

ОСНОВНІ ЗАСАДИ РОЗРАХУНКУ МЕТАЛЕВИХ ГОФРОВАНИХ КОНСТРУКЦІЙ МЕТОДОМ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПРИ ВЗАЄМОДІЇ З ГРУНТОВОЮ ЗАСИПКОЮ

Ковальчук В.В.

*Львівська філія Дніпропетровського національного університету
залізничного транспорту ім. ак. В. Лазаряна*

Проблема та її актуальність. Металеві гофровані конструкції (МГК) використовують для будівництва малих і середніх мостів, тунелів, водоперепускних труб під полотном залізничних і автомобільних доріг, переходів, лавинозахисних галерей, тощо. Останнім часом МГК почали активно використовувати для ремонту інженерних споруд в полотні доріг методом “гільзування”. Окремим і перспективним напрямком є використання МГК для будівництва виробничих приміщень і складів, резервуарів для зберігання сипучих матеріалів, об’єктів житлово-комунального господарства.

Головним критерієм робото здатності МГК є припущення, що зусилля, які виникають у стінці металеві труби не призводять до досягнення матеріалом межі текучості.

Рекомендації, щодо розрахунку металевих гофрованих конструкцій методом скінченних елементів в Україні відсутні. Тому проблема розробки наукових засад моделювання та розрахунку напружено-деформованого стану металевих гофрованих конструкцій методом скінченних елементів є актуальною та необхідною для нашої держави.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Згідно з [1], розрахункова схема МГК повинна адекватно відображати роботу труби, ґрунтової обойми та основи. За розрахункову схему потрібно приймати тривимірну схему, а розрахунковими методами рекомендується використовувати метод кінцевих різниць, метод скінченних елементів, або метод граничних елементів. Більш точних розрахунків напружено-деформованого стану металевих гофрованих конструкцій можна отримати за допомогою чисельних розрахунків з використанням методу скінченних елементів [2, 3].

Метод скінченних елементів належить до числових методів. При цьому сама модель МГК і отримані числові результати за його допомогою найбільш вірогідно відповідають роботі реальним конструкцій.

Зазначимо, що точність і вірогідність отриманих числових результатів залежить від низки факторів: розмірності моделі задачі; прийнятих моделей матеріалів ґрунту і труби; крайових умов на межі контакту “труба-ґрунт”, “ґрунт-ґрунт” та на зовнішній поверхні ґрунтової обійми; величини згущення сітки скінченних елементів; достовірних фізичних параметрів ґрунту і матеріалу труби. Далі розглянемо характеристики кожного з перерахованих чинників.

Розмірність моделі задачі. Дослідження напружено-деформованого стану (далі – НДС) МГК можна проводити в рамках плоскої (двовимірної) та об’ємної (тривимірної) математичних моделей задачі. У плоскій задачі переріз труби моделюється криволінійним стержнем (одновимірним елементом), а ґрунт – плоскими елементами [4-6]. Перевагою такого підходу є швидка підготовка моделі та порівняно невелика кількість скінченних елементів (рис. 1) [7]. Недоліком зазначеної моделі є неможливість врахування гофрів труби та коректного завдання навантажень від рухомого складу. Для розрахунків найчастіше використовують САЕ-програми CandeCAD, PLAXIS, SOFISTIK, ЛИРА, Геомеханика. Числові результати дозволяють добре описати якісну картину напружено-деформованого стану досліджуваного об’єкту, але не завжди коректно описують кількісні параметри НДС.

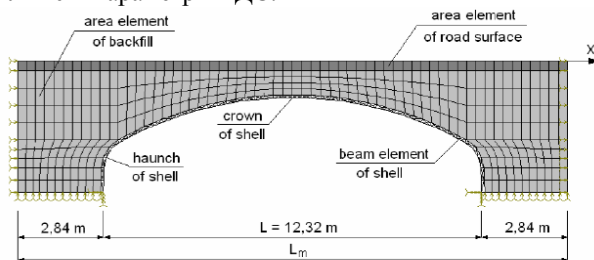


Рис. 1. Плоска скінченно-елементна модель

Використання тривимірної моделі (3D) (рис. 2) дає кращі результати по розподілу внутрішніх сил у металевій трубі, однак вимагає для дискретизації об’єкту великої кількості елементів, і, відповідно, великих затрат часу для підготовки моделі. В цьому випадку ґрунтову обійму розбивають сіткою тривимірних, а трубу – двовимірних елементів.

На даний момент часу у світовому досвіді є три підходи моделювання гофрованої оболонки. Перший підхід ґрунтується на заміні гофрованої ізотропної оболонки гладкою ортотропною (рис. 3) [8, 9].

Ізотропний матеріал гофрованої оболонки (модуль Юнга E , коефіцієнт Пуассона n) заміняють ортотропним з механічними характеристиками E_x, E_y, n_x, n_y , причому

$$E_x = E \frac{A_a}{a \cdot h}, \quad E_y = E \left(\frac{t}{h} \right)^3, \quad v_x = v, \quad v_y = v \frac{E_y}{E_x}, \quad h = \sqrt{12(1 - v_x^2) \frac{I_a}{A_a}}.$$

Тут I_a , A_a – відповідно момент інерції та площа поперечного перерізу труби, віднесені до довжини хвилі a гофра; t – висота гофра; h – прийнята товщина ортотропної оболонки; R – радіус кривини середньої поверхні (рис. 3).

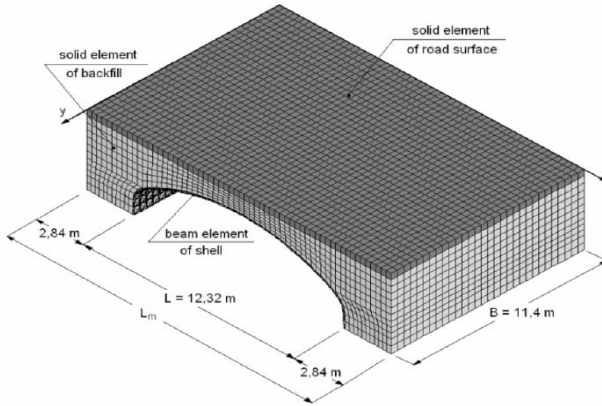


Рис. 2. Схема розбивки ґрунтової обійми сіткою тривимірних, а труби – двовимірних скінченних елементів

Другий підхід полягає у заміні оболонки сіткою стержневих елементів (рис. 4) з накладанням певних кінематичних умов [10]. Стержні розташовані по коловій координаті та вздовж твірної циліндра, а геометричні характеристики їх поперечних перерізів визначаються співвідношеннями:

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

Описані два підходи дають завищені результати напружено-деформованого стану оболонки [9].

Третій підхід передбачає побудову гофрованої оболонки з її наступним скінченно-різницевим розбиттям (рис. 5).

Отримані числові результати є найбільш вірогідними і максимально наближені до натурних випробувань. Водночас підготовка моделі вимагає великого об'єму часу, високої кваліфікації дослідника, значних ресурсів обчислювальної техніки. Для моделювання задачі використо-

вують САЕ-програми високого рівня типу ABAQUS, ANSYS, NASTRAN, COSMOS тощо [5, 9, 11–13].

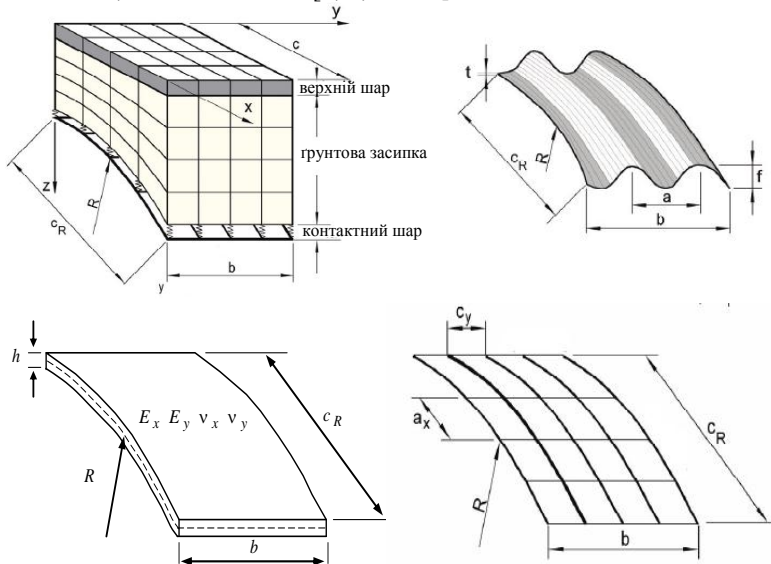


Рис. 3. Схема розбивки труби двовимірними елементами із заміною гофрованої ізотропної оболонки гладкою ортотропною

Крайові умови задачі. Зазначений етап створення віртуального прототипу досліджуваної моделі передбачає завдання розмірів ґрунтової обойми та крайових умов на її поверхнях, а також створення певного “контактного шару” на межі спряження ґрунту і металевої оболонки [5, 6, 8, 14–16]. Зазначимо, що єдиних рекомендацій з цього питання не розроблено. Розміри ґрунтової оболонки повинні перевищувати поперечні розміри металевої труби. За великих розмірів обойми на її краях (у вузлових точках скінченних елементів) задають жорсткі защемлення, за невеликих розмірів – рухомі шарніри із заборонаю кутових та деяких лінійних переміщень (див. рис. 2). Стосовно крайових умов на поверхні “ґрунт – металева оболонка” існує декілька підходів. Один з них полягає у моделюванні контактної оболонки пружними елементами з певними характеристиками жорсткості (зазвичай використовується для плоскої задачі та тривимірної з рівною гладкою поверхнею труби). Така модель допускає проковзування ґрунту по поверхні оболонки. Інший підхід полягає у заданні повного співпадіння вузлових точок спряжених скінченних елементів ґрунту і матеріалу труби. Зазначені

міркування спричинені тим, що гофри (з додатковим обгортанням труби геосинтетикою) покращують зчеплення ґрунту з металом. Також зазначимо, що під час створення скінченно-елементної моделі впливом деяких інженерних об'єктів на кшталт габіонів нехтують; геометричні форми споруд типу уступів спрямляють по відрізках, або кривих. Оболонку розглядають цілісною (нехтують наявністю з'єднаних болтами гофролистів).

Скінченно-елементна сітка. Даний етап моделювання передбачає вибір типу скінченних елементів, їх кількість та згущення розбиття у певних проблемних областях. Рекомендують використовувати параболічні елементи (рис. 6) з проміжними вузлами на сторонах [17]. З одного боку, такі елементи краще моделюють геометрію криволінійних поверхонь деталей; з іншого боку дозволяють зменшити кількість скінченних елементів і одночасно підвищити порядок апроксимації функцій деформацій і напружень.

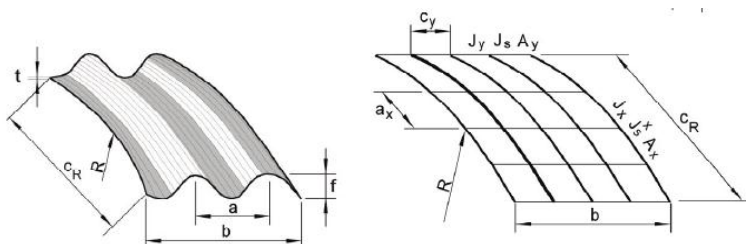


Рис. 4. Схема розбивки труби сіткою стержневих елементів

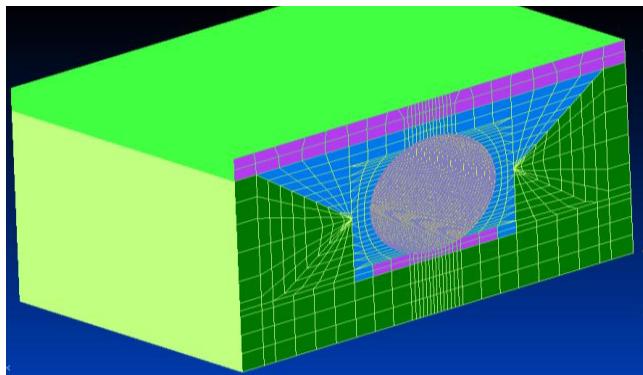


Рис. 5. Схема розбивки гофрованої оболонки з її наступним скінченно-різницевою розбиттям

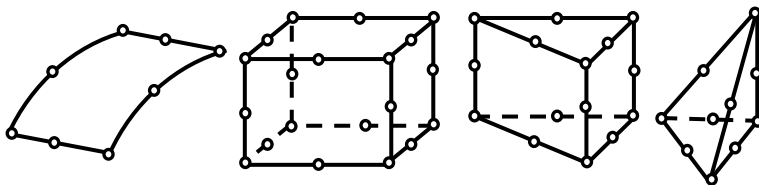


Рис. 6. 2-D елемент типу Plate і 3-D елементи типу Solid (гексаедр, п'ятигранна призма, тетраедр) програми NASTRAN

Простір ґрунту у пазухах гофрів зручно заповнювати призмами і тетраедрами, а потім з віддаленням від оболонки ґрунт моделюють гексаедрами. Згущення скінченно-елементної сітки використовують у місцях можливої концентрації напружень, в областях контакту спряжених тіл тощо [18–20]. Зокрема, поблизу гофрів розміри скінченних елементів вибирають дрібнішими, а решту області розбивають крупнішими елементами. Чим більша кількість елементів вибрана для розбиття моделі, тим точніші числові дані. Сучасні САЕ-програми дозволяють будувати скінченно-елементну сітку з мільйонами вузлів. Водночас необхідно пам'ятати, що згущення розбиття вимагає збільшення часу для підготовки віртуального прототипу моделі, машинного часу розрахунків, ресурсів комп'ютерної техніки (особливо під час розв'язування нелінійних задач ітераційними методами).

Моделі матеріалів ґрунту і оболонки. Під час інженерних розрахунків використовують різноманітні моделі матеріалів ґрунтів і металів [21]. Кожна з моделей (ідеально-пружна, ідеально-пластична, в'язкопружна, тощо) ґрунтується на встановлених експериментальними дослідженнями залежностях між напруженнями і деформаціями в процесі навантаження зразка матеріалу. Найбільш часто вживаними є спрощені моделі ідеально-пружного та пружного ідеально-пластичного матеріалів (рис. 7).

Для більшості матеріалів має місце закон Гука (лінійна залежність ОА) між s і e . Вище точки А це співвідношення порушується. Відповідне напруження називається межею пропорційності (текучості) s_{δ} .

Під час моделювання МГК метал переважно розраховують у пружній стадії. Це пояснюється тією обставиною, що гофри оболонки забезпечують високу податливість конструкції, а тому навіть значні деформації труби відбуваються за напружень, менших межі текучості [14, 22]. В цьому випадку матеріал оболонки задають трьома параметрами: модулем Юнга E ($E = tga$), коефіцієнтом Пуассона n і густиною r .

Якщо ж виникає небезпека появи пластичних деформацій, то розглядають модель пружного ідеально-пластичного матеріалу і вводять кри-

терій міцності, або пластичності (Yield Function). В цьому випадку у просторі напружень розрізняють наступні напружені стани: стабільний, нестабільний (в момент текучості, або руйнування) і неможливий (недопустимий). Межа між стабільним і неможливим станами називається межею текучості. Напружений стан всередині межі текучості характеризує пружну поведінку матеріалу. В розрахунках найчастіше використовують моделі (критерії міцності) фон Мізеса (для металів), Мора-Кулона і Друккера-Прагера (для ґрунтів) (рис. 8).

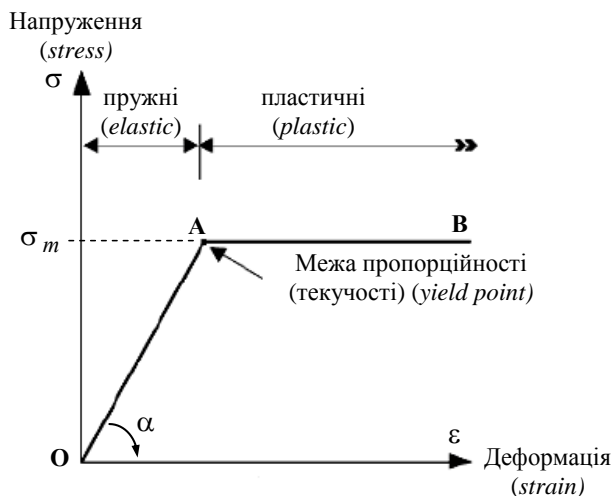


Рис. 7. Ідеально-пружний (OA) та пружний ідеально-пластичний (OAB) зв'язок між деформаціями та напруженнями для металу труби

Таким чином, за небезпеки виникнення пластичних деформацій у металі труби під час розрахунків задають критерій фон Мізеса. В цьому випадку до параметрів E , n , r додатково задають значення межі текучості s_y . Для ідеально-пластичних моделей ґрунту типу Мора-Кулона і Друккера-Прагера задають шість констант: дві пружні характеристики – модуль деформації E (аналог модуля Юнга) і коефіцієнт Пуассона n ; густину r ; три характеристики пластичності – кут внутрішнього тертя f ($0 < f < 90^\circ$), коефіцієнт зчеплення c і кут дилатансії Y ($0 < Y < f$). Зазначимо, що моделей ґрунту існує багато, для частини з них створені спеціальні типи скінченних елементів. Більш су-

часні моделі ґрунту реалізовані в програмі скінченно-елементного аналізу ABAQUS [23 – 25].

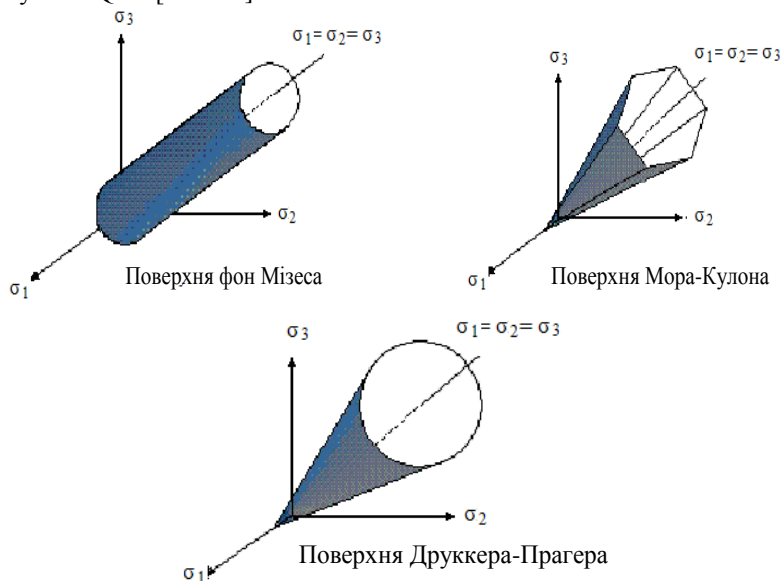


Рис. 8. Поверхні текучості

Висновки. Для розрахунку напружено-деформованого стану МГК, рекомендується використовувати метод скінченних елементів, який дозволяє точно врахувати геометрію конструкції та фізичні властивості окремих елементів споруди.

Summary

This paper provides recommendations on the use of metal-Todua finite element in the calculation of the stress-strain state corrugated metal structures vnasli-docking interaction corrugated metal pipe with backfill soil.

1.ОДМ 218.2.001-2009 Рекомендации по проектированию водопропусных металлических гофрированных труб: Распоряжение Федерального дорожного агентства от 21 июля 2009 г. № 252-р. 2. Wysokowski A., Howis J. Obliczenia przepustow Metodą Elementow Skończonych – MES, 2011, nr 3 (36), s. 54–57. 3. Zagrajek T., Krześciński G., Marek P.: Metoda elementow skończonych w mechanicie konstrukcji. Ćwiczenia z wykorzystaniem ANSYS. Ofi syna wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa 2005. 4. Фрезе М. В. Взаимодействие металлических гофрированных конструкций с ґрунтовой средой. Диссертация на

соискание ученой степени канд. техн. наук, Санкт-Петербург, 2006. – 162 с. **5.** Петрова Е. Н. Совершенствование методов расчета обделок тоннелей из стальных гофрированных элементов. Диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук, Москва, 2011. – 134 с. **6.** Временные технические указания по применению металлических гофрированных конструкций (для опытного применения). Санкт-Петербург, НИИ мостов, 2002. – 114 с. **7.** Інструкція з улаштування та утримання колії залізниць України. ЦП 0138 / Е.І. Даніленко, В.О. Яковлев, А.М. Орловський, М.І. Карпов та ін. – Затверджено наказом Укрзалізниці від 22 грудня 2005 р. №427-Ц. – К.: Транспорт України, 2006. – 336 с. **8.** Machelski Cz. Modelowanie mostowych konstrukcji gruntowo-powlokowych. Dolnoslaskie Wydawnictwo Edukacyjne, 2008. – 208 s. **9.** El-Sawy K. M. Three-dimensional modeling of soil-steel culverts under the effect of truckloads. *Thin-Walled Structures*, No. 41, 2003. – P. 747-768. **10.** Machelski Cz. Kinematic method for determining influence function of internal forces in the steel shell of soil-steel bridge. *Studia Geotechnica et Mechanica*, Vol. XXXII, No. 3, 2010. – P. 28-40. **11.** Pettersson L., Leander J., Hansing L. Fatigue design of soil steel composite bridges. *Archives of institute of civil engineering*, Nr. 12, 2002. – S. 237-242. **12.** Elshimi T. M. Three-dimensional nonlinear analysis of deep-corrugated steel culverts. *Queen's University Publ.*, 2011. – 738 p. **13.** Barbato M., Bowman M., Herbin A. Performance evaluation of buried pipe installation. *Louisiana State University Publ.*, 2010. – 123 p. **14.** Жинкин А. Проблемы и перспективы типового проектирования металлических гофрированных конструкций. *Транспорт Российской федерации*, № 5, 2006. – С. 53-54. **15.** Беляев В. С., Сандгартен М. Л. Методические основы практических расчетов металлических гофрированных конструкций. *Стройметалл*, № 1, 2009. – С. 17-19. **16.** Wysokowski A., Howis J., Dabska D. *Przepusty w infrastrukturze komunikacyjnej – cz. 11. Nowoczesne Budownictwo Inzynieryjne*, Nr. 6, 2011. – S. 88-94. **17.** Рудаков К.Н. FEMAP 10.2.0. Геометрическое и конечно-элементное моделирование конструкций. К.: КПИ, 2011. – 317 с. **18.** Рычков С. Моделирование конструкций в среде Femap with NX Nastran. Изд-во ДМК-Пресс, 2013. – 784 с. **19.** Шимкович Д. Г. Femap & Nastran. Инженерный анализ методом конечных элементов. Изд-во ДМК-Пресс, 2008. – 702 с. **20.** Logan D. L. *A first course in the finite element method*. Cengage Learning Publ., 2012. – 1000 p. **21.** Строкова Л. А. Определяющие уравнения для грунтов. Изд-во Томского политехнического института, 2010. – 151 с. **22.** МГК: Экзамен на прочность сдан. *Евразия вестн.*, № 2, 2008. – С. 6. **23.** Helwany S. *Applied soil mechanics with ABAQUS applications*. John Wiley & Sons Publ., 2007. – 398 p. **24.** Katzenbach R. *Anwendungen der FEM in der geotechnik*. Technische Universitat Darmstadt, 2004. – 194 s. **25.** Строкова Л. А. Применение метода конечных элементов в механике грунтов. Изд-во Томского политехнического института, 2010. – 143 с.