

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624.21

Б. М. СТАСЮК^{1*}, В. З. СТАНКЕВИЧ^{2*}, В. В. КОВАЛЬЧУК^{3*}, Й. Й. ЛУЧКО^{4*}

^{1*} Каф. «Опір матеріалів», Національний університет «Львівська політехніка», вул. Карпінського, 6, Львів, Україна, 79013, тел. +38 (097) 468 85 24, ел. пошта stasyuk.bohdan.m@gmail.com

^{2*} Каф. «Фундаментальні дисципліни», Львівська філія Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. І. Блажкевич, Львів, Україна, 79052, тел. +38 (095) 824 80 53, ел. пошта stan_olena@yahoo.com

^{3*} Каф. «Рухомий склад і колія», Львівська філія Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. І. Блажкевич, Львів, Україна, 79052, тел. +38 (097) 223 72 43, ел. пошта kovalchuk.diit@mail.ru

^{4*} Каф. «Рухомий склад і колія», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Львівська філія, вул. І. Блажкевич, Львів, Україна, 79052, тел. +38 (097) 033 18 36

ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ МЕТАЛЕВИХ ГОФРОВАНИХ КОНСТРУКЦІЙ ПРИ ВЗАЄМОДІЇ З ҐРУНТОМ ЗАСИПКИ

Мета. Метою роботи є проведення досліджень напружено-деформованого стану металевих гофрованих конструкцій (МГК) при їх взаємодії з ґрунтом засипки. Такі дослідження необхідні для встановлення причин появи дефектів металевих гофрованих конструкцій, своєчасного прийняття відповідних інженерних рішень з метою підвищення несучої здатності МГК. **Методика.** Розрахунки напружено-деформованого стану металевих гофрованої конструкції проведено методом скінчених елементів за допомогою ліцензійної програми FEMAP with MSC NASTRAN. Під час проведення розрахунків враховано ступінь ущільнення ґрунтової засипки та величину динамічного навантаження від рухомого складу залізниць. **Результати.** Згідно проведених розрахунків запас міцності споруди становить від 34 % до 45 % залежно від ступеня ущільнення ґрунтової засипки; для виникнення початку пластичних деформацій зовнішнє навантаження повинно бути перевищене більш як у 2,48 рази порівняно з навантаженням при проектному стані колії та навантаженнями на колію, що має допустимі нерівності. **Наукова новизна.** Вперше проведені розрахунки напружено-деформованого стану МГК при взаємодії з ґрунтом засипки із врахуванням комплексу факторів – ступеня ущільнення ґрунтової засипки та величини динамічного навантаження від рухомого складу залізниць. **Практична значимість.** Отримані результати напружено-деформованого стану металевих гофрованих конструкцій можуть бути використані проектувальниками та інженерами Мостовипробувальних станцій Укрзалізниці та Укравтодору.

Ключові слова: металева гофрована конструкція (МГК); ступінь ущільнення ґрунтової засипки; динамічне навантаження; деформації; переміщення; напруження; метод скінчених елементів

Вступ

У процесі експлуатації металевих гофрованих конструкцій (МГК) зафіксовані наступні дефекти: просідання склепіння труби, надлишкові деформації вертикального та горизонтально діаметрів труби, викришування металу поблизу болтових з'єднань, корозія металу труби, тощо. Тому дослідження, спрямовані на встановлення причин появи таких дефектів, є необхідними та актуальними на сьогоднішній день. Відповідний моніторинг дозволяє прийняти своєчасні інженерні рішення для підвищення несучої здатності МГК.

Мета

Виконати дослідження напружено-деформованого стану (НДС) МГК при взаємодії з ґрунтом засипки із врахуванням низки факторів, насамперед ступеня ущільнення ґрунтової засипки та величини динамічного навантаження від рухомого складу залізниць.

Аналіз досліджень та публікацій

Світова практика побудови і експлуатації металевих гофрованих конструкцій показує, що вирішальний вплив на напружено-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

деформований стан МГК має ступінь ущільнення ґрунтової засипки [1, 2, 3]. Рекомендоване ущільнення повинно сягати ступеня 0,95...0,97. Разом з тим у роботі [1] зауважено, що зниження ущільнення ґрунту навіть з 0,95 до 0,8 призводить до зменшення модуля деформації ґрунту у 4 рази, що, у свою чергу, спричинює значне зростання у стінках конструкції напружень і деформацій.

Проведення багаторічного моніторингу понад 900 об'єктів з гофрованих труб, збудованих протягом 1951-1965 рр. в штаті Огайо (США) [4] дозволило зробити наступний висновок: у всіх випадках для конструкцій, які не зазнали руйнувань, великі деформації становили 22...34 %; для конструкцій, які зазнали руйнувань, такі деформації сягали 45...55 %. Дані

дослідження однозначно довели, що причиною надмірних деформацій було недостатнє ущільнення ґрунту, або використання для засипки невластивого типу матеріалу. За даними [4], якщо деформації перебувають в межах 15...20 %, а висота шару над трубою більша за 1,8 м, то конструкція не вимагає для свого зміцнення додаткових заходів.

З метою дослідження несучої здатності МГК були проведені дослідження її напружено-деформованого стану. Під час проведення досліджень враховували впливи на напружено-деформований стан конструкції ступінь ущільнення ґрунтової засипки та динамічне навантаження від рухомого складу. Розрахункова схема задачі та геометричні розміри МГК наведені на рис. 1.

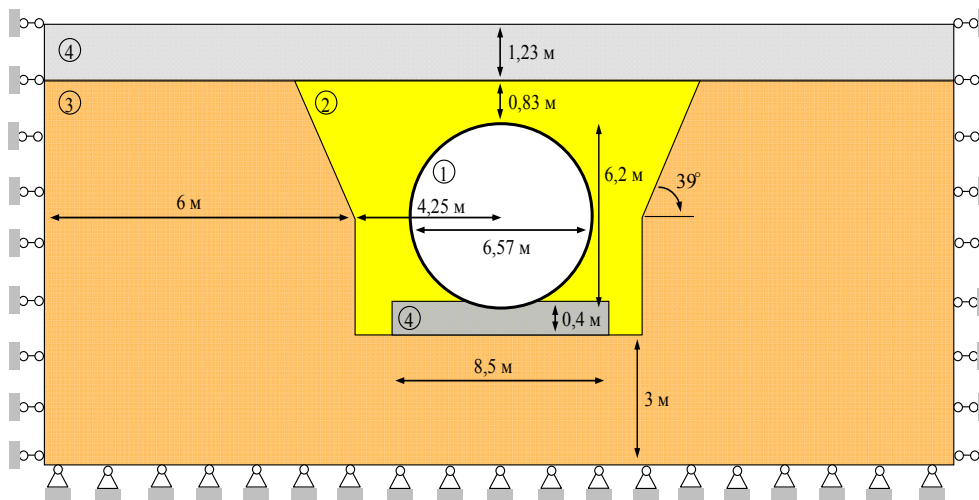


Рис. 1. Розрахункова схема задачі

Вхідні дані, які прийняті у розрахунках:

1 – труба гофрована довжиною 12,69 м з параметрами гофри 150×50×6 (рис. 2). Фізико-механічні характеристики сталі труби St3S: модуль Юнга – $E = 205000$ МПа; коефіцієнт Пуассона – $\nu = 0,3$; густина – $\rho = 78,5$ кН/м³; межа пружності – $\sigma_{пр} = 210$ МПа, межа текучості – $\sigma_m = 235$ МПа;

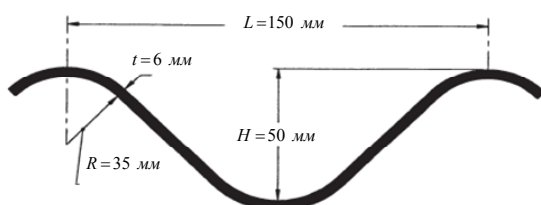


Рис. 2. Характеристика хвилі гофра

2 – засипка виконана щебеневим відсівом з наступними фізико-механічними характеристиками: модуль деформації – $E_0 = 30$ МПа; коефіцієнт Пуассона – $\nu = 0,3$; густина – $\rho = 19,6$ кН/м³; кут тертя – $\phi = 40,8^\circ$; коефіцієнт зчеплення $c = 0$;

3 – глина напівтверда з наступними характеристиками: $E_0 = 36$ МПа, $\nu = 0,42$, $c = 50$, $\rho = 19,9$ кН/м³, $\phi = 20,0^\circ$;

4 – щебінь крупний з наступними параметрами: $E_0 = 150$ МПа, $\nu = 0,27$, $c = 0$, $\rho = 18,0$ кН/м³, $\phi = 43,0^\circ$;

Шпали довжиною 2850 мм і шириною (по низу) 275 мм мають масу 365 кг. На них опираються чотири рейки Р65 погонною масою 64,72 кг (рис. 3). Таким чином, на 1 шпалу при-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

падає маса $m = 365 + 4 \times 0,625 \times 64,72 = 526,8$ кг. При цьому на поверхню основи шпали діє тиск

$$p = \frac{m \cdot g}{A} \approx \frac{526,8 \cdot 10}{2850 \cdot 275} = 6,7215 \cdot 10^{-3} \text{ МПа}$$

Розрахунки напружено-деформованого стану металевої гофрованої конструкції проведено методом скінчених елементів за допомогою ліцензійної програми FEMAP with MSC NASTRAN.

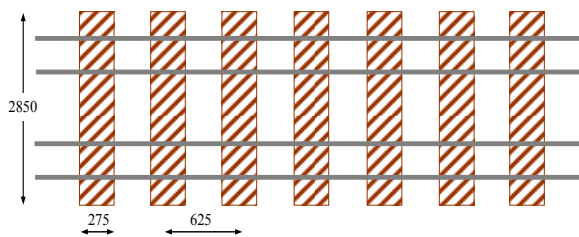


Рис. 3. Характеристика навантаження рейко-шпальної решітки

У вузлах елементів нижньої частини ґрунтової обійми задані нерухомі шарніри, які унеможливають лінійні переміщення; у вузлах елементів бічних граней введена заборона горизонтальних переміщень (див. рис. 1).

Простір ґрунту у пазах гофрів заповняли тривимірними скінченими елементами типу Solid (призмами і тетраедрами), а потім з віддаленням від гофрованої оболонки ґрунт моделювали гексаедрами. Згущення скінчено-елементної сітки виконували у місцях можливої концентрації напружень та в областях контакту спряжених тіл. Зокрема, поблизу гофрів розміри скінчених елементів вибирали дрібнішими, а решту області розбивали відповідно елементами більших розмірів.

В даному дослідженні ґрунтову обійму розбивали сіткою тривимірних скінчених елементів типу Solid, трубу – двовимірними скінченими елементами типу Plate.

Аналіз результатів розрахунку

Аналіз отриманих числових результатів показує, що найбільші деформації і напруження (еквівалентні за гіпотезою Мізеса) виникають у стінках металевої гофрованої оболонки посередині її прогону (рис. 4).

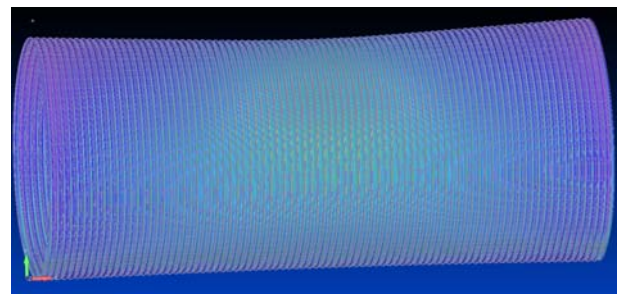


Рис. 4. Деформований стан металевої гофрованої труби

З метою дослідження впливу характеристик ґрунтової засипки на НДС оболонки розглядали кільце труби посередині її прогону. Розрахунки проводили для значень коефіцієнтів ступеня RP ущільнення ґрунтової засипки 1; 0,9; 0,8 (з відповідними їм значеннями густини та модуля деформації). Навантаження складається з власної ваги засипки, металевої гофрованої труби, шару щебеню, рейко-шпальної решітки та динамічного навантаження від рухомого складу. На рис. 5 наведені епюри розподілу еквівалентних напружень за Мізесом.

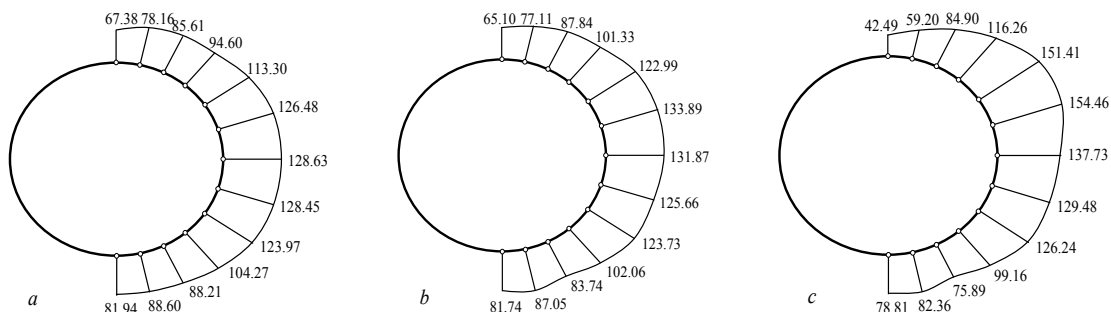


Рис. 5. Розподіл еквівалентних напружень $\sigma_{\text{екв}}^{\text{IV}}$ [МПа] по контуру перерізу труби

залежно від ступеня ущільнення ґрунтової засипки:

$a - \rho = 19,6 \text{ кН/м}^3, E = 30 \text{ МПа}, RP = 1,0$; $b - \rho = 17,64 \text{ кН/м}^3, E = 18,75 \text{ МПа}, RP = 0,9$;

$c - \rho = 15,68 \text{ кН/м}^3, E = 7,5 \text{ МПа}, RP = 0,8$

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

З метою дослідження впливу характеристик ґрунтової засипки на деформацію труби і щебеневому шару під шпалами вибирали 4-и характерні вузли (точки) 1-4 на поверхні металевої конструкції посередині її прогону та точку 5 на верхній поверхні щебеню під шпалами над сідовою труби (рис. 6).

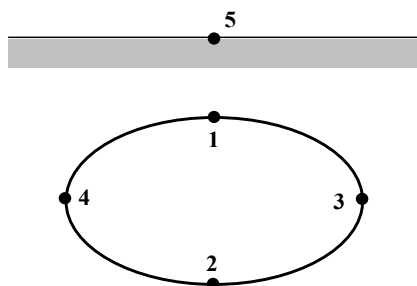


Рис. 6. Точки аналізу напружено-деформованого стану МГК

В табл. 1 наведені числові результати переміщень у вузлах 1-4. При цьому вузли 1, 2, 5

мають вертикальні переміщення, а 3, 4 – горизонтальні.

Аналіз результатів показує стійку тенденцію до збільшення абсолютних значень напружень і деформацій із зменшенням ущільнення ґрунту (див. рис. 5).

Це пояснюється тим, що недостатнє ущільнення ґрунту не призводить до явища розпирання конструкції [3, 5], яке призводить до її зміцнення. Чим більший показник ущільнення ґрунту, тим більший спротив засипки деформаціям труби і тим більшу частку навантаження на трубу перебирає на себе ґрунтова засипка. Зміна ущільнення ґрунту (як і зміна величини навантаження) призводить до перерозподілу внутрішніх зусиль (згинальних моментів і осьових сил) у перерізах гофрів труби і, як наслідок, до зміни положення точок, у яких спостерігаються максимальні значення напружень.

Найбільші деформації спостерігаються у точці 1 перерізу труби, а найбільші напруження – поблизу точок 3, 4 (див. рис. 5).

Таблиця 1

Числові результати переміщень

Параметри засипки	Вузол 1	Вузол 2	Вузол 3	Вузол 4	Вузол 5
ρ [кН/м ³]; E [МПа]; RP	$u_1^{\text{верт}}$ [см]	$u_2^{\text{верт}}$ [см]	$u_3^{\text{гор}}$ [см]	$u_4^{\text{гор}}$ [см]	$u_5^{\text{верт}}$ [см]
$\rho = 19,6$; $E = 30$; $RP = 1,0$	- 2,81	- 0,604	0,95	- 0,95	- 3,5
$\rho = 17,64$; $E = 18,75$; $RP = 0,9$	- 3,21	- 0,53	1,19	- 1,21	- 4,1
$\rho = 15,68$; $E = 7,5$; $RP = 0,8$	- 4,71	- 0,39	2,04	- 2,1	- 6,38

Зменшення ущільнення засипки призводить до зменшення напружень у точках 1, 2 та одночасного збільшення напружень у точках 3, 4. При цьому спостерігається переміщення точок максимальних напружень вгору по контуру перерізу труби (див. рис. 5). При навантаженнях, що відповідають проектному стану МГК та ступенях ущільнення ґрунтової засипки від 0,8 до 1,0 еквівалентні напруження по Мізесу менші за межу текучості, яка для матеріалу гофростілів становить 235 МПа. При ступені ущільнення ґрунту 0,8 найбільші значення просідання колії спостерігаються над трубою посередині її довжини і становлять 64 мм (рис. 7).

Таким чином, лише зниження ступеня ущільнення ґрунтової засипки до 0,8 не може призвести до виникнення пластичних деформацій у

металі труби, однак призводить до зниження запасу міцності з 45 % до 34 %.

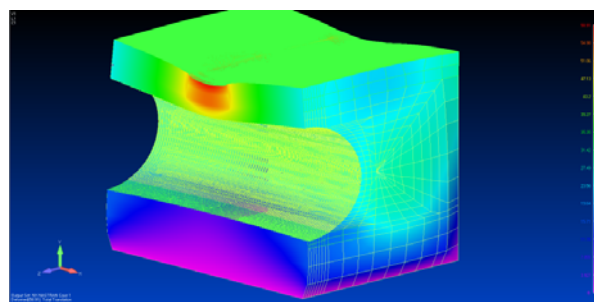


Рис. 7. Деформація ґрунтової засипки і щебеневому шару над сідовою труби

Окрім ступеня ущільнення ґрунтової обойми на величину НДС МГК має вплив величина динамічного навантаження від рухомого складу, яка насамперед залежить від величини геомет-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

ричних нерівностей колії. Інтерес представляє визначення граничного навантаження при досягненні напруженнями в МГК межі текучості 235 МПа (початок пластичних деформацій).

Навантаження на МГК змінювали наступним чином: власну вагу труби, засипки, шару щебеню та рейко-шпальну решітку залишали незмінними, показник RP ступеня ущільнення ґрунту приймали рівним 0,95. Динамічне навантаження на шпали від рухомого складу пропорційно збільшували і перераховували відповідні напруження у точках контуру перерізу труби. Розподіл навантажень по шпалах вздовж колії отримали із розрахунків колії на міцність [6]. Результати цього розрахунку наведені у табл. 2.

Числові розрахунки показали, що еквівалентні напруження досягають величини 235 МПа за коефіцієнта перевантаження 2,48 (рис. 8).

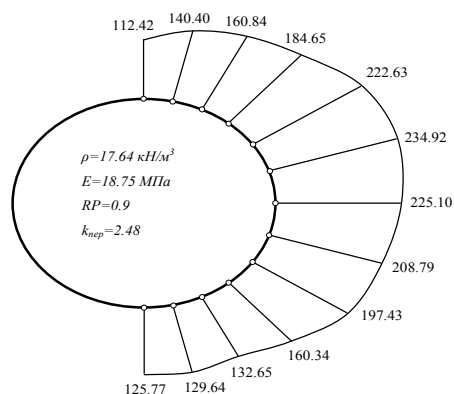


Рис. 8. Розподіл еквівалентних напружень $\sigma_{\text{екв}}^{\text{IV}}$ [МПа] по контуру перерізу труби

В табл. 3 наведені числові результати переміщень у вузлах 1-4. При цьому вузли 1, 2, 5 мають вертикальні переміщення, а 3, 4 – горизонтальні.

Таблица 2

Розподіл навантажень по шпалах

Номер шпали	Навантаження, кН	Номер шпали	Навантаження, кН
18	318,8	- 1	328,6
17	411,8	- 2	115,2
16	215,6	- 3	2,8
15	164,2	- 4	-3
14	371,6	- 5	95,4
13	378,0	- 6	301,6
12	159,0	- 7	423,6
11	19,4	- 8	234,2
10	0,8	- 9	150,0
9	107,8	- 10	352,4
8	319,2	- 11	389,4
7	415,6	- 12	184,6
6	217,4	- 13	193,6
5	163,2	- 14	399,4
4	368,2	- 15	345,8
3	375,6	- 16	128,6
2	170,2	- 17	7,8
1	209,4	- 18	10,4
Центральна	411,0		

Числові розрахунки переміщень у вузлах 1-4

Параметри засипки	Вузол 1	Вузол 2	Вузол 3	Вузол 4	Вузол 5
ρ [кН/м ³]; E [МПа]; RP	$u_1^{\text{верт}}$ [см]	$u_2^{\text{верт}}$ [см]	$u_3^{\text{гор}}$ [см]	$u_4^{\text{гор}}$ [см]	$u_5^{\text{верт}}$ [см]
$\rho = 17,64$; $E = 18,75$; $RP = 0,95$; $k_{\text{пер}} = 2,48$	- 5,45	- 0,70	2,62	- 2,65	- 7,08

Висновки

1. Безпосередньою причиною виникнення залишкових (пластичних) деформацій металеві гофрованої труби та колії над нею є зростання напружень у листах склепіння труби до гранично допустимих значень. Зазначена обставина пов'язана з недостатнім ступенем ущільнення ґрунтової засипки.

2. Згідно даних розрахунків, запас міцності споруди становить від 45 % до 34 % залежно від ступеня ущільнення ґрунтової засипки. Для виникнення пластичних незворотних деформацій зовнішнє навантаження повинно бути перевищене більш як у 2,48 рази порівняно з навантаженням при проектному стані колії та навантаженнями на колію, що має допустимі нерівності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Handbook of steel drainage and highway construction products [Text]. – American Iron and Steel Institute, 2ed edition, Canada, June 2002.

2. Kunecki, B. Zachowanie sie ortotropowych powlok walcowych w osrodku gruntowym pod statycznym i dynamicznym obciazeniem zewnetrznym [Text] / B. Kunecki. – Rozprawa doktorska. Instytut budownictwa Politechniki Wroclawskiej, 2006. – 199 s.
3. Wysokowski A., Janusz L. Mostowe konstrukcje gruntowo – powlokowe. Laboratoryjne badania niszczone. [Text] / A. Wysokowski, L. Janusz // Awarie w czasie budowy i eksploatacji : XXIII konferencja naukowo-techniczna. – Szczecin, 2007. S. 541-550.
4. Coweherd, David C. TRB Proceedings [Text] / David C. Coweherd & Ioan J. Corda. – Washington.
5. Machelski, Cz. Modelowanie mostowych konstrukcji gruntowo-powlokowych [Text]. / Cz. Machelski. – Dolno-slaskie Wydawnictwo Edukacyjne, 2008. – 208 s.
6. Правила розрахунків залізничної колії на міцність і стійкість. ЦП-0117 [Текст] / Е. І. Даніленко, В. В. Рибкін. – Київ : Транспорт України, 2006. – 168 с.

Б. М. СТАСЮК^{1*}, В. З. СТАНКЕВИЧ^{2*}, В. В. КОВАЛЬЧУК^{3*}, И. И. ЛУЧКО^{4*},

^{1*} Каф. «Сопротивление материалов», Национальный университет «Львовская политехника» ул. Карпинского, 6, Львов, Украина, 79013, тел. +38 (097) 468 85 24, эл. почта stasyuk.bohdan.m@gmail.com

^{2*} Каф. «Фундаментальные дисциплины», Львовский филиал Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. И.Блажкевич, 12а, Львов, Украина, 79052, тел. +38 (095) 824 80 53, эл. почта stan_olena@yahoo.com

^{3*} Каф. «Подвижной состав и путь», Львовский филиал Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. И.Блажкевич, 12а, Львов, Украина, 79052, тел. +38 (097) 223 72 43, эл. почта kovalchuk.diit@mail.ru

^{4*} Каф. «Подвижной состав и путь», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, Львовский филиал, ул. И. Блажкевич, Львов, Украина, 79052, тел. +38 (097) 033 18 36

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ГОФРИРОВАННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ГРУНТОМ ЗАСЫПКИ

Цель. Целью данной работы является проведение исследования напряженно-деформированного состояния металлических гофрированных конструкций при их взаимодействии с грунтом засыпки. Такие исследо-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

вания необходимы для установления причин появления дефектов металлических гофрированных конструкций, своевременного принятия соответствующих инженерных решений с целью повышения несущей способности МГК. **Методика.** Расчеты напряженно-деформированного состояния металлической гофрированной конструкции проведены методом конечных элементов с помощью лицензионной программы FEMAP with MSC NASTRAN. При проведении расчетов учтено уплотнение грунтовой засыпки и величина динамической нагрузки от подвижного состава железных дорог. **Результаты.** Согласно проведенных расчетов запас прочности сооружения составляет от 45 % до 34 % в зависимости от степени уплотнения грунтовой засыпки; для возникновения начала пластических деформаций внешняя нагрузка должна быть превышена более чем в 2,48 раза по сравнению с нагрузкой при проектном состоянии пути и нагрузками на путь, имеющем допустимые неровности. **Научная новизна.** Впервые проведены расчеты напряженно-деформированного состояния МГК при взаимодействии с грунтом засыпки с учетом комплекса факторов – степени уплотнения грунтовой засыпки и величины динамической нагрузки от подвижного состава железных дорог. **Практическая значимость.** Полученные результаты напряженно-деформированного состояния металлических гофрированных конструкций могут быть использованы проектировщиками и инженерами Мостоиспытательных станций Укрзалізнички и Укравтодора.

Ключевые слова: металлическая гофрированная конструкция (МГК); степень уплотнения грунтовой засыпки; динамическая нагрузка; деформации; перемещения; напряжения; метод конечных элементов

B. STASYUK^{1*}, V. STANKEVYCH^{2*}, V. KOVALCHUK^{3*}, J. LUTCHKO^{4*}

^{1*} Dept. of Resistance of Materials, National University «Lviv Polytechnic», Lviv branch, Karpinski, Lviv, Ukraine, 79013, tel. +38 (097) 468 85 24, e-mail stasyuk.bohdan.m@gmail.com

^{2*} Dept. of Fundamental courses, Dnepropetrovsk national university of railway transport named after academician V. Lazaryan, Lviv branch, I. Blazhkevych Str., Lviv, Ukraine, 79052, tel. +38 (095) 824 80 53, e-mail stan_olena@yahoo.com

^{3*} Dept. of Rolling stock and track, Dnepropetrovsk national university of railway transport named after academician V. Lazaryan, Lviv branch, I. Blazhkevych Str., Lviv, Ukraine, 79052, tel. +38 (097) 223 72 43, e-mail kovalchuk.diit@mail.ru

^{4*} Dept. of Rolling stock and track, Dnepropetrovsk national university of railway transport named after academician V. Lazaryan, Lviv branch, I. Blazhkevych Str., Lviv, Ukraine, 79052, tel. +38 (097) 033 18 36

INVESTIGATION OF STRESS-STRAIN STATE CORRUGATED METAL STRUCTURES UNDER INTERACTION WITH SOIL BACKFILL

Purpose. The purpose of this paper is to conduct a study of the stress-strain state corrugated metal structures in the interaction with the soil backfill. Such studies will help to establish the causes of defects corrugated metal structures, which help to provide timely engineering solutions, which in turn can lead to increased carrying capacity of the CIM. **Methodology.** Calculations of the stress-strain state corrugated metal structures made by finite element method using the licensed program FEMAP with MSC NASTRAN. In carrying out these calculations take into account the degree of compaction of backfill soil and the magnitude of the dynamic load of rail transport. **Findings.** According to the calculations, the margin structures ranging from 45% to 34%, depending on the degree of compaction of backfill soil, and for the emergence of early irreversible plastic deformation, an external load to be exceeded more than 2.48 times compared to the load at the design state track and loads on the track, which has allowed inequality. **Originality.** First Settlements stress-strain state corrugated metal structures under interaction backfill with soil, taking into account the complex factors such as the degree of compaction of backfill soil and the magnitude of the dynamic load of rail transport. **Practical value.** The results of the stress-strain state corrugated metal structures can be used to beat designers and engineers of test bridges stations Railways and Ukravtodor.

Keywords: corrugated metal structure; degree of compaction of backfill soil; dynamic load; strain; displacement; strain; finite element method

Стаття рекомендована до публікації д.фіз.-мат.н., проф. М. І. Стоділка (Україна), д.т.н., проф. В. Д. Петренко (Україна).

Надійшла до редколегії 20.06.2014.

Прийнята до друку 02.07.2014.