

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРУЖНИХ БАГАТОШАРОВИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ДОРОЖНЬОГО ОДЯГУ ВЕЛОСИПЕДНИХ ШЛЯХІВ МЕТОДОМ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ

¹Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка

Проведено узагальнене порівняння несучої здатності і деформативності різних типів покриття велосипедних доріжок на основі моделювання їх роботи методом скінченних елементів.

Ключові слова: метод скінченних елементів, велосипедні шляхи, дорожній одяг.

Вступ

Застосування методу скінченних елементів (МСЕ) для розрахунку дорожнього одягу є досить перспективним напрямком проведення досліджень [1]. Цей метод дозволяє враховувати залежність механічних характеристик матеріалу від напружень, дає можливість прогнозувати розвиток тріщин в процесі служби покриття, відображати особливості розподілу тиску, прикладеного до покриття в залежності від типу протектора шини, а також отримувати інші важливі результати для задач, аналітичне розв'язання яких неможливе. Проте використання МСЕ висуває підвищені вимоги до кваліфікації дослідника стосовно вводу вихідних даних, таких як геометричні розміри розглядуваної області, граничних умов на її межах, розмірів скінченних елементів (СЕ) та фізико-механічних характеристик складових матеріалів [2]. Важливим також є фактор аналізу та врахування похибки розрахунку, особливо у тих випадках, коли точний розв'язок відсутній.

Із розвитком у останні десятиліття електронно-обчислювальної техніки, популярність МСЕ сприяла створенню низки комерційних пакетів програм, серед яких в механіці можна відмітити NASTRAN, ANSYS, SCAD, Cosmos, ASKA, ЛИРА, MOHOMAX та інші, що використовуються для статичних, динамічних та інших розрахунків різноманітних конструкцій, які мають складну геометричну конфігурацію та нерегулярну фізичну структуру. Розв'язуючи задачі теорії пружності про багатощаровий напівпростір, використовують комп'ютерні програми такі, як BISTRO, BISAR, LAYMED, CHEVRON-5L, PAKADAPT, MTC-93 і АЛГОФОРТ.

Огляд останніх джерел досліджень і публікацій [1, 3—5] показав, що розрахунок дорожнього одягу проводиться з метою аналізу розподілу тиску від шини транспортного засобу до ґрунту основи, визначення деформацій у шарах дорожнього одягу, які виникають під час навантажень, прогнозування розвитку тріщин у складових покриття, що призводить до часткового чи повного його руйнування. Незважаючи на накопичення результатів таких досліджень, їх актуальність не зменшується, оскільки під час дорожнього будівництва постійно застосовують нові конструктивні складові, такі як армуючі елементи в асфальтобетонних та щебених шарах, покриття на основі полімерів тощо.

Виділення нерозв'язаних раніше частин загальної проблеми. Особливо необхідним є накопичення результатів розрахунку дорожнього одягу велосипедних шляхів, адже значення та характер навантаження від шин велосипедів дещо відрізняється від навантажень шин інших транспортних засобів (легкових і вантажних автомобілів тощо), які широко й досить давно експлуатують дороги.

Результати дослідження

Для чисельного моделювання напружено-деформованого стану (НДС) ділянки покриття велосипедної доріжки було вибрано класичний інтерфейс програмного комплексу NASTRAN (NAsa STRuctural ANalysis) Femap 10.1.1 SC 32bit / 64 bit. Ця програма скінченно-елементного аналізу розроблена компанією MacNealSchwendler Software — MSC. Software Corporation, що є визнаним лідером у цьому напрямку. Перевагами використаної програми є:

— чисельні методи розріджених матриць, які використовуються за будь-якого типу розрахунків

цієї програми, значно підвищують швидкість підрахунків та мінімізують обсяг необхідної дискової пам'яті;

— можливість задання фізико-механічних характеристик будь-яких матеріалів, в тому числі нелінійних діаграм їх роботи;

— можливість врахування навантажень різного типу походження (вібрації, статичні, динамічні чи температурні навантаження);

— велика кількість опублікованих книг, статей і рекомендацій з інструкціями з користування цією програмою [6].

Під час досліджень використовувалась навчальна демо-версія SDRC-FEMAP 8/1a S/N 000-00-00-DEMO-406F-00000000.

Створення скінченно-елементної моделі ділянки покриття для дослідження її НДС у пружній стадії роботи виконувалось в порядку, показаному у табл. 1.

Таблиця 1

Порядок проведення скінченно-елементного аналізу моделі покриття

№ стадії	Назва стадії чисельного дослідження	Короткі роз'яснення щодо стадії чисельного дослідження
1	Вибір системи координат та створення геометрії моделі	Створення просторової об'ємної фігури моделі у декартовій системі координат (з урахуванням пошарового складу моделі з різних матеріалів)
2	Введення властивостей матеріалів	Задавання значень модуля пружності Юнга E , коефіцієнта поперечних деформацій ν і закону деформування (σ - ϵ) згідно з чинними нормативними документами
3	Вибір типу скінченних елементів (СЕ) та розбиття моделі на СЕ	Заповнення створеної об'ємної фігури СЕ типу Hex Mesh (гексаедр), розмір яких залежав від часу створення об'ємної СЕ сітки, необхідного дискового простору для проведення ПК розрахунку, точності та збіжності отриманих результатів
4	Задавання граничних умов та формування системи навантажень	Вибір площин та прикладення до них опорних закріплень чи навантажень із зазначенням їх величин і типу виникнення (статичне, розподілене тощо)
5	Перевірка коректності розробленої моделі	Контроль якості, симетричності та кількості об'єднаних співпадаючих вузлів СЕ решітки
6	Вибір типу та проведення СЕ аналізу	Вибір параметрів та проведення нелінійного аналізу з урахуванням заданих діаграм роботи матеріалів
7	Аналіз отриманих результатів розрахунків	Формування результатів розрахунку для практичного використання: графіків розподілу напружень та деформацій

Габаритні розміри всіх моделей покриття бралися 1×1 м. Проведені розрахунки моделей із різною товщиною шарів. Вузли СЕ на підшві моделі обмежували в переміщеннях по трьох осях (x , y , z), а вузли СЕ на бокових поверхнях обмежували тільки по осях x та y . Розміри ребер СЕ лежали в межах від 2 до 4 см. Навантаження прикладали рівномірне нормальне до площадки, розташованої посередині верхньої поверхні моделі. Розміри цієї площадки брались 3×10 см. Величина навантаження бралась згідно з [5] — мінімальне статичне навантаження на колесо велосипеда. На рис. 1 показана модель тришарового покриття.

Моделюванню підлягали п'ять найпоширеніших типів одягу велосипедних шляхів (табл. 2), що обрані на основі аналізу існуючих типів покриттів [3]. У табл. 2 наведені вихідні основні фізико-механічні характеристики матеріалів, з яких виконується покриття.

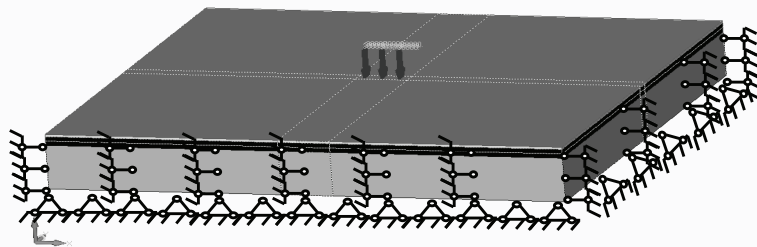


Рис. 1. Геометрична модель тришарового одягу велосипедної доріжки

Вихідні дані для проведення розрахунків: тип та пошаровий склад із необхідними фізико-механічними характеристиками шарів одягу велосипедних доріжок

Назва покриття	Тип одягу велосипедних доріжок				
	Асфальт звичайний	Асфальт із введенням гумової крихти	Монолітний чи збірний бетон	Покриття на основі полімерів	Штучні: камінь, гравій, пісок
Пошаровий склад одягу (фізико-механічні характеристики шарів)	асфальт ($E = 5 \cdot 10^4$ МПа $\nu = 0,25$) щебінь ($E = 200$ МПа $\nu = 0,22$)	асфальт із гумовим заповнювачем ($E = 1,5 \cdot 10^4$ МПа $\nu = 0,35$) щебінь ($E = 200$ МПа $\nu = 0,22$)	бетон ($E = 2 \cdot 10^4$ МПа $\nu = 0,17$) щебінь ($E = 200$ МПа $\nu = 0,22$)	пісок ($E = 100$ МПа $\nu = 0,33$) бітум ($E = 110$ МПа $\nu = 0,45$) армуюча металофібра ($E = 2 \cdot 10^5$ МПа $\nu = 0,3$) бетон ($E = 2 \cdot 10^4$ МПа $\nu = 0,17$)	камінь ($E = 7 \cdot 10^4$ МПа $\nu = 0,15$) або гравій ($E = 200$ МПа $\nu = 0,22$) або пісок ($E = 100$ МПа $\nu = 0,33$)

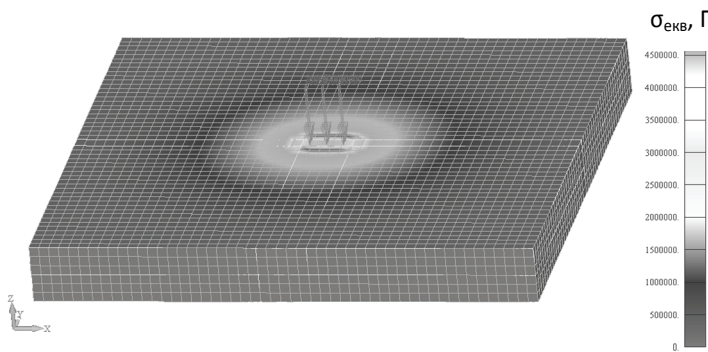
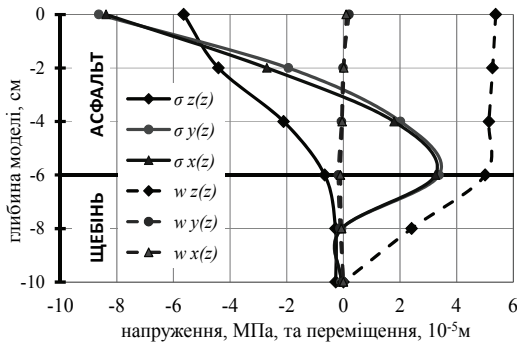


Рис. 2. Розподіл головних напружень на верхній поверхні моделі покриття № 3

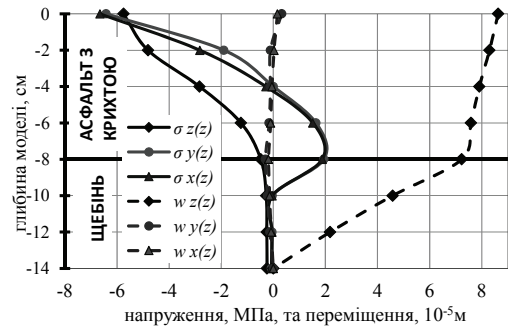
$w_x(z)$, $w_y(z)$ у товщі по осі симетрії моделі, нормальній до верхньої поверхні зразка, для різних типів покриття. При цьому по осі абсцис відкладено числові значення зміни напружень в МПа чи переміщень у 10^{-5} м, а по осі ординат — необхідну товщину складових покриття для забезпечення несучої здатності ґрунтів основи.

На рис. 2 показано загальний вигляд моделі дорожнього покриття після проведення розрахунку — розподіл головних напружень на верхній поверхні моделі.

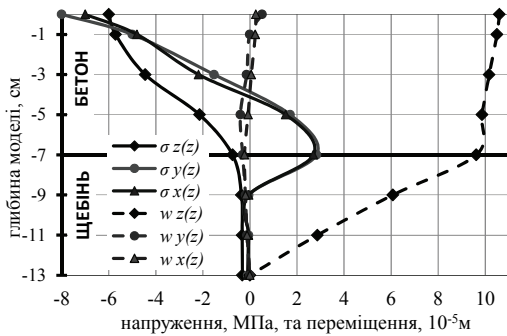
Аналізуючи напружено-деформований стан моделей дорожнього покриття, основними вважали такі характеристики: вертикальні σ_z та горизонтальні σ_x чи σ_y напруження, а також вертикальні w_z та горизонтальні w_y та w_x деформації. На рис. 3 зображено, як виглядають функції $\sigma_z(z)$, $\sigma_x(z)$, $\sigma_y(z)$ та $w_z(z)$,



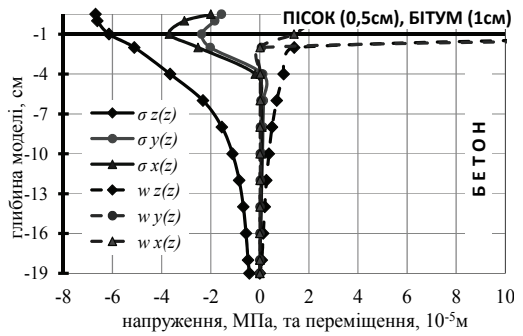
Покриття типу 1



Покриття типу 2



Покриття типу 3



Покриття типу 4

Рис. 3. Графіки розподілу напружень та переміщень у товщі моделей дорожнього покриття

Під час проведення розрахунків завжди контролювались напруження на підшві моделі, щоб вони не перевищували розрахункового опору ґрунтів основи. У разі невиконання цієї умови проводилось збільшення товщини шарів моделі та повторний розрахунок. До табл. 3 занесені оптимальні товщини шарів покриття аналізованих типів.

Таблиця 3

Результати розрахунків: узагальнене порівняння типів покриття велосипедних доріжок

Назва покриття	Тип покриття велосипедних доріжок				
	Асфальт звичайний	Асфальт із введенням гумової крихти	Монолітний чи збірний бетон	Покриття на основі полімерів	Штучні: камінь, гравій, пісок
Склад покриття	асфальт — 6 см щебінь — 4 см	асфальт із гумовим заповнювачем — 8 см щебінь — 6 см	бетон — 7 см щебінь — 6 см	пісок — 0,5 см бітум — 1 см армуюча метало-фібра — Ø1 мм бетон — 18 см	камінь або гравій або пісок — 19 см
Напруження σ_z на підшві покриття, кПа	195	175	197	191	180
Розрахунковий опір ґрунтів основи R_0 , кПа (суглинок)	200				

З показаних на рис. 3 графіків випливає закономірність зміни напружень у товщі покриття: нормальні напруження до вертикальної осі (осі навантаження) σ_z мають максимальне значення близько 6 МПа безпосередньо на поверхні покриття під площиною навантаження та зменшуються за однаковим законом до гранично допустимого значення $R_0 = 200$ кПа на підшві моделі покриття. Вертикальні деформації w_z теж мають найбільше значення $5 \dots 10 \times 10^{-5}$ м на поверхні покриття та практично рівні нулю на підшві моделі покриття. Нормальні напруження до горизонтальних осей σ_x та σ_y на рівні площини навантаження мають значення стиску 4...8 МПа, а на глибині 3...4 см моделі переходять в зону розтягу та мають значення до 3 МПа, стабілізуючись на глибині 8...10 см до гранично допустимих значень 200 кПа.

Висновки

За результатами чисельного моделювання напружено-деформованого стану ділянки покриття велосипедної доріжки у програмному комплексі скінченно-елементного аналізу NASTRAN визначено оптимальні товщини шарів найпоширеніших типів покриття велосипедних шляхів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Мерзлякин А. Е. Моделирование упругого однородного и двухслойного полупространства применительно к задачам по расчету дорожных одежд методом конечных элементов / А. Е. Мерзлякин, Н. В. Капустников // Дороги и мосты. Омск : СибАДИ, 2011. — № 1(25). — С. 63—72.
2. Стренг Г. Теория метода конечных элементов / Стренг Г., Фикс Дж. — М. : Мир, 1977. — 349 с.
3. Литвиненко Т. П. Дорожные покрытия, которые могут применяться при строительстве велосипедных дорожек / Т. П. Литвиненко, Л. В. Смилянец // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Охрана окружающей среды, транспорт, безопасность жизнедеятельности. — Пермь, 2013. — № 2. — С. 103—115.
4. Автомобільні дороги : ДБН В.2.3-4:2007. — [Чинний від 2008-03-01]. — К. : Мінрегіонбуд України, 2007. — 91 с.
5. Споруди транспорту. Вулиці та дороги населених пунктів: ДБН В. 2. 3 — 5 — 2001. — [Чинний від 2001-10-01]. — К. : Держбуд України, 2001. — 50 с.
6. Шимкович Д. Г. Расчет конструкций в MSC/NASTRAN for Windows. — М. : ДМК, 2003. — 448 с.

Рекомендована кафедрою промислового та цивільного будівництва ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 12.05.2015

Гасенко Ліна Володимирівна — аспірантка кафедри автомобільних доріг, геодезії, землеустрою та сільських будівель, e-mail: lin02011@meta.ua.

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, Полтава

L. V. Gasenko¹

Investigation of elastic multilayer models for calculating the pavement surfacing of bicycle paths by finite element method

¹Yurii Kondratiuk Poltava National Technical University

The generalized comparison of bearing capacity and deformability of different types of pavement surfacing of bicycle paths based on their modeling by the finite element method is conducted in the paper.

Keywords: finite element method, bicycle paths, road surface.

Gasenko Lina V. — Post-Graduate Student of the Chair of Roads, Geodesy, Land Engineering and Rural Buildings, e-mail: lin02011@meta.ua

Л. В. Гасенко¹

Исследование упругих многослойных моделей для расчета дорожного покрытия велосипедных путей методом конечных элементов

¹Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка

Проведено обобщенное сравнение несущей способности и деформативности различных типов покрытия велосипедных дорожек на основе моделирования их работы методом конечных элементов.

Ключевые слова: метод конечных элементов, велосипедные пути, дорожное покрытие.

Гасенко Лина Владимировна — аспирант кафедры автомобильных дорог, геодезии, землеустройства и сельских зданий, e-mail: lin02011@meta.ua