої гофрованої конструкції великого діаметру (більше 6 м) при врахуванні комплексу факторів: ступеню ущільнення ґрунтової засипки, величини динамічного навантаження від рухомого складу залізниць за критерієм розвитку пластичного шарніру у металі труби при виникненні залишкових незворотних деформацій вертикального та горизонтального діаметрів МГК. **Практична значимість.** Отримані авторами результати несучої здатності металевих гофрованих конструкцій (типу горизонтальний еліпс поперечного перетину) можуть бути використані інженерами Мостовипробувальних станцій Укрзалізниця та Укравтодору й проектними організаціями, які займаються проектуванням металевих гофрованих конструкцій діаметром, більшим за 6 м.

**Ключові слова:** металеві гофровані конструкції; залишкові деформації; еквівалентні сили; пластичний шарнір; напруження

### Вступ

Металеві гофровані конструкції (МГК) в останні два-три десятиліття набули широкого розповсюдження у всьому світі через їх високу ефективність застосування. Ці споруди поступово адаптуються у транспортне будівництво і України. Такі конструкції використані під час

будівництва транспортних розв'язок та перепуску водотоків в АР Крим на автомобільній дорозі Київ – Одеса, Харків – Сімферополь [7, 8], на залізниці споруджено МГК на дільниці Вадул-Сирет – Держкордон [2, 4, 10].

Під час спостереження за поведінкою металевої гофрованої труби у процесі експлуатації [4] виявилось, що вони мають незату-

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

хаючий характер. Так, аналіз інтенсивності накопичення залишкових деформацій за один рік служби металеві гофрованої труби показав, що відносні деформації труби не збільшуються, а поступово зменшуються. Графік залишкових вертикальних та горизонтальних деформацій із окресленням граничної (допустимої) величини цього значення наведено на рис. 1.

## Мета

Метою роботи є оцінка несучої здатності металеві гофрованої конструкції за показником утворення пластичного шарніру у вершині металеві труби при виникненні незворотних залишкових деформацій вертикального та горизонтального діаметрів МГК у момент експлуатації.

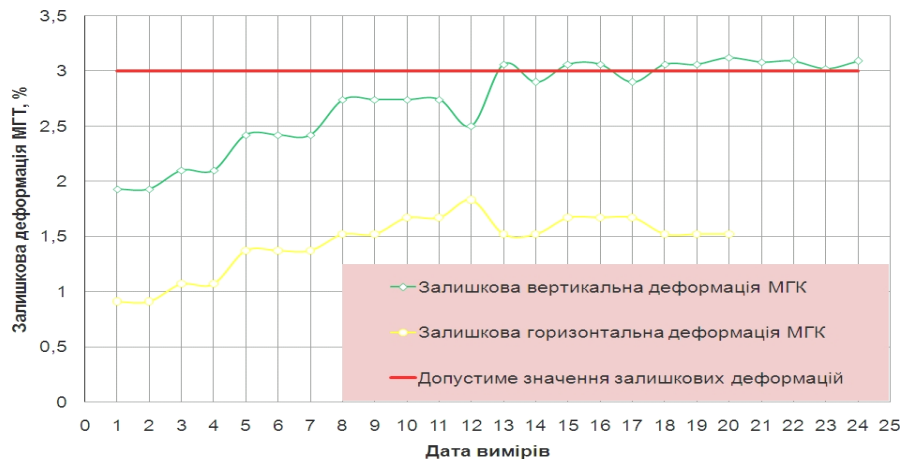


Рис. 1. Графік накопичення залишкових деформацій металеві гофрованої труби в період експлуатації

Fig. 1. Accumulation graph of residual deformation of the metal corrugated pipes during the operation

*Аналіз досліджень та публікацій.* Досвід застосування металевих гофрованих конструкцій показує, що значний вплив на їх напружено-деформований стан має ступінь ущільнення ґрунтової засипки [12, 14–19, 21]. Рекомендоване значення ступеня ущільнення повинно знаходитися у межах 0,95–0,97 (ступінь ущільнення визначений за методом Проктора [9, 18]). У роботі [16] зазначено, що зниження ступеня ущільнення ґрунту з 0,95 до 0,8 призводить до зменшення модуля деформації ґрунту у 4 рази, що, у свою чергу, спричиняє значне зростання у стінках конструкції напружень і деформацій.

Здійснення багаторічного моніторингу понад 900 об'єктів з гофрованих труб, побудованих протягом 1951–1965 рр. в штаті Огайо (США) [4], дозволило зробити такий 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 невласливого типу матеріалу. За даними [15], якщо деформації перебувають у межах 15–20 %, а висота шару над трубою більша за 1,8 м, то конструкція не вимагає для свого зміцнення додаткових заходів.

Проте у жодній із проаналізованих науково-дослідних роботах не виконувалася оцінка несучої здатності металевих гофрованих конструкцій за показником розвитку пластичного шарніру у вершині металеві труби. Тому дослідження напружено-деформованого стану металевих гофрованих конструкцій при виникненні залишкових деформацій вертикального та горизонтального діаметрів труби є актуальною задачею.

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

**Методика**

За основну умову перевірки несучої здатності металевої гофрованої конструкції вибрано перевірку розвитку пластичного шарніру у верхній частині труби. Двома основними факторами впливу на його розвиток є нерівність геометрії колії над віссю труби та ступінь ущільнення ґрунтової засипки.

*Вихідні дані до розрахунку МГК за міцністю та стійкістю.* З метою оцінки впливу нерівності на величину розвитку пластичного шарніру були виконані дослідження несучої здатності МГК при нерівностях геометрії колії у трьох випадках:

- у проектному стані;
- допустима нерівність згідно з діючими на залізницях України нормативними документами (тобто така нерівність, яка не потребує обмеження встановленої швидкості згідно з табл. 5 Технічних вказівок [13] та таблицею Д.8.11 Інструкції [6]);
- на момент виникнення найбільшої нерівності у профілі колії над трубою.

Приймається металева гофрована труба конструкції Multiplate MP 150 довжиною 12,69 м у формі горизонтального еліпсу (рис. 2) з такими 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, щільністю цинкового покриття товщиною 85 мікрон ( $567 \text{ г/м}^2$ ), питома вага ґрунту засипки становить  $\gamma = 20 \text{ кН/м}^3$ ; модуль деформації ґрунту засип-

ки –  $E_0 = 33 \text{ МПа}$ ; відстань від підшви рейок до верху склепіння труби –  $h = 1,88 \text{ м}$ ; еквівалентне навантаження, відповідно до ДБН В.2.3-14 залежно від довжини і форми лінії впливу –  $q = 235,3 \text{ кН/м}$ ; модуль пружності сталі –  $E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ МПа}$ ; коефіцієнт Пуассона матеріалу споруди –  $\nu = 0,25$ ; питома вага матеріалу МГК –  $\gamma_{sh} = 145,4 \text{ кН/м}^2$ ; площа перерізу однієї хвилі гофри –  $A = 0,757 \cdot 15 = 11,355 \text{ см}^2$ ; розрахунковий опір сталі за межею текучості –  $R_y = 235 \text{ МПа}$ ; коефіцієнт умов роботи –  $m = 0,9$ . Розподіл навантажень по шпалах вздовж колії отримали із розрахунків колії на міцність [3].

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 Террамеш. Модулі розташовуються горизонтальними ярусами. Основою для оголовок служать габіонні матраци Рено 3:2:0,23, вкладені на геотекстиль та сітку секугрід.

Висота верхнього оголовка 7,5 м, висота низового оголовка 7,5 м. Довжина укріплення лівобережного укосу земляного полотна 1 м та довжина кріплення правобережного укосу земляного полотна 28 м.

Параметри нерівностей та інші вихідні дані, які були прийняті для розрахунку еквівалентних сил від локомотива 2М62 та вантажного вагона, наведені в табл. 1.

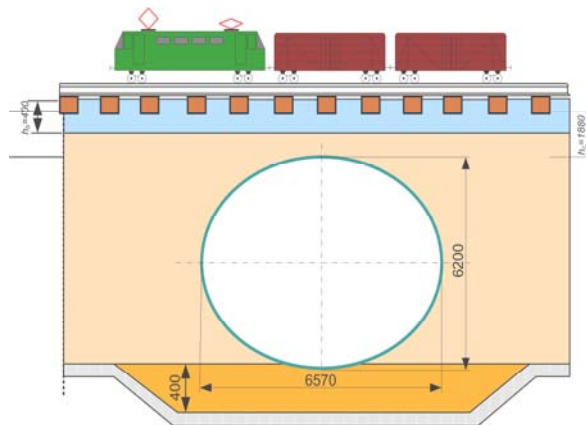


Рис. 2. Розрахункова схема задачі

Fig. 2. Calculation scheme of the task

Таблиця 1

## Вихідні дані для розрахунку еквівалентних сил

Table 1

## Initial data for calculation of equivalent forces

№ з/п	Вид вихідних даних	Розмірність	Значення
1	Локомотив	–	2М62, Вантажні напіввагони
2	Швидкість	км/год	40
3	Тип рейок	–	Р65
4	Тип шпал	–	залізобетонні
5	Рід баластної подушки	–	щебінь
6	Висота засипки	м	1,88
Параметри експлуатаційної нерівності			
7	Довжина нерівності	м	5,7
8	Глибина нерівності	мм	44,7
9	Ухил нерівності	‰	16,5
Параметри нерівності, що допускаються згідно з [10–14]			
10	Довжина нерівності	м	3
11	Глибина нерівності	мм	10
12	Ухил нерівності	‰	3,3
13	Модуль пружності підрейкової основи згідно з Правилами [3]	МПа	73,6 (літо) 92,1 (зима)
14	Відстань між осями шпал	м	0,625
15	Коефіцієнт $\alpha_0$	–	0,403
16	Коефіцієнт $\gamma$	–	1,0
17	Коефіцієнт $\alpha_1$	–	0,931
18	Коефіцієнт $\varepsilon$	–	0,332
19	Коефіцієнт $\beta$	–	0,87
20	Момент інерції рейки відносно горизонтальної осі	см <sup>4</sup>	3 548
21	Момент опору рейки відносно горизонтальної осі	см <sup>3</sup>	436
22	Опорна площа підкладки	см <sup>2</sup>	262,5
23	Довжина шпали	см	285
24	Ширина нижньої постелі шпали	см	27,5
25	Опорна площа напівшпали	см <sup>2</sup>	3 918,75

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

**Результати**

*Виклад основного матеріалу досліджень.*  
Результати розрахунків величин еквівалентних

сил від локомотива 2М62 наведені на рис. 3–4,  
а від вантажного вагона – на рис. 5–6.

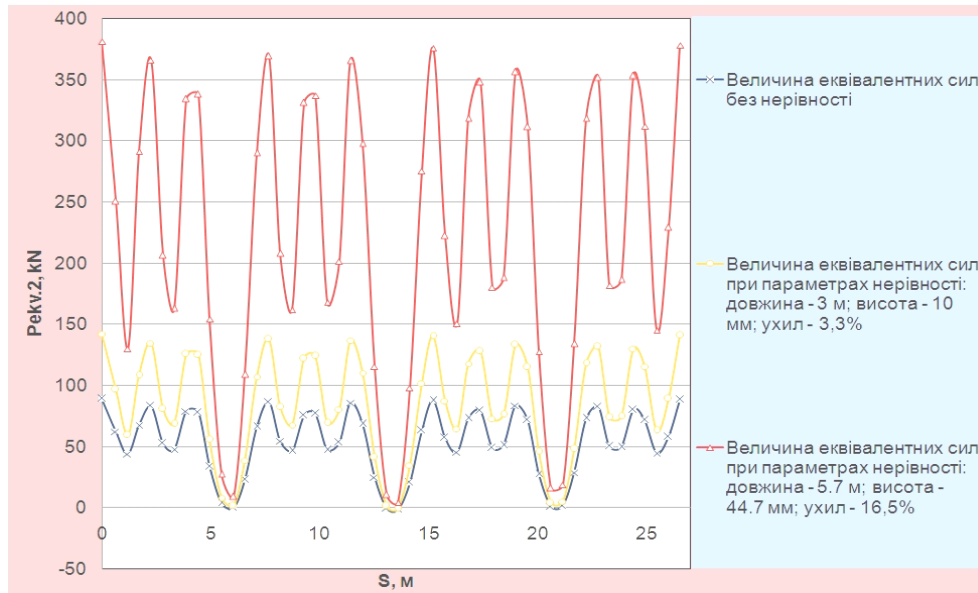


Рис. 3. Варіантний розрахунок величини еквівалентних сил від локомотива 2М62 при значенні модуля пружності підрейкової основи 73,6 МПа

Fig. 3. Variational calculation of equivalent forces from the locomotive 2M62 when the value of the modulus of elasticity of the rail base is 73,6 MPa

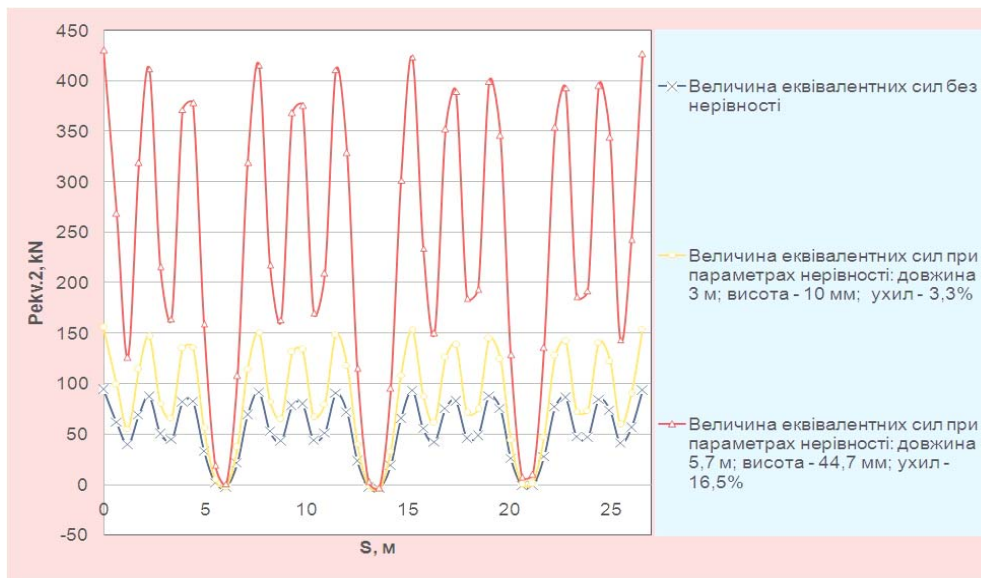


Рис. 4. Варіантний розрахунок величини еквівалентних сил від локомотива 2М62 при значенні модуля пружності підрейкової основи 92,1 МПа

Fig. 4. Variational calculation of equivalent forces from the locomotive 2M62 when the value of the modulus of elasticity of the rail base is 92,1 MPa

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

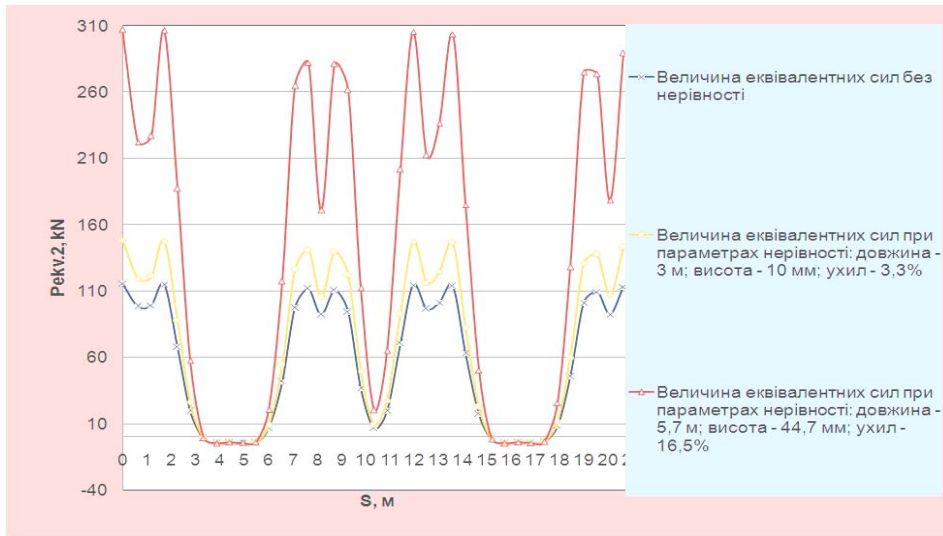


Рис. 5. Варіантний розрахунок величини еквівалентних сил від вантажного вагона при значенні модуля пружності підрейкової основи 73,6 МПа

Fig. 5. Variational calculation of equivalent forces from a freight car when the value of the modulus of elasticity of the rail base is 73,6 MPa

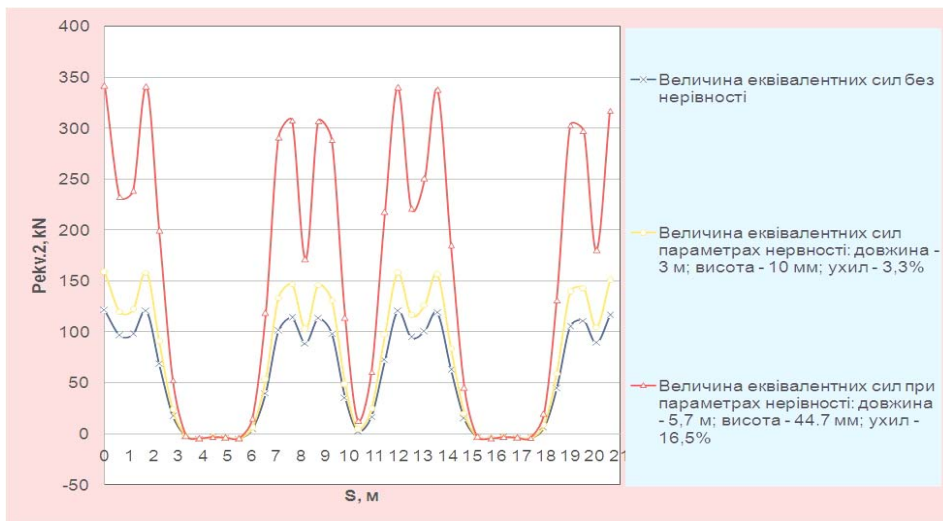


Рис. 6. Варіантний розрахунок величини еквівалентних сил від вантажного вагона при значенні модуля пружності підрейкової основи 92,1 МПа

Fig. 6. Variational calculation of equivalent forces from a freight car when the value of the modulus of elasticity of the rail base is 92,1 MPa

Оскільки розрахунок допустимих напружень та перевірка умови утворення пластичного шарніру виконується при найбільш несприятливих умовах (максимальній еквівалентній силі), тому виконуємо порівняння еквівалентних сил від локомотива 2М62 та вантажного вагона за методиками [1, 5, 11–14, 20–21]. Як

видно із рис. 3–6, величина еквівалентних сил при експлуатаційній нерівності від локомотива 2М62 є більшою, ніж від вантажного вагона, тому при розрахунку допустимих напружень та перевірці умови утворення пластичного шарніру у вершині склепіння МГК приймаємо еквівалентні сили від локомотива 2М62.

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Далі виконуємо багатоваріантний розрахунок перевірки металевої гофрованої труби на утворення пластичного шарніру за отриманими значеннями еквівалентних сил від локомотива 2М62 за допомогою програмного забезпечення Mathcad. Програма для розрахунку перевірки металевої гофрованої труби на утворення пластичного шарніру розроблена відповідно до методик [3, 18].

Максимальне напруження у стінці труби розраховується за допомогою рівняння Нав'є:

$$\sigma = \frac{N_{d.s}}{A} + \frac{M_{d.s}}{W} < f_{yd}, \quad (1)$$

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.

Проектна нормальна сила і згинальний момент розраховуються, як сума абсолютних значень максимальної нормальної сили і максимального згинального моменту, вони обчислюються окремо при навантаженні ґрунтом і рухомим навантаженням. При цьому використовуються коефіцієнти для роботи труби в стані нормальної експлуатації. Виконується перевірка забезпечення неперевищення границі текучості сталі  $f_{yd}$  у стінці верхньої частини труби впродовж експлуатаційних навантажень.

Перевірка розвитку пластичного шарніру у верхній частині труби у граничному стані виконується на максимально завантажену ділянку труби згідно з [20] за формулою:

$$\left( \frac{N_{d.u}}{\omega f_{yd} A} \right) + \left( \frac{M_{d.u}}{M_u} \right) \leq 1.0, \quad (2)$$

де  $N_{d.u}, M_{d.u}$  – сили та моменти сил у стані нормальної експлуатації;  $A$  – площа поперечного перерізу та момент опору перерізу на одиницю довжини труби;  $M_u$  – допустиме значення згинального моменту для одиниці довжини профілю труби, при якому досягаються напруження текучості.

Значення у знаменнику першої складової формули (2) розраховується таким чином

$$\omega = N_{cr} / Af_{yd}, \quad (3)$$

де  $N_{cr}$  – критичне навантаження, що обчислюється, ґрунтуючись на теоріях авторів Klöppel&Glock [18], за формулою:

$$N_{cr.el} = \frac{3\xi}{\mu} \sqrt{\frac{E_{jd}(EI)_s}{R_t}}, \quad (4)$$

де  $E_{jd}$  – проектний модуль зсуву для ґрунту;  $(EI)_s$  – жорсткість стінки труби на одиницю її довжини;  $\mu$  – параметр, що враховує недостатній боковий опір ґрунту, якщо висота засипки над трубою є мала; розраховується за наступними формулами, які виражаються з умови зменшення модуля зсуву ґрунту:

$$\frac{E_{j.red}}{E_j} = \eta_j = 1 - \left( \frac{1}{1 + \kappa} \right)^2, \quad (5)$$

$$\mu = \left( 1,22 + 1,95 \left( \frac{(EI)_s}{\eta_j E_{jd} R_t^3} \right)^{0,25} \right) \frac{1}{\sqrt{\eta_j}}. \quad (6)$$

У випадку, якщо  $R_t = D/2$ , ця залежність має вигляд:

$$\mu = \left( 1,22 + 1,95 \left( \frac{8}{\eta_j \lambda_f} \right)^{0,25} \right) \frac{1}{\sqrt{\eta_j}}. \quad (7)$$

Параметри  $\xi$  та  $\kappa$  розраховуються за формулами:

$$\xi = \sqrt{\kappa} \leq 1,0, \quad (8)$$

$$\kappa = h_c / R_t. \quad (9)$$

Допустиме значення згинального моменту сил для роботи труби у граничному стані визначається за формулою:

$$M_u = Zf_{yd}, \quad (10)$$

де  $Z$  – пластичний момент опору одиниці довжини труби.

За допомогою програми Mathcad було виконано розрахунок характеристик ґрунту засипки залежно від ступеня її ущільнення. Результати розрахунків наведені у табл. 2.

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Результати багатоваріантних розрахунків перевірки металевої гофрованої труби на утворення пластичного шарніру при різній величині ступеня ущільнення ґрунтової засипки, здійс-

нених за допомогою розробленої програми у програмному середовищі Mathcad, зведено в табл. 3–4.

**Розрахункові характеристики ґрунтів при різних ступенях ущільнення**

Таблиця 2

**Design characteristics of soils at different degrees of compaction**

Table 2

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

Таблиця 3

**Перевірка умови утворення пластичного шарніра у МГК при модулі пружності підрейкової основи 73,6 МПа**

Table 3

**Checking the conditions of the plastic hinge formation in the MCC when the module of elasticity of the rail base is 73,6 MPa**

Стан колії	Ступінь ущільнення ґрунтової засипки $RP$ , %			
	85	90	95	97
Без нерівності (проектне положення колії)	54,555	43,906	29,677	24,186
	0,226	0,159	0,108	0,135
Нерівність з параметрами: $l = 3$ м; $h = 10$ мм; $i_{\text{нер}} = 3,3$ ‰	93,883	75,276	53,464	45,047
	0,403	0,295	0,186	0,144
Нерівність з параметрами: $l = 5,7$ м; $h = 44,7$ мм; $i_{\text{нер}} = 16,5$ ‰	270,516	216,169	160,299	138,742
	1,233	0,949	0,676	0,573

Примітка: у чисельнику наведені значення напружень, а в знаменнику – значення величини пластичного шарніру.

Таблиця 4

**Перевірка умови утворення пластичного шарніра у МГК при модулі пружності підрейкової основи 92,1 МПа**

Table 4

**Checking the conditions of plastic hinge formation in the MCC when the module of elasticity of the rail base is 92,1 MPa**

Стан колії	Ступінь ущільнення ґрунтової засипки $RP$ , %			
	85	90	95	97
Без нерівності (проектне положення колії)	55,21	44,428	30,073	24,53
	0,229	0,161	0,107	0,134



Стан колії	Ступінь ущільнення ґрунтової засипки $RP$ , %			
	85	90	95	97
Нерівність з параметрами: $l = 3$ м; $h = 10$ мм; $i_{\text{нер}} = 3,3$ ‰	98,894	79,273	56,495	47,706
	0,425	0,313	0,199	0,156
Нерівність з параметрами: $l = 5,7$ м; $h = 44,7$ мм; $i_{\text{нер}} = 16,5$ ‰	295,146	235,815	175,196	151,807
	1,353	1,045	0,749	0,637

Примітка: у чисельнику наведені значення напружень, а в знаменнику – значення величини пластичного шарніра.

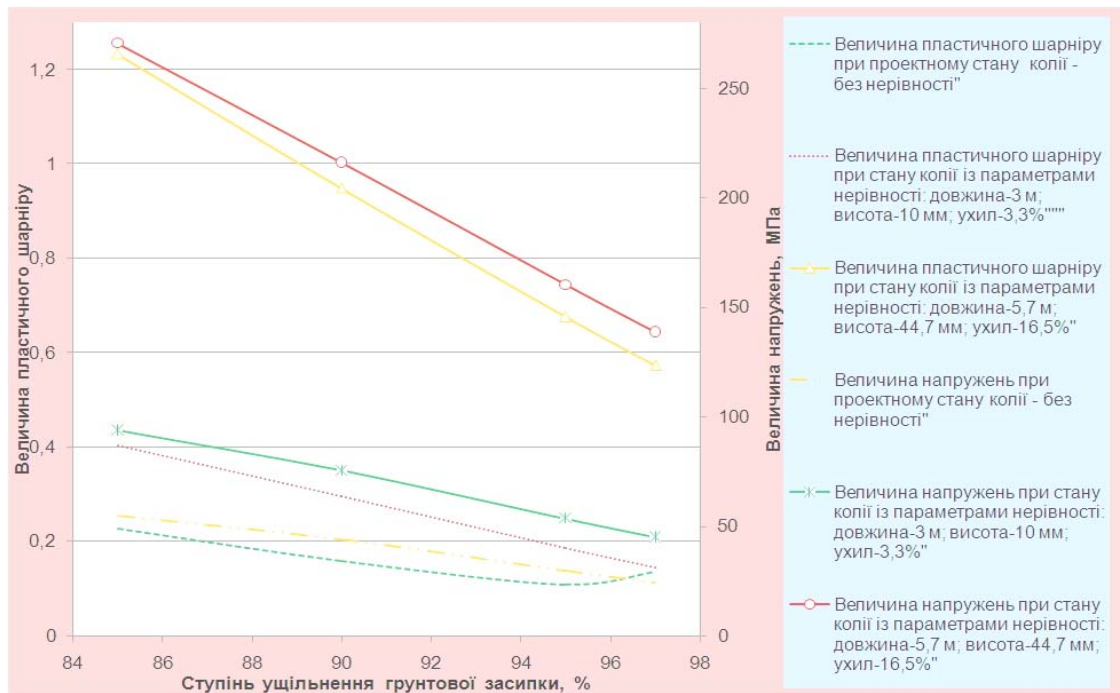


Рис. 7. Перевірка умови утворення пластичного шарніра у МГК при модулі пружності підрейкової основи 73,6 МПа

Fig. 7. Checking the conditions of plastic hinge formation in the MCC when the module of elasticity of the rail base is 73,6 MPa

Аналіз результатів багатоваріантного розрахунку напружень, що виникли у вершині склепіння МГК, показав:

1) напруження, які виникли внаслідок експлуатаційної нерівності, складають 138,742 МПа (табл. 3, рис. 8) та 151,807 МПа (табл. 4, рис. 8) при ступені ущільнення ґрунтової обійми 97 %, що є меншими за допустимі напруження 235 МПа;

2) напруження, які виникли без наявності нерівності в результаті ущільнення ґрунтової обійми 90 %, складають 43,906 МПа (табл. 3, рис. 7) та 44,428 МПа (табл. 4, рис. 8); при ступені ущільнення ґрунтової обійми 85 % – 54,555 МПа (табл. 3) та 55,21 МПа (табл. 4), є меншими за допустимі напруження 235 МПа;

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

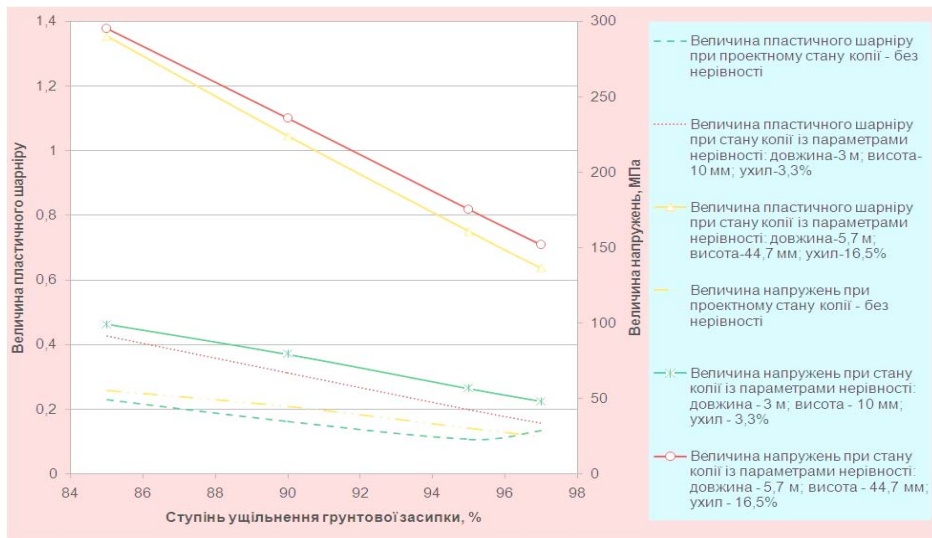


Рис. 8. Перевірка умови утворення пластичного шарніра у МГК при модулі пружності підрейкової основи 92,1 МПа

Fig. 8. Checking the conditions of plastic hinge formation in the MCC when the module of elasticity of the rail base is 92.1 MPa

3) напруження, які виникли внаслідок нерівності, яка допускається згідно з табл. 5 [13] та табл. Д.8.11 [6], складають 45,047 МПа (табл. 3, рис. 7) та 47,706 МПа (табл. 4, рис. 8), при ступені ущільнення ґрунтової обойми 97 %; 75,276 МПа (табл. 3, рис. 7) та 79,273 МПа (табл. 4, рис. 8), при ступені ущільнення 90 %; 93,883 МПа (табл. 3, рис. 8) та 98,894 МПа (табл. 4, рис. 8) при ступені ущільнення 85 %, є меншими за допустимі напруження 235 МПа;

4) напруження, які виникли при експлуатації колії з нерівністю та при ступені ущільнення ґрунтової обойми 90 %, складають 216,169 МПа (табл. 3, рис. 7), що є меншим за допустимі напруження 235 МПа та 235,815 МПа (табл. 4, рис. 8), що є більшим за допустиме напруження 235 МПа.

Перевірка умови виникнення пластичного шарніра у верхині склепіння труби при ступені ущільнення ґрунтової обойми 90 % та наявності експлуатаційної нерівності не виконується, оскільки умова виникнення пластичного шарніра є більшою за одиницю.

*Розрахунок* дольової частки впливу ущільнення та нерівності на розвиток пластичного шарніра в МГК. Згідно з табл. 4 при ступені ущільнення ґрунтової засипки 90 % (проектний стан залізничної колії) величина коефіцієнта пластичного шарніра дорівнює

0,161, а при ступені ущільнення ґрунтової засипки 90 % і експлуатаційної нерівності складає – 1,045. Відповідно, вплив нерівності буде складати:  $1,045 - 0,161 = 0,884$ .

При експлуатаційній нерівності та при необхідному проектному ступені ущільнення ґрунтової засипки  $RP=95$  % величина коефіцієнта пластичного шарніра дорівнює 0,749. Відповідно, вплив ущільнення буде складати:  $1,045 - 0,749 = 0,296$ .

Тоді дольова частка від впливу експлуатаційної нерівності буде становити 75 %, а від впливу ступеня ущільнення – 25 %.

### Наукова новизна та практична значимість

Автором вперше виконані багатоваріантні розрахунки несучої здатності металеві гофрованої конструкції великого діаметра (більше 6 м) із врахуванням комплексу факторів – ступеня ущільнення ґрунтової засипки, величини динамічного навантаження від рухомого складу залізниць та різного значення ступеня ущільнення підрейкової основи – за критерієм розвитку пластичного шарніра у металі труби при виникненні залишкових деформацій вертикального та горизонтального діаметрів МГК. У результаті чого встановлено, що виникнення пластичних незворотних деформацій металеві

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

гофрованої труби можливе тільки при одночасному впливові двох несприятливих факторів, а саме: ступеня ущільнення ґрунтової засипки та величини нерівності на залізничній колії.

Отримані результати несучої здатності металевих гофрованих конструкцій типу горизонтальний еліпс поперечного перерізу можуть бути використані інженерами Мостовипробувальних станцій Укрзалізниці та Укравтодору та проектними організаціями, які займаються проектуванням металевих гофрованих конструкцій діаметром більшим за 6 м.

## Висновки

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 за умови одночасного, несприятливого впливу двох факторів (причин): допущення розвитку нерівності колії за межі допустимих значень без виконання заходів щодо її усунення чи обмеження швидкості руху поїздів (перша причина); зниження ступеня ущільнення ґрунтової засипки нижче 90 % (друга причина). За відсутності однієї з причин зародження пластичного шарніру не відбудеться. Із двох причин, що мають вплив, вагоміше значення має перша причина, частка впливу якої становить 75 %, частка другої причини становить 25 %. Тому утримання колії у технічно справному стані є необхідною умовою щодо забезпечення довговічної та стабільної роботи металу гофрованих труб.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бондаренко, І. О. Стосовно питань моделювання деформативної роботи елементів залізничної колії / І. О. Бондаренко // Наука та прогрес трансп. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. – 2015. – № 1 (55). – С. 78–89. doi: 10.15802/STP2015/38247.
2. Гнатюк, І. Новий «стиль» старого мосту [Електронний ресурс] / І. Гнатюк // Магістраль. – 2011. – Режим доступу : [www.magistral-uz.com.ua](http://www.magistral-uz.com.ua). – Назва з екрана. – Перевірено : 4.09.2015.
3. Даніленко, Е. І. Правила розрахунків залізничної колії на міцність і стійкість : ЦП-0117 / Е. І. Даніленко, В. В. Рибкін. – Київ : Транспорт України, 2006. – 168 с.
4. Дослідження напружено-деформованого стану металевих гофрованих конструкцій при взаємодії з ґрунтом засипки / Б. М. Стасюк, В. З. Станкевич, В. В. Ковальчук, Й. Й. Лучко // Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика : зб. наук. пр. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2014. – Вип. 5. – С. 105–112.
5. Железнодорожный путь / Т. Г. Яковлева, Н. И. Карпущенко, С. И. Клинов [и др.]. – Москва : Транспорт, 1999. – 405 с.
6. Інструкція з улаштування та утримання колії залізниць України : ЦП 0138 / Е. І. Даніленко, В. О. Яковлев, А. М. Орловський [та ін.] : затв. наказом Укрзалізниці від 22 грудня 2005 р. № 427-Ц. – Київ : Транспорт України, 2006. – 336 с.
7. Коваль, П. М. Нормування при проектуванні і будівництві споруд з металевих гофрованих конструкцій / П. М. Коваль, І. П. Бабяк, Т. М. Сітдикова // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2010. – Вип. 33. – С. 114–117.
8. Ковальчук, В. В. Дослідження температурного поля та напруженого стану металевих гофрованих труб / В. В. Ковальчук // Ресурсо-економічні матеріали, конструкції, будівлі та споруди : зб. наук. пр. – Рівне, 2014. – № 29. – С. 186–192.
9. Лучко, Й. Й. Ґрунтознавство, механіка ґрунтів, основи та фундаменти / Й. Й. Лучко. – Львів : Каменяр, 2013. – 320 с.
10. Пат. № 93604 Україна, МПК G 01 B 5/30, E 04 B 1/00. Пристрій для вимірювання та оцінки напружено-деформованих транспортних споруд при змінних температурах і статичних та динамічних навантаженнях / Ковальчук В. В. – № u2014 04271 ; заяв. 22.04.2014 р. ; опубл. 10.10.2014, Бюл. № 19. – 4 с.
11. Петренко, В. Д. Порівняльний аналіз розрахункових моделей залізничного земляного полотна / В. Д. Петренко, Д. О. Ямпольський, І. О. Святко // Наука та прогрес трансп. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. – 2013. – № 4 (46). – С. 56–62. doi: 10.15802/stp2013-16619.
12. Правила технічної експлуатації залізниць України. – Київ : Поліграфсервіс, 2002. – 133 с.
13. Технічні вказівки щодо оцінки стану рейкової колії за показниками колієвимірювальних вагонів та забезпечення безпеки руху поїздів при відступах від норм утримання рейкової колії : ЦП 0020. – Київ : Укрзалізниця, 2005. – 48 с.
14. Barbato, M. Performance evaluation of buried pipe installation / M. Barbato, M. Bowman,

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

- A. Herbin. – Louisiana : Louisiana State University Publ., 2010. – 123 p.
15. Elshimi, T. M. Three-dimensional nonlinear analysis of deep-corrugated steel culverts / T. M. Elshimi. – Kingston, Ontario, Canada : Queen's University Publ., 2011. – 738 p.
  16. Machelski, Cz. Kinematic method for determining influence function of internal forces in the steel shell of soil-steel bridge / Cz. Machelski // *Studia Geotechnica et Mechanica*. – 2010. – Vol. XXXII, № 3. – P. 28–40.
  17. Machelski, Cz. Modelowanie mostowych konstrukcji gruntowo-powlokowych / Cz. Machelski. – Wrocław : Dolnoslaskie Wydawnictwo Edukacyjne, 2008. – 208 p.
  18. Pettersson, L. Design of soil steel composite bridges / L. Pettersson, H. Sundquist. – Sweden : Structural Desing and Bridges, 2007. – 122 p.
  19. Saat, M. R. Generalized railway tank car safety design optimization for hazardous materials transport: Addressing the trade-off between transportation efficiency and safety / M. R. Saat, C. P. L. Barkan // *J. of Hazardous Materials*. – 2011. – № 189 (1–2). – P. 62–68. doi: 10.1016/j.jhazmat.2011.01.136.
  20. Scientific evidence for walls fastening technologies of working trench by the special method «Slurry wall» for shallow subway's stations / S. V. Borchevskiy, V. D. Petrenko, O. L. Tiutkin [et al.] // *Наука та прогрес трансп. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту. залізн. трансп.* – 2014. – № 6 (54). – С. 154–163. doi: 10.15802/stp2014/33740.
  21. Weltshev, M. Comparison of the operating life of tank containers, tank vehicles and rail tank cars for the carriage of dangerous goods in practice, analysis of causes of damage / M. Weltshev, S. Schwarzer, F. Otremba // *Chemical Engineering Transactions*. – 2013. – № 31. – P. 559–564. doi: 10.1016/j.jhazmat.2011.01.13610.3303/CET1331094.

И. И. ЛУЧКО<sup>1\*</sup>, В. В. КОВАЛЬЧУК<sup>2\*</sup>, О. С. НАБОЧЕНКО<sup>3\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Подвижной состав и путь», Львовський філіал Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, ул. И. Блажкевич, 12а, Львов, Україна, 79052, тел. +38 (097) 033 18 36, ел. пошта kovalchuk.diit@mail.ru, ORCID 0000-0002-3675-0503

<sup>2\*</sup>Каф. «Подвижной состав и путь», Львовський філіал Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, ул. И. Блажкевич, 12а, Львов, Україна, 79052, тел. +38 (097) 223 72 43, ел. пошта kovalchuk.diit@mail.ru, ORCID 0000-0003-4350-1756

<sup>3\*</sup>Каф. «Подвижной состав и путь», Львовський філіал Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, ул. И. Блажкевич, 12а, Львов, Україна, 79052, тел. +38 (067) 451 55 93, ел. пошта olganabochenko@mail.ru, ORCID 0000-0001-6048-2556

## ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ГОФРИРОВАННОЙ КОНСТРУКЦИИ ПО КРИТЕРИЮ ОБРАЗОВАНИЯ ПЛАСТИЧЕСКОГО ШАРНИРА

**Цель.** Данное исследование направлено на: 1) проведение расчета эквивалентных сил, возникающих от подвижного состава железных дорог в зимний и летний периоды года при различных параметрах неровностей железнодорожного пути; 2) исследование несущей способности металлической гофрированной конструкции (МГК) по показателю развития пластического шарнира в вершине металлической трубы вследствие получения необратимых остаточных деформаций вертикального и горизонтального диаметров трубы. **Методика.** Расчет эквивалентных сил проведен по методике расчета железнодорожного пути на прочность и устойчивость. Далее был разработан математический алгоритм в программной среде Mathcad 14, с помощью которого проводились расчеты образования пластического шарнира в вершине трубы при различных величинах неровности железнодорожного пути и степени уплотнения грунтовой засыпки. При данных исследованиях расчеты проводились при проектном значении степени уплотнения грунтовой засыпки и величины динамической нагрузки от подвижного состава железных дорог. **Результаты.** Анализ многовариантных расчетов проверки условия возникновения пластического шарнира в вершине свода трубы показал, что зарождение пластического шарнира, которое имеет место в своде МГК, проявляется только при условии одновременного, неблагоприятного влияния двух факторов (причин). Это факторы: допущение развития неровности пути за пределы допустимых значений без выполнения мероприятий по ее устранению или ограничению скорости движения поездов (первая причина); снижение степени уплотнения грунтовой засыпки ниже 90 % (вторая причина). При отсутствии одной из причин зарождения пластического шарнира не произойдет. **Научная новизна.** Впервые исследована несущая способность металлической гофрированной кон-

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

струкції більшого діаметра (більше 6 м) з урахуванням комплексу факторів: ступеня ущільнення ґрунтової засыпки, величини динамічної навантаження від рухомого складу залізничних доріг за критерієм розвитку пластичного шарніра в металевій трубі при виникненні остаточних деформацій вертикального і горизонтального діаметрів МГК. **Практична значимість.** Отримані авторами результати несущої спроможності металевих гофрованих конструкцій (типа горизонтальний еліпс поперечного сечення) можуть бути використані інженерами Мостоиспытательних станцій Укрзалізниці, Укравтодора і проектними організаціями, які займаються проектуванням металевих гофрованих конструкцій діаметром більше 6 м.

**Ключові слова:** металеві гофровані конструкції; еквівалентні сили; пластичний шарнір; напруження

Y. Y. LUCHKO<sup>1\*</sup>, V. V. KOVALCHUK<sup>2\*</sup>, O. S. NABOCHENKO<sup>3\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Rolling Stock and Track», Lviv branch of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, I. Blazhkevych St., 12a, Lviv, Ukraine, 79052, tel. +38 (097) 033 18 36 e-mail kovalchuk.diit@mail.ru, ORCID 0000-0002-3675-0503

<sup>2\*</sup>Dep. «Rolling Stock and Track», Lviv branch of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, I. Blazhkevych St., 12a, Lviv, Ukraine, 79052, tel. +38 (097) 223 72 43, e-mail kovalchuk.diit@mail.ru, ORCID 0000-0003-4350-1756

<sup>3\*</sup>Dep. «Rolling Stock and Track», Lviv branch of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, I. Blazhkevych St., 12a, Lviv, Ukraine, 79052, tel. +38 (067) 451 55 93, e-mail olganabochenko@mail.ru, ORCID 0000-0001-6048-2556

## STUDY OF CARRYING CAPACITY OF A CORRUGATED METAL CONSTRUCTION BY CRITERION OF YIELD HINGE DEVELOPMENT

**Purpose.** This research is aimed to: 1) calculation of equivalent forces caused by rolling stock in winter and summer seasons at different parameters of the irregularities of railway track; 2) research of bearing capacity of corrugated metal constructions (CMC) in terms of development of plastic hinge in the top of the metal pipe due to irreversible residual deformation of the vertical and horizontal diameters of the pipe. **Methodology.** The calculation of equivalent forces is carried out according to the method of calculating the railway track on strength and stability. Further a mathematical algorithm was developed in the software environment of Mathcad 14, with which the calculations were made about the formation of a plastic hinge at the top of the pipe for different values of the irregularities of the railway track and the degree of compaction of soil backfill. In these studies, the calculations were carried out at the design value of the compaction degree of soil backfill and magnitude of dynamic loading on railway rolling stock. **Findings.** Analysis of multivariate calculations of testing the condition of occurrence of plastic hinge at the top of the pipe arch has revealed that the first plastic hinge, which occurs in the set of CMC is revealed only when there is a simultaneous unfavorable influence of two factors (causes). These are the factors: the assumption of the development of the track irregularities out of the allowable values without the implementation of measures to eliminate or limit the speed of trains (the first cause); reduction of compaction of soil backfill below the 90 % (the second cause). In case of absence of one of the causes the origin of the plastic hinge will not happen. **Originality.** It was the first time, when the bearing capacity of corrugated metal construction with large diameter (more than 6 m) with account of factors complex: the degree of compaction of soil backfill, the magnitude of the dynamic loads from rolling stock by the criterion of plastic hinge development in the metal pipe when the occurrence of residual deformations of the vertical and horizontal diameters of the CMC was investigated. **Practical value.** The obtained results of the bearing capacity of corrugated metal constructions (like horizontal ellipse of cross-section) can be used by engineers of Bridge building stations of Ukrzaliznytsia, Ukravtodor and design organizations, which are engaged in the design of corrugated metal constructions with a diameter of more than 6 m.

**Keywords:** corrugated metal construction; equivalent forces; plastic hinge; tension

### REFERENCES

1. Bondarenko I.O. Stosovno pytan modelivannia deformatyvnoi roboty elementiv zaliznychnoi kolii [To the modeling issues of life cycle of deformation work of the railway track elements]. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu – Science and Transport*

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

- Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 2015, no. 1 (55), pp. 78-89. doi: 10.15802/STP2015/38247.
2. Hnatiuk I. Novyi «styl» staroho mostu [New «style» of the old bridge]. *Mahistral – Main Line*, 2011. Available at: [www.magistral-uz.com.ua](http://www.magistral-uz.com.ua) (Accessed 4 September 2015).
  3. Danilenko E.I., Rybkin V.V. *Pravyla rozrakhunkiv zaliznychnoi kolii na mitsnist i stiikist. TsP-0117* [Rules of calculations of the railway track strength and stability. TsP-0117]. Kyiv, Transport Ukrainy Publ., 2006. 168 p.
  4. Stasiuk B.M., Stankevych V.Z., Kovalchuk V.V., Luchko Y.Y. Doslidzhennia napruzhenno-deformovanoho stanu metalevykh hofrovanykh konstruksii pry vzaємodii z hruntom zasypky [Investigation of the stress-strain state of metallic corrugated structures in the interaction with the backfill soil]. *Zbirnyk naukovykh prats Dnipropetrovskoho natsionalnogo universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana: Mosty i tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka* [Proc. of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan: Bridges and Tunnels: theory, research, practice]. Dnipropetrovsk, 2014, issue 5, pp.105-112.
  5. Yakovleva T.G., Karpushchenko N.I., Klinov S.I. *Zheleznodorozhnyy put* [Railway track]. Moscow, Transport Publ., 1999. 405 p.
  6. Danilenko E.I., Yakovliev V.O., Orlovskiy A.M. *Instruktsiia z ulashtuvannia ta utrymannia kolii zaliznyts Ukrainy. TsP 0138* [Manual for installation and maintenance of the tracks of the Railways of Ukraine. TsP 0138]. Kyiv, Transport Ukrainy Publ., 2006. 336 p.
  7. Koval P.M., Babiak I.P., Sitdykova T.M. Normuvannia pry proektuvanni i budivnytstvi sporud z metalevykh hofrovanykh konstruksii [Normalization of the design and construction of buildings of corrugated metal structures]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnogo universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan]. Dnipropetrovsk, 2010, issue 33, pp. 114-117.
  8. Kovalchuk V.V. Doslidzhennia temperaturnoho polia ta napruzhenoho stanu metalevykh hofrovanykh trub [Research of the temperature fields and stressed state of metal corrugated pipe] *Resursoekonomni materialy, konstruksii, budivli ta sporudy: zbirnyk naukovykh prats* [Resource-saving materials, constructions, buildings and structures: Proc.]. Rivne, 2014, no. 29, pp. 186-192.
  9. Luchko Y.Y. *Gruntoznavstvo, mekhanika gruntiv, osnovy ta fundamenty* [Soil science, soil mechanics, bases and foundations]. Lviv, Kameniar Publ., 2013. 320 p.
  10. Kovalchuk V.V. Prystrij dlia vymiriuvannia ta otsinky napruzhenno-deformovanoho transportnykh sporud pry zminnykh temperaturakh i statychnykh ta dynamichnykh navantazhenniakh [The device for measurement and evaluation of stress-strain transport facilities at variable temperatures and static and dynamic loads]. Patent UA, no. u2014 04271.
  11. Petrenko V.D., Yampolskyi D.O., Sviatko I.O. Porivnialnyi analiz rozrakhunkovykh modelei zaliznychnoho zemlianoho polotna [Comparative analysis of calculation models of the railway subgrades]. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnogo universytetu zaliznychnoho transportu – Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 2013, no. 4 (46), pp. 56-62. doi: 10.15802/stp2013/16619.
  12. *Pravyla tekhnichnoi ekspluatatsii zaliznyts Ukrainy* [Rules of technical operation of Ukrainian Railways]. Kyiv, Polihrafservis Publ., 2002. 133 p.
  13. Tekhnichni vkazivky shchodo otsinky stanu reikovoї kolii za pokaznykamy koliiwymiriuvalnykh vahoniv ta zabezpechennia bezpeky rukhu poizdiv pry vidstupakh vid norm utrymannia reikovoї kolii. TsP 0020. [Technical guidelines for assessment of rail track on track measuring cars and to ensure of traffic safety during the retreat from the norms of railway track maintenance. TsP 0020]. Kyiv, Ukrzaliznytsia Publ., 2005. 48 p.
  14. Barbato M., Bowman M., Herbin A. Performance evaluation of buried pipe installation. Louisiana, Louisiana State University Publ., 2010. 123 p.
  15. Elshimi T.M. Three-dimensional nonlinear analysis of deep-corrugated steel culverts. Kingston, Ontario, Canada, Queen's University Publ., 2011. 738 p.
  16. Machelski Cz. Kinematic method for determining influence function of internal forces in the steel shell of soil-steel bridge. *Studia Geotechnica et Mechanica*, 2010, vol. XXXII, no. 3, pp. 28-40.
  17. Machelski Cz. Modelowanie mostowych konstrukcji gruntowo-powlokowych. Wrocław, Dolnoslaskie Wydawnictwo Edukacyjne Publ., 2008. 208 p.
  18. Pettersson L., Sundquist H. Design of soil steel composite bridges. Sweden, Structural Desing and Bridges Publ., 2007. 122 p.

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

19. 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, no. 189 (1-2), pp. 62-68. doi: 10.1016/j.jhazmat.2011.01.136.
20. Borchevskiy S.V., Petrenko V.D., Tiutkin O.L. Kulazhenko Ye.Yu., Kulazhenko O.M. Scientific evidence for walls fastening technologies of working trench by the special method «Slurry wall» for shallow subways' stations. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu – Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 2014, no. 6 (54), pp. 154-163. doi: 10.15802/stp2014/33740.
21. Weltshev M., Schwarzer S., Otremba F. Comparison of the operating life of tank containers, tank vehicles and rail tank cars for the carriage of dangerous goods in practice, analysis of causes of damage. *Chemical Engineering Transactions*, 2013, no. 31, pp. 559-564. doi: 10.1016/j.jhazmat.2011.01.13610.3303/CET1331094.

*Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. О. І. Балицьким (Україна); д.фіз.-мат.н., проф. М. І. Стоділкою (Україна)*

Надійшла до редакції: 18.08.2015

Прийнята до друку: 20.10.2015