

## ДО АНАЛІЗУ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ДОРОЖНЬОГО ОДЯГУ ЖОРСТКОГО ТИПУ

Кияшко В.Т.<sup>1</sup>, Косарчук В.В.<sup>2</sup>, Агарков О.В.<sup>2</sup>, Ковальчук В.В.<sup>2</sup>, Чаусов М. Г.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління  
вул. Митрополита Василя Липківського, 35, 03035, м. Київ;

<sup>2</sup>Державний університет інфраструктури та технологій  
вул. Кирилівська, 9, 04071, м. Київ

<sup>3</sup>Національний університет біоресурсів і природокористування України  
вул. Героїв оборони, 15, 03041, м. Київ

deahoronapraci@gmail.com, kosarchuk\_vv@gsuite.duit.edu.ua,  
agarcov@gmail.com, kovalchuk\_vv@gsuite.duit.edu.ua, m.g.chausov@gmail.com

Мета роботи – чисельний аналіз напружено-деформованого стану (НДС) дорожнього одягу жорсткого типу. Актуальність дослідження зумовлена тим, що останнім часом у практиці проектування автомобільних доріг починають використовувати чисельні методи механіки деформівного твердого тіла, зокрема, метод скінченних елементів. У чинних нормативних документах для аналізу НДС дорожнього одягу використовують доволі спрощені розрахункові схеми, оскільки для складних за формою, способом навантаження, неоднорідних за природою і механічною поведінкою елементів конструкції, які, до того ж, контактують між собою, такі задачі надзвичайно складні й не мають аналітичного розв'язку. Тому в нормативних документах використовують різні схеми для визначення окремих розрахункових характеристик, а результати розрахунків залежать від великої кількості емпіричних поправочних коефіцієнтів. Використання методу скінченних елементів (МСЕ) дає змогу розглядати одночасний вплив усіх складників напружено-деформованого стану за єдиною розрахунковою схемою з урахуванням реальних геометричних форм об'єктів, що розглядаються. Проте використання складних (із точки зору математичного моделювання) схем призводить до значного збільшення обчислювальних витрат на розв'язання задачі або навіть робить неможливим її розв'язання за допомогою програмного забезпечення, що застосовується. Тому при розрахунку складних конструкцій доцільно поступово ускладнювати розрахункову модель із відповідним аналізом результатів. Такий підхід дає змогу відповісти на дуже важливе питання – які параметри розрахункової схеми суттєво впливають на результати обчислень, а якими можна знехтувати. Одержані результати дають змогу стверджувати, що при правильному виборі розрахункової схеми метод скінченних елементів дає досить точні оцінки напружень і деформацій у такій складній конструкції, як багат шаровий дорожній одяг. *Ключові слова:* напружено-деформований стан, дорожній одяг жорсткого типу, метод скінченних елементів.

**To the stress-strain state of road pavement of hard type. Kiyashko V., Kosarchuk V., Agarcov O., Kovalchuk V., Chausov M.**

The purpose of this paper is a numerical analysis of the stress-strain state of the road pavement of hard type. The relevance of the study is since that recently in the practice of designing roads begin to use numerical methods of mechanics of deformable solids, in particular, the finite element method. In the current regulations for the analysis of the stress-strain state of the pavement, use fairly simplified design models. This is because for structural elements that are complex in shape, method of loading and are also heterogeneous in nature and mechanical behavior, such problems are extremely complex and have no analytical solution. Therefore, regulations use different schemes to determine separate calculation characteristics, and the results of calculations depend on a large number of empirical correction factors. The finite element method (FEM) makes it possible to consider the simultaneous influence of all components of the stress-strain state in a single design model, taking into account the real geometric shapes of the studied objects. However, the usage of complex (in terms of mathematical modeling) schemes leads to a significant increase in the computational costs of solving the problem or even makes it impossible to solve it using the software used. When calculating complex structures, it is advisable to gradually complicate the calculation model, taking into account the relevant analysis of the results. This approach makes it possible to determine which parameters of the design model significantly affect the results of calculations, and which can be neglected. The obtained results show that with the correct choice of the design model, the finite element method gives sufficiently accurate estimates of stresses and strains in such a complex structure as multilayer road pavement. *Key words:* stress-strain state, road pavement, finite element method.

**Постановка проблеми.** Як і будь-яка інженерна споруда, конструкція дорожнього одягу має бути міцною, надійною, довговічною та відповідати певним експлуатаційним вимогам. Саме тому розробці нових і розвитку наявних методів розрахунку дорожніх конструкцій приділяють значну увагу дослідники.

Послідовність етапів проектування дорожнього одягу можна відобразити у вигляді структурної схеми (рис. 1). На першому етапі визначають можливу навантаженість дороги (враховують особливості промислового і сільськогосподарського виробництва в певних регіонах країни та обсяги товарообміну між ними, а також переважні типи

транспортних засобів). До того ж враховують кліматичні умови, переважний рельєф місцевості, наявність місцевих будівельних матеріалів тощо. Ці дані використовують для вибору категорії дороги і типу покриття (жорсткого цементобетонного або нежорсткого асфальтобетонного чи іншого).

Далі визначаються з кількістю шарів дорожнього одягу і матеріалами для їх облаштування, а також з особливостями конструкції покриття. Так формується початковий варіант розрахункової моделі (схеми) конструкції дороги.

На наступному етапі визначають механічні і теплофізичні властивості матеріалів, які будуть використані при будівництві. Цей етап є одним із найскладніших, оскільки для визначення наведених характеристик необхідним є проведення різноманітних експериментальних досліджень. Для деяких матеріалів, які вже використовували для будівництва інших доріг, такі дані можна знайти в нормативних документах або інших джерелах. Але щодо багатьох місцевих будівельних матеріалів (зокрема відходів гірничодобувної або металургійної промисловості) інформація про їхні фізико-механічні властивості практично відсутня.

Одним із найважливіших етапів проєктування є розрахунок напружено-деформованого стану (далі – НДС) конструкції. На цьому етапі розробляють розрахункові схеми, обирають методи розрахунку та програмне забезпечення для їх реалізації. Після перевірки міцності і жорсткості конструкції за встановленими критеріями розрахунковим шляхом оцінюють довговічність конструкції дороги. У разі задовільного результату цей варіант конструкції приймають за остаточний. В іншому випадку розглядають інший варіант конструкції (наприклад, змінюють товщину шарів покриття та їхню кількість, вибирають інші матеріали тощо).

**Актуальність дослідження.** У нормативних документах [1–3] для аналізу НДС елементів дорожнього одягу використовують доволі спрощені розрахункові схеми. Це пов'язано з тим, що для конструкцій, елементи яких мають різну мікро- і макроструктуру, різну механічну поведінку та ще й контактують між собою, вказана задача є надзвичайно складною і нині не має теоретичного вирішення. Тому нормативні розрахунки містять велику кількість емпіричних коефіцієнтів, які суттєво впливають на остаточний результат, наприклад, на величину нормального напруження на підшві бетонної плити (за нею оцінюють міцність верхнього покриття). Для розрахунку НДС елементів конструкції дорожнього одягу можна використовувати чисельні методи механіки деформівного твердого тіла, наприклад МСЕ [4]. Зазначимо, що єдиної методики розрахунку напружено-деформованого стану елементів конструкції дорожнього одягу за допомогою МСЕ, яка була б регламентована в Україні або в інших країнах, поки що не існує. Тому для розрахунку складних (із точки зору

математичного моделювання) конструкцій доцільним є поступове ускладнення розрахункової моделі з відповідним аналізом результатів. Такий підхід дає змогу відповісти на важливе питання: які фактори чи параметри розрахункової схеми суттєво впливають на результати обчислень, а якими можна знехтувати?

Дослідження проведено в межах виконання етапу «Аналітичні та теоретичні дослідження основ проєктування дорожнього одягу жорсткого типу з використанням відходів гірничодобувної промисловості» НДР «Розроблення екологічно прийнятних технологій поводження з відходами гірничорудної та металургійної промисловості», номер Державної реєстрації 0120U101148.

**Виклад основного матеріалу.** Для того, щоб чисельний розрахунок відповідав нормативному за основними параметрами, приймемо наведені нижче

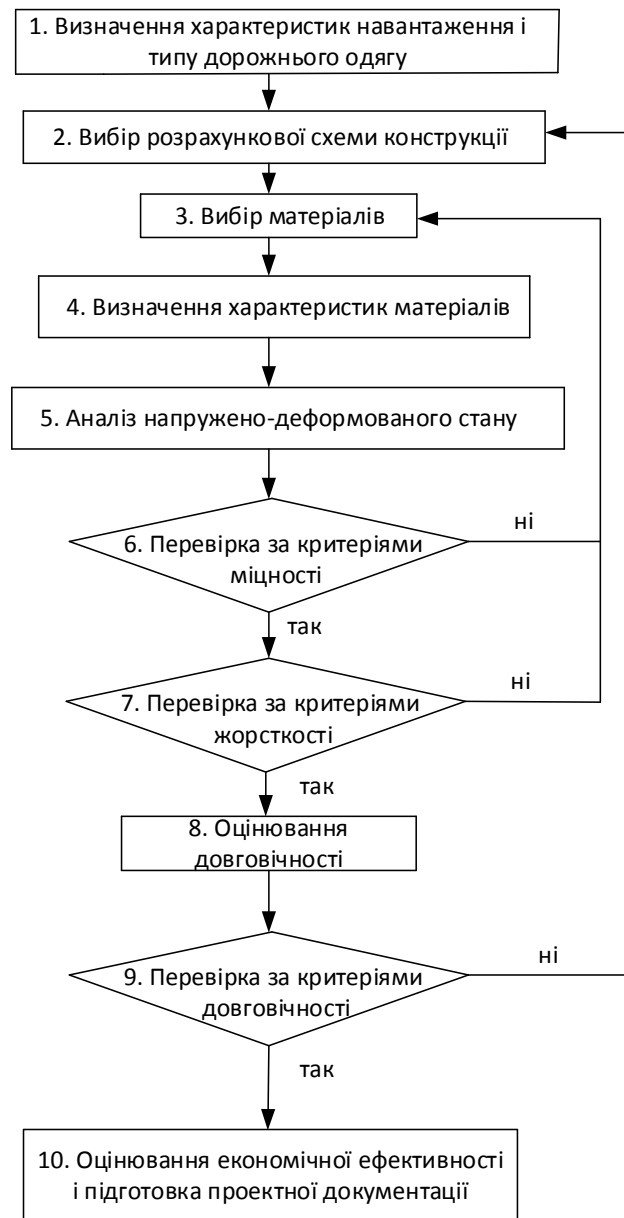


Рис. 1. Послідовність проєктування дорожнього одягу

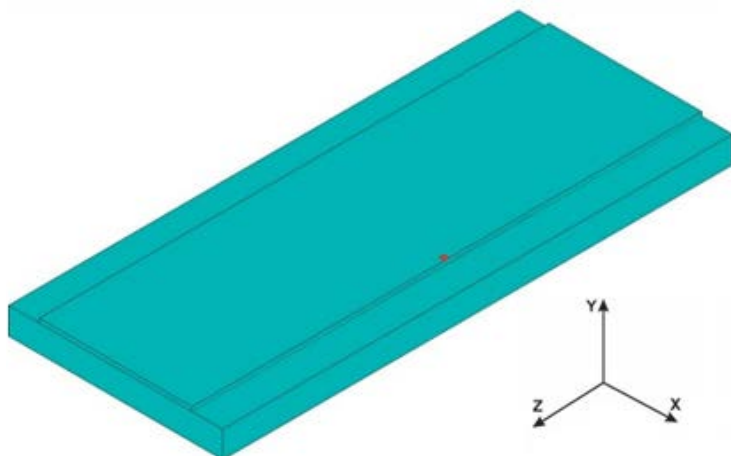


Рис. 2. Загальний вигляд моделі дорожнього одягу

характеристики розрахункової схеми МСЕ, яка складається з трьох основних моделей: геометричної, фізичної та моделі крайових умов.

**Геометрична модель:** покриття дороги складається із двох шарів – монолітної бетонної плити товщиною 20 см і шару основи товщиною 130 см. Загальна довжина бетонної плити становить 25 м, ширина 7,5 м. Шар основи з усередненими механічними характеристиками має довжину 25 м, ширину 10,5 м. Між цими двома шарами змодельовано контакт площею 187,5 м<sup>2</sup>. Шар основи розташований на абсолютно жорстких опорах. Коефіцієнт тертя між бетоном і основою дорівнює 0,8. Після розбивки на скінченні елементи розрахункова геометрична модель складатиметься з 1 397 500 елементів та 1 509 012 вузлів. На рис. 2 показаний загальний вигляд геометричної моделі.

**Модель крайових умов:** нормативне статичне навантаження на одну вісь транспортного засобу для

дороги категорії Ia групи розрахункового навантаження А1 становить 130 кН (або 65 кН на одне колесо) [2]. Це навантаження вважали рівномірно розподіленим по прямокутній площадці розмірами 268 мм×272 мм, яка моделювала відбиток колеса. При визначенні напружень при згині монолітного цементобетонного покриття розрахункове місце прикладення навантаження до дорожнього покриття – поздовжній зовнішній край у центрі по довжині плити [1]. На рис. 2 місце прикладення навантаження показане червоною плямою.

**Фізична модель:** задача розв’язується у пружній постановці, тому в якості характеристик механічних властивостей використовували модулі пружності I-го роду  $E$  і коефіцієнти Пуассона  $\mu$ . Відповідно до рекомендацій нормативних документів для плити верхнього шару вибрали марку бетону із класом міцності на розтяг при згині  $B_{btb}4.4$ , для якого  $E = 3,53 \cdot 10^4$  МПа,  $\mu = 0,02$ . Для плити основи приймали мінімальний потрібний (розрахунковий) модуль пружності 250 МПа і коефіцієнт Пуассона 0,25. Зазначимо, що для виконання розрахунків використовували розрахункові значення механічних характеристик будівельних матеріалів, тобто такі, за яких цей матеріал буде задовольняти певним умовам міцності всієї конструкції дорожнього одягу.

Для однієї й тієї самої геометричної моделі проводили два варіанти розрахунків – без урахування власної ваги бетонної плити та з її урахуванням. В останньому випадку значення густини бетону приймали рівним 2000 кг/м<sup>3</sup>.

Розглянемо деякі результати розрахунків за першим варіантом.

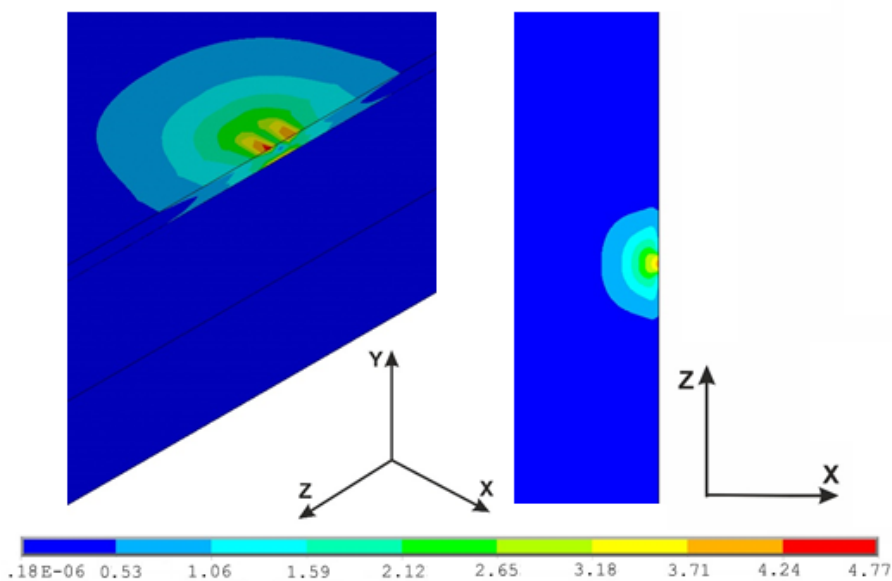


Рис. 3. Розподіл еквівалентних напружень (справа – вигляд знизу)

Оскільки матеріал плити перебуває у складному напруженому стані, для розрахунків на міцність використовуються відповідні теорії міцності. На рис. 3 показані поля еквівалентних напружень за четвертою теорією міцності:

$$\sigma_{eqv} = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)} \leq [\sigma_p].$$

Тут і далі по тексту «вигляд знизу» означає розподіл розрахованих напружень і переміщень на нижній поверхні цементобетонної плити в зоні контактної взаємодії.

Рівень еквівалентних напружень дещо перевищує граничне значення величини міцності цієї

марки бетону на розтяг при згині, що може свідчити про появу невеликих пластичних деформацій. Але в інженерних методиках розрахунку (нормативних) використовують не четверту теорію міцності, а першу – теорію максимальних нормальних напружень. У цьому випадку найбільшими за величиною (в математичному сенсі) є нормальні напруження  $\sigma_z$ , розподіл яких показаний на рис. 4.

Максимальні розтягуючі напруження діють на нижній стороні бетонної плити під площадкою, до якої було прикладено навантаження. Зона дії цих напружень є порівняно невеликою (близько 4–5 м). Проте варто зважити на те, що у цьому розрахунку

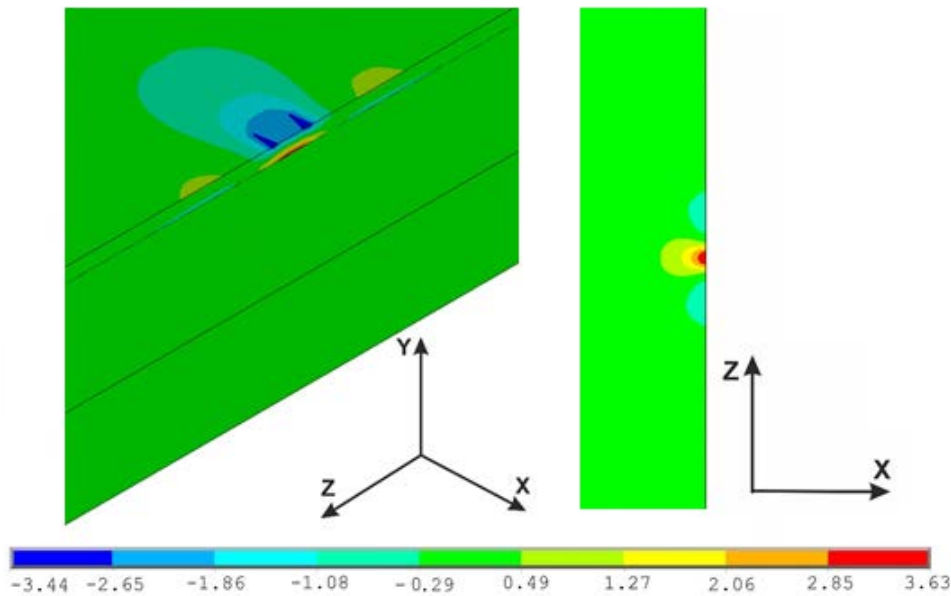


Рис. 4. Розподіл нормальних напружень  $\sigma_z$  (справа – вигляд знизу)

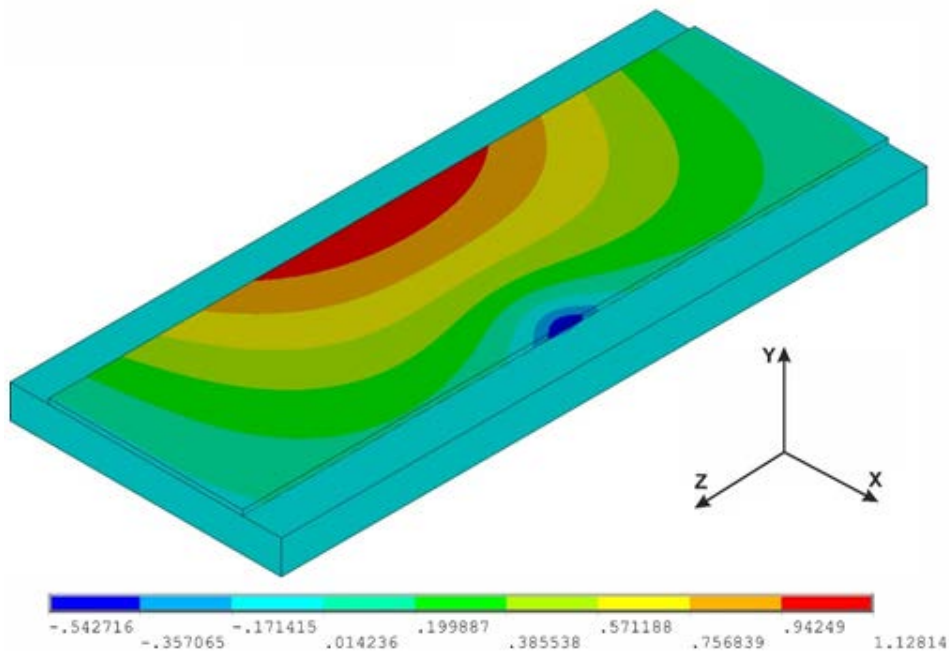


Рис. 5. Еюра вертикальних переміщень  $\Delta_y$

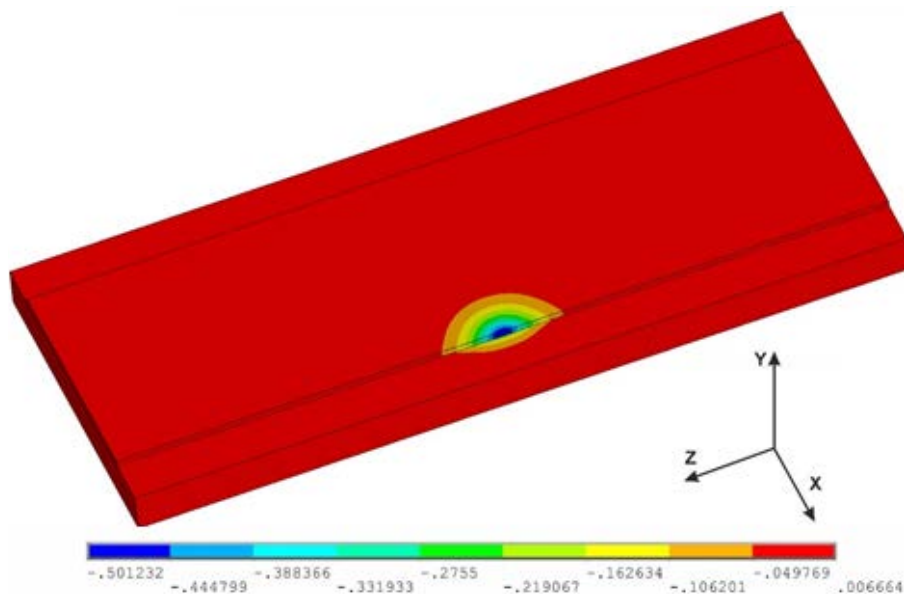


Рис. 6. Епюра вертикальних переміщень  $\Delta_y$  з урахуванням власної ваги цементобетонного покриття

з метою забезпечення нормативним вимогам навантаження прикладали лише на одній площадці. Тому з урахуванням реальних габаритів транспортних засобів характер розподілу характеристик напружено-деформованого стану буде іншим.

Як видно з наведених епюр, міцність бетону у цьому випадку забезпечується, проте коефіцієнт запасу міцності невеликий і дорівнює 1,2.

Нормальні розтягуючі напруження  $\sigma_x$ , що діють у поперечному напрямі конструкції, є втричі меншими за величину. Вони також змінюють свій знак, проте розміри ділянки, де вони діють, порівняно невеликі. Нормальні напруження  $\sigma_y$ , що діють у вертикальному напрямі (по товщині плити), в зоні дії навантаження є стискаючими. Максимальний рівень дотичних напружень не перевищує 1,5 МПа. Отже, на нижній стороні бетонної плити виникає складний напружений стан із двома компонентами розтягуючих нормальних напружень. Якщо врахувати циклічність прикладання навантаження, то така ситуація є доволі небезпечною з точки зору забезпечення довготривалої міцності верхнього покриття, адже умови двовісного розтягу стимулюють накопичення пошкоджень у матеріалі при циклічному навантаженні.

Під час проектування дорожнього одягу також визначають вертикальні прогини кожного шару конструкції. На відміну від розрахункових напружень, їх досить легко порівняти з даними натурних експериментів із вимірювання прогинів на діючих або експериментальних відрізках доріг.

Максимальний прогин бетонної плити спостерігається в зоні прикладання навантаження і не перевищує 0,6 мм (рис. 5). Цей результат добре узгоджується з опублікованими даними інших дослідників

[5]. Проте дещо несподіваним результатом є поява доволі великих (близько 1 мм) переміщень на протилежному боці плити. Знак цих переміщень вказує на те, що протилежний бік плити верхнього покриття відривається від основи і піднімається вгору. Вочевидь, такий ефект пов'язаний із нехтуванням власної ваги конструкції.

Урахування власної ваги верхнього покриття дає цілком реалістичну картину вертикальних переміщень: у зоні прикладання навантаження переміщення приблизно дорівнюють 0,5 мм, а протилежний край бетонної плити не відривається від основи (рис. 6).

Урахування власної ваги бетонної плити майже не вплинуло на рівень еквівалентних (за Мізесом) напружень, вони дещо перевищують допустимі. Навіть незначне збільшення модуля пружності основи дасть позитивний результат щодо зменшення їх рівня. Щодо складників тензору напружень спостерігається незначний перерозподіл їхніх величин.

**Висновки і перспективи використання результатів дослідження.** Розроблена тривимірна скінченно-елементна модель дорожнього одягу жорсткого типу загалом відповідає даним нормативних розрахунків у частині визначення розрахункових напружень і переміщень. Ця модель може бути використана для проведення низки чисельних експериментів, метою яких є:

- оцінювання впливу положення на проїзній частині дороги великогабаритних транспортних засобів на характеристики напружено-деформованого стану (НДС) елементів конструкції дороги;

- оцінювання впливу величини коефіцієнта тертя між бетонною плитою і основою на величини характеристик НДС;

– оцінювання впливу величин характеристик пружності основи на рівні максимальних напружень і вертикальних переміщень верхнього покриття;

– оцінювання впливу розмірів і положення можливих пустот і нерівностей на площинах контакту шарів на величини характеристик НДС.

Наступним етапом розвитку запропонованої розрахункової схеми дорожнього одягу є врахування

нелінійної механічної поведінки складових матеріалів конструкції дороги. Це дасть змогу прогнозувати довговічність покриття з урахуванням циклічності прикладання транспортного навантаження. Ці уточнення будуть внесені в розроблену модель залежно від того, які обчислювальні витрати будуть потрібні для їх урахування з огляду на можливості наявної комп'ютерної техніки.

#### Література

1. ГБН В.2.3-37641918-557:2016. Автомобільні дороги. Дорожній одяг жорсткий. Проектування. Київ, 2016. 71 с.
2. ДБН В.2.3-4:2015. Автомобільні дороги. Частина І. Проектування. Частина ІІ. Будівництво. Київ, 2015. 104 с.
3. ГБН В.2.3-37641918-559:2019. Дорожній одяг нежорсткий. Проектування. Київ: Міністерство інфраструктури України, 2019.
4. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L. The Finite Element Method. Vol. 1–3. Oxford, Auckland, Boston, Johannesburg, Melbourne, New Delhi, 2000. 1482 p.
5. Демьянушко И.В., Носов В.П., Стаин В.М., Стаин А.В. Конечноеlementные модели для расчета плиты жесткого дорожного покрытия. *Транспортное строительство*. 2012. № 4. С. 5–8.