УДК 624.21:625.745.2

Й. Й. Лучко, В. В. Ковальчук
Львівська філія Дніпропетровського національного університету
залізничного транспорту ім. ак. В. Лазаряна,
Ю. Є. Ковальчук
Національний університет "Львівська політехніка",
кафедра будівельного виробництва

НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН МЕТАЛЕВИХ ГОФРОВАНИХ КОНСТРУКЦІЙ ПРИ ВЗАЄМОДІЇ ІЗ ҐРУНТОМ ЗАСИПКИ

© Лучко Й. Й., Ковальчук В. В., Ковальчук Ю. Є., 2017

У цій роботі вперше досліджено несучу здатність металевої гофрованої конструкції великого діаметру (понад 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 труби. Отримані результати несучої здатності металевих гофрованих конструкцій типу горизонтальний еліпс поперечного перетину, можуть бути використані інженерами Мостовипробувних станцій Укрзалізниці та Укравтодору та 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.

J. Luchko, V. Kovalchuk
Lviv Branch of Dnipropetrovsk National University
of the Railway transport named by ac. V. Lazaryan,
Yu. Kovalchuk
Lviv Polytechnic National University,
Department of building production

CALCULATION OF THE CORRUGATED METAL STRUCTURES DEFLECTED MODE UNDER INTERACTION WITH SOIL BACKFILL

© Luchko J., Kovalchuk V., Kovalchuk Yu., 2017

Multivariate analysis calculations of testing conditions of yield hinge at the top of the arch tubes showed that the origin of the yield hinge, which takes place in the vault of CIM is performed only on the condition of the simultaneous, the adverse effects of the two factors (reasons): the assumption of inequality way beyond the permissible values without performing measures to eliminate or limit its speed train (first cause); reducing soil compaction of backfill below 90 % (the second reason). In the absence of a cause of the origin of the yield hinge will not happen. For the first time the carrying capacity of corrugated metal structures of large diameter (over 6 m) taking into account complex factors – the degree of compaction of backfill soil, the value of dynamic loading of rail transport by the criterion of yield hinge in the metal pipe in case of residual strains vertical and horizontal diameters CIM is investigated. The results of carrying capacity of corrugated metal structures such as horizontal ellipse cross sections can be used by engineers of bridge probationary stations of Railways and Ukravtodor and project organizations involved in the design of corrugated metal structures with a diameter bigger than 6 m.

Key words: corrugated metal construction, equivalent strength plastic hinge tension.

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

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

Проведення багаторічного моніторингу понад 900 об'єктів з гофрованих труб, збудованих протягом 1951–1965 рр. в штаті Огайо (США) [1, 3] уможливило 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 %. Ці дослідження однозначно довели, що причиною надмірних деформацій було недостатнє ущільнення ґрунту, або використання для засипки невластивого типу матеріалу. За даними [6–8], якщо деформації перебувають у межах 15–20 %, а висота шару над трубою більша за 1,8 м, то конструкція не вимагає для свого зміцнення додаткових заходів.

Розширення області застосування МГК (металеві гофровані конструкції) не має достатнього наукового і нормативного забезпечення. Наявні нормативні документи [3–5] належать тільки до круглих труб діаметром до 3 м і засновані на розрахунковому аналізі деформацій труб при спрощених гіпотезах про тиск ґрунту на трубу.

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

Постановка проблеми. У процесі експлуатації металевих гофрованих конструкцій (МГК) зафіксовані такі дефекти: просідання склепіння труби, надлишкові деформації вертикального та горизонтально діаметрів труби, викришування металу поблизу болтових з'єднань, корозія металу труби, тощо. При спостереженні за поведінкою металевої гофрованої труби у процесі експлуатації [1, 2] виявилося, що вони мають незатухаючий характер. Зокрема, 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 сьогодні. Відповідний моніторинг дозволить прийняти своєчасні інженерні рішення для підвищення несучої здатності МГК.

При проектуванні металевих гофрованих конструкцій проектувальники зіткнулися із проблемою проектування металевих гофрованих конструкцій діаметром більше, аніж 3 м. Оскільки дія нормативних документів ВБН [4] та ОДМ [5] поширюється тільки для труб діаметром до 3 метрів. А при проектуванні металевих гофрованих конструкцій діаметром більшим за 3 м необхідно застосовувати метод скінченних елементів. Проте при використанні цього методу немає чітких рекомендацій із вибору типів скінченних елементів, моделювання контакту на межі "металева гофрована труба-ґрунт засипки", а також рекомендовані розміри скінченних елементів на межі контакту "труба-ґрунт".

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Точніших розрахунків напружено-деформованого стану металевих гофрованих конструкцій можна отримати за допомогою розрахунків з використанням методу скінченних елементів [6, 7, 8]. Згідно з [7], розрахункова схема МГК повинна адекватно відображати роботу труби, ґрунтової обойми та основи, а за розрахункову схему потрібно приймати тривимірну модель.

Метод скінченних елементів передбачає дискретизацію суцільного середовища об'єкта деякою кількістю скінченних елементів різної форми і розмірів. Цей метод дозволяє розв'язувати задачі, реалізація яких за допомогою аналітичних методів неможлива: це розрахунки просторових конструкцій; врахування чинників будівництва та експлуатації; дослідження об'єктів зі складною структурою та дослідження їх напружено-деформованого стану [9].

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

Дискретизація суцільного середовища у вигляді елементів, пов'язаних скінченною кількістю вузлових зв'язків, дає змогу зберегти характеристики середовища під час визначення напружено-деформованого стану кожного елемента. Наявність скінченної кількості вузлових зв'язків дає змогу ввести співвідношення між силами, прикладеними до вузлових місць, та викликаними переміщеннями. Це співвідношення зображується матрицею жорсткості елемента [7–9].

Як показує досвід закордонних практичних розрахунків, основою реалізації скінченного елементного підходу є використання програмних комплексів "Зеніт-97", ANSYS та NX NASTRAN. Та крім цього, застосування методу скінченних елементів (МСЕ) дозволило отримати цілком задовільну відповідність розрахункових оцінок напружено-деформованого стану гофрованих конструкцій і ґрунтового середовища засипки. Отже, підтверджується прийнята в недавно розроблених документах-рекомендаціях [5] необхідність виконання розрахунків МГК складного обриси і прогону понад 3 м із використанням МСЕ.

Постановка завдання. Розробити алгоритм розрахунку і провести розрахунок напружено-деформованого стану металевих гофрованих конструкцій при взаємодії із ґрунтом засипки.

Виклад основного матеріалу. Для оцінки несучої здатності МГК розроблено схему розрахунку напружено-деформованого стану взаємодії металевої гофрованої труби із ґрунтом засипки, яка наведена на рис. 1.

Рис. 1. Схема послідовності розрахунку напружено-деформованого стану металевих гофрованих конструкцій за допомогою МСЕ

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

Перед дослідженням напружено-деформованого стану металевої гофрованої конструкції викладемо рекомендації із проведення скінченно-елементного моделювання при використанні програмного комплексу NX NASTRAN.

У вузлах елементів нижньої частини ґрунтової обойми задаємо нерухомі шарніри, які забороняють лінійні переміщення, а у вузлах елементів бічних граней уводимо заборону горизонтальних переміщень.

Простір ґрунту у пазухах гофрів заповнюємо тривимірними скінченними елементами типу Solid (призмами і тетраедрами), а потім із віддаленням від гофрованої оболонки ґрунт моделюємо гексаедрами. Згущення скінченно-елементної сітки виконуємо у місцях можливої концентрації напружень та в областях контакту спряжених тіл. Зокрема, поблизу гофрів розміри скінченних елементів вибираємо дрібнішими, а решту області розбиваємо елементами більших розмірів. При цьому ґрунтову обойму розбиваємо сіткою тривимірних скінченних елементів типу Solid, а трубу – двовимірними скінченними елементами типу Plate.

Ґрунт розглядаємо як в'язке однорідне середовище із використанням моделей ідеально-пластичних середовищ у поєднанні з неасоційованими законами пластичності [3], оскільки у програмному комплексі NX NASTRAN реалізована процедура Драккера-Прагера (Drucker-Prager). Як момент настання пластичного стану використовуємо модифікований критерій Мізеса, а для формування неасоційованих законів пластичності – граничну поверхню Кулона-Мора. Для унеможливлення впливу граничних умов, що накладаються по бічних сторонах ґрунту засипки на стан гофрованої конструкції, межу розрахункової області ґрунту вибираємо на відстані 3R (де R – горизонтальний розмір конструкції) від бічної сторони конструкції.

Болтові з'єднання, за допомогою яких з'єднують між собою гофролисти, моделюємо жорсткими зв'язками (Coupled DOF).

Вихідні дані до розрахунку МГК. Приймається металева гофрована труба конструкції Multiplate MP 150 довжиною 12,69 м у формі горизонтального еліпсу 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 г/м^2), питома вага ґрунту засипки становить $\gamma = 20$ кН/м^3; модуль деформації ґрунту засипки – $E_0 = 33$ МПа; відстань від підошви рейок до верху склепіння труби – $h = 2{,}04$ м; еквівалентне навантаження, відповідно до ДБН В.2.3-14 залежно від довжини і форми лінії впливу – $q = 235{,}3$ кН/м; модуль пружності сталі – $E = 2.1 \cdot 10^5$ МПа; товщина листа гофрованої конструкції – $\delta = 6$ мм; коефіцієнт Пуассона матеріалу споруди – ν =0,25; питома вага матеріалу МГК – $\gamma_{sh} = 145{,}4$ кН/м^2; площа перерізу однієї хвилі гофри – $A = 0{,}757 \cdot 15 = 11{,}355$ см^2; 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 [1].

У поздовжньому напрямку тіло труби складається із 14 кілець, кожне із яких складається із 10 листів, що з'єднані болтами. Оголовки труби виконані за допомогою габіонів системи Террамеш. Модулі розташовуються горизонтальними ярусами. Основою для оголовків служать габіонні матраци Рено 3:2:0,23 м, встановлені на геотекстиль та сітку секугрід.

Результати розрахунку елементів конструкції залізничного переходу при різній щільності засипки металевої гофрованої оболонки, отримані у програмному середовищі NX NASTRAN.

Напружено-деформований стан гофрованої сталевої оболонки переглядаємо шляхом налаштування вибіркового перегляду елементів переходу та обираємо еквівалентні напруження в оболонці за теорією міцності Губера-Мізеса. Значення напружено-деформованого стану в найбільш характерних точках оболонки наведені на рис. 2.

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

Із проведених розрахунків напружено-деформованого стану металевої гофрованої конструкції випливає, що максимальні напруження виникають на межі горизонтального діаметру труби. І при ступені ущільнення ґрунтової засипки 85 % метал труби переходить у пластичний стан, що пояснюється виникненням напружень більше ніж 235 МПа.

Загалом результати чисельного експерименту свідчать про можливість коректного опису за допомогою МСЕ складних ефектів деформації МГК і ґрунтового середовища при дії високо-інтенсивних навантажень.

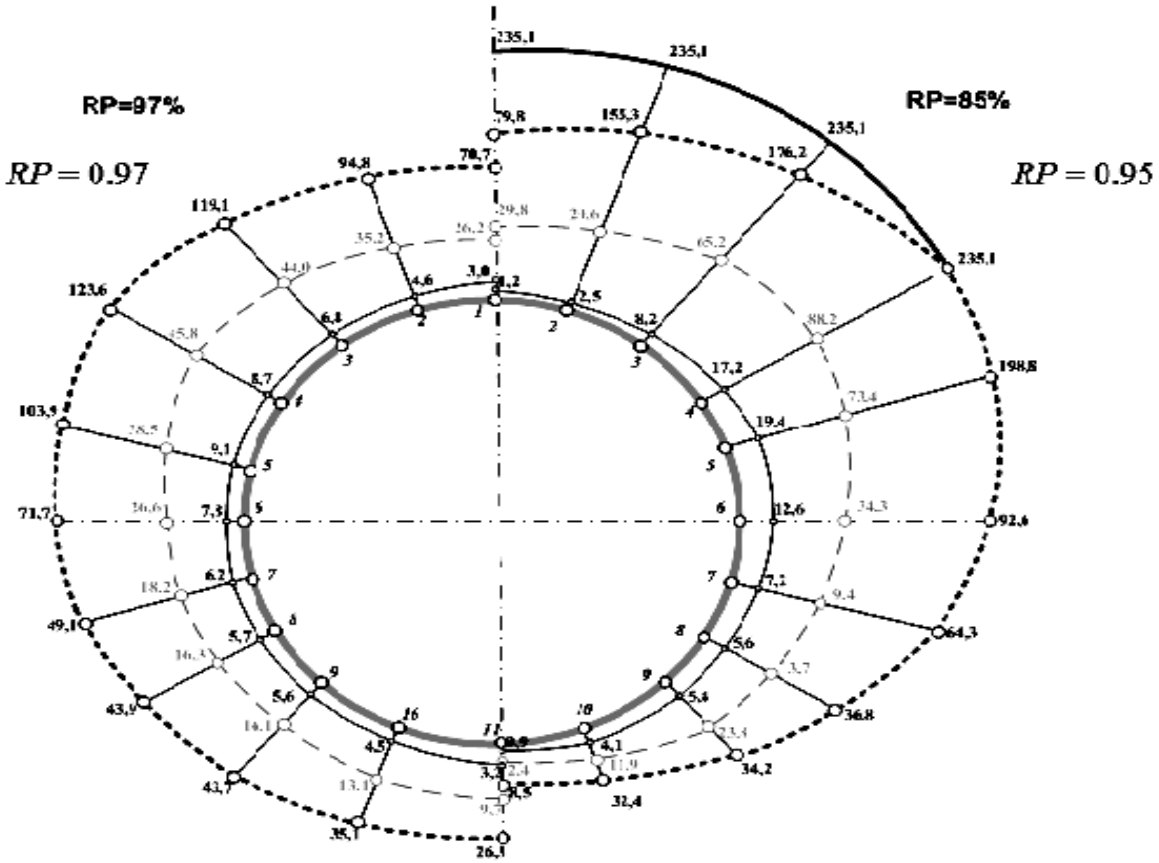

Рис. 2. Розподіл напружень у металевій гофрованій конструкції

Висновки

1. Використання МСЕ при розрахунках системи “навантаження–насип–труба–основа” дозволяє більш реально враховувати регіональні особливості у проектуванні, будівництві та експлуатації металевих гофрованих конструкцій.

2. Аналіз багатоваріантних розрахунків перевірки умови виникнення пластичного шарніру у вершині склепіння труби показав, що зародження пластичного шарніру, яке має місце у склепінні МГК, виконують тільки за умови несприятливого впливу двох факторів – допущення розвитку нерівності колії за межі допустимих значень та зниження ступеня ущільнення ґрунтової засипки нижче 85 %. При відсутності однієї з причин зародження пластичного шарніру не відбудеться.

1. Ковальчук В. В. Вплив товщини гофрованого елемента на напружено-деформований стан металевих гофрованих конструкцій. Вісник Дніпропетровського нац. ун-ту. залізн.. транспорту ім. академ. В. Лазаряна “Наука та прогрес транспорту”. – Дніпропетровськ, 2015. – Вип.3 (57). – С. 199–207. doi: http://dx.doi.org/10.15802/stp2015/46079. 2. Лучко Й. Й. Дослідження несучої здатності металевої гофрованої конструкції за критерієм розвитку пластичного шарніру у вершині труби / Й. Й. Лучко, В. В. Ковальчук, О. С. Набоченко // Вісник Дніпропетровського нац. ун-ту. залізн.. транспорту ім. акад. В. Лазаряна “Наука та прогрес транспорту”. – Дніпропетровськ, 2015. – Вип. 5 (59). – С. 180–194. doi:10.15802/stp2015/55340. 3. Коваль П. М.

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

Нормування при проектуванні і будівництві споруд з металевих гофрованих конструкцій [Текст] / П. М. Коваль, І. П. Баб'як, Т. М. Сітдикова // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту зал. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, № 39, – 2010. – С. 114–117. 4. Посібник до ВБН В.2.3-218-198:2007 Споруди транспорту. Проектування та будівництво споруд із металевих гофрованих конструкцій на автомобільних дорогах загального користування. – К., 2007. – 122 с. 5. ОДМ 218.2.001-2009 Рекомендации по проектированию водопропусных металлических гофрированных труб: Распоряжение Федерального дорожного агентства от 21 июля 2009 г. № 252-р. – 126 с. 6. Wysokowski A., Howis J. Obliczenia przepustow Metodą Elementow Skończonych – MES, 2011, nr 3 (36), s. 54–57. 7. Zagrajek T., Krzesiński G., Marek P.: Metoda elementow skończonych w mechanice konstrukcji. Ćwiczenia z wykorzystaniem ANSYS. Ofi cyna wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa 2005. 8. Клепиков С. Н. Расчет сооружений на деформируемом основании / Клепиков С. Н. – К.: НИИСК, 1996. – 202 с. 9. Метод конечных элементов в проектировании транспортных сооружений / А. С. Городецкий, В. И. Зоворицкий, А. И. Лантух-Лященко, А. О. Рассказов. – М.: Транспорт, 1981. – 143 с.

References

1. Koval'chuk V. V. Vplyv tovshchyny hofrovanoho elementa na napruzheno-deformovanyy stan metalevykh hofrovanykh konstruktsiy [Effect of the thickness of the corrugated element on the stress-strain state of the metal corrugated structures]. Visnyk Dnipropetrovs'koho nats. un-tu. zalizn.. transportu im..akadem. V. Lazaryana "Nauka ta prohres transportu". – Dnipropetrovs'k, 2015, Vol. 3 (57), pp. 199–207. doi: http://dx.doi.org/10.15802/stp2015/46079. 2. Luchko J. J., Koval'chuk V. V., Nabochenko O. S. Doslidzhennja nesuchoї zdatnosti metalevoї gofrovanoї konstrukciї za kriterієm rozvitku plastichnogo sharniru u vershini trubi [Investigation of bearing capacity of metal corrugated construction on the criterion of plastic hinge development at the apex of a pipe]. Visnik Dnipropetrovs'kogo nac. un-tu. zalizn.. transportu im..akadem. V. Lazarjana "Nauka ta progres transportu". – Dnipropetrovs'k, 2015, Vol. 5 (59). pp. 180–194. doi:10.15802/stp2015/55340. 3. Koval' P. M., Bab'jak I. P., Sitdikova T. M. Normuvannja pri proektuvanni i budivnictvi sporud z metalevih gofrovanih konstrukcij [Normization at designing and construction of structures from metal corrugated structures]. Visnik Dnipropetr. nac. un-tu zal. transp. im. ak. V. Lazarjana, 2010, Vol. 39, pp. 114–117. 4. Posibnik do VBN V.2.3-218-198:2007 Sporudi transportu. Proektuvannja ta budivnictvo sporud iz metalevih gofrovanih konstrukcij na avtomobil'nih dorogah zagal'nogo koristuvannja [A guide to VBN V.2.3-218-198: 2007 Transport facilities. Design and construction of structures from metal corrugated structures on public highways]. – Kyiv, 2007, 122 p. 5. ODM 218.2.001-2009 Rekomendacii po proektirovaniju vodopropusnyh metallicheskih gofrirovannyh trub [ODM 218.2.001-2009 Recommendations for the design of water passage metal corrugated pipes], Moscow, 2009, 126 p. 6. Wysokowski A., Howis J. Obliczenia przepustow Metodą Elementow Skończonych – MES, 2011, Vol. 3 (36), pp. 54–57. 7. Zagrajek T., Krzesiński G., Marek P.: Metoda elementow skończonych w mechanice konstrukcji. Ćwiczenia z wykorzystaniem ANSYS. Ofi cyna wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa, 2005. 8. Klepikov S. N. Raschet sooruzhenij na deformiruemom osnovanii [Calculation of structures on a deformable base] – Kyiv, NIISK, 1996, 202 p. 9. Gorodeckij A. S., Zovorickij V. I., Lantuh-Ljashhenko A. I., Rasskazov A. O. Metod konechnyh jelementov v proektirovanii transportnyh sooruzhenij [The method of finite elements in the design of transport facilities]. – M.: Transport, 1981, 143 p.

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua