

БУДІВНИЦТВО

УДК 625.731

Арсеньєва Н.О.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

АНАЛІЗ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ АСФАЛЬТОБЕТОННИХ ШАРІВ НЕЖОРСТКОГО ДОРОЖНЬОГО ОДЯГУ ПІД ЧАС МОДЕЛЮВАННЯ ЙОГО КОНСТРУКЦІЇ

Стаття присвячена моделюванню напружено-деформованого стану асфальтобетонних шарів нежорсткого дорожнього одягу. У більшості матеріалів, які застосовують у техніці, пластичні деформації залежать тільки від величин діючих сил і від порядку їх прикладання, але не від тривалості дії і не від швидкості, з якою проводиться навантаження. Асфальтобетон як термопластичний композитний матеріал знаходиться в іншому становищі. В експлуатаційних умовах для асфальтобетонних матеріалів за підвищених температур зв'язок між силами й переміщеннями виявляється суттєво залежним від часу. Тому ставиться завдання щодо визначення внутрішніх сил (напружень), деформацій (переміщень для точок) тіла довільної форми під час його довільного навантаження.

Ключові слова: напружено-деформований стан нежорсткого дорожнього одягу, асфальтобетонні шари, метод кінцевих елементів, головні напруження, еквівалентні напруження.

Постановка проблеми. Згідно з методологією розрахунків асфальтобетонних шарів (покриття) нежорстких дорожніх одягів, основною задачею є визначення міцнісно-експлуатаційних критеріїв, характеристика принципів забезпечення безвідмовної роботи конструкції (надійності) і прийняття розрахункової моделі конструкції. В процесі проектування будь-якого об'єкта (машини, конструкції вузла і такого іншого) одним з основних постає питання про міцність і твердість (жорсткість) як об'єкта в цілому, так і будь-якого його елемента з урахуванням заданих умов навантаження. Відомо, що для оцінки міцності тіла необхідно визначити внутрішні сили (напруження), що виникають у тілі за умови дії на нього зовнішнього навантаження. Оцінюючи внутрішні сили, ми можемо говорити про міцність – здатність тіла сприймати зовнішні навантаження не руйнуючись. Під твердістю тіла розуміємо здатність сприймати зовнішні навантаження, не змінюючи істотно свою первісну форму. Для оцінки твердості тіла необхідно визначити його деформації або переміщення точок. Задачу визначення напружень, деформацій і переміщень для прийнятої моделі тіла можна вирішувати за допомогою методу кінцевих елементів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Методом оцінки ступеня достовірності

отриманих результатів моделювання може бути порівняння з загальноновизначеними, апробованими рішеннями напружено-деформованого стану шаруватих систем і пружного півпростору. Просторова задача розподілу напружень у разі дії зосередженої сили для пружного півпростору була вирішена професором Ж. Буссінеском. Визначення напружень для майданчиків, які паралельно обмежують площини півпростору, було вирішено професором М. Цитовічем і професором В. Кирпичовим. Відзначимо, що величини як стискаючих, так і зсуваючих напружень для майданчиків, які паралельно обмежують площини, не залежать від характеристик півпростору (E , μ). Встановлена закономірність характерна як для простої задачі за умови зосередженої сили, так і для навантаження, рівномірно розподіленого по площі круглого або квадратного штампу [1, 2, 3]. Це положення може бути прийняте як один із критеріїв встановлення достовірності теоретичного вирішення напружено-деформованого стану багатошарової системи (три шари на пружному півпросторі). Теоретичною основою розрахунку нежорстких дорожніх одягів за критеріями міцності є теорія напружено-деформованого стану шаруватого лінійно-деформуемого півпростору [1]. Чисельні значення напруг і деформацій від навантаження,

рівномірно розподіленого по площі кола, були отримані в Науково-дослідному інституті основ і підземних споруд Б.Л. Фаянс [4] для однорідного шаруватого півпростору. Рішення і чисельні розрахунки Б.Л. Фаянс серед фахівців у галузі механіки ґрунтів і напружено-деформованого стану шаруватих пружних систем на пружному півпросторі визнаються коректними, апробованими і достовірними [4]. Оскільки досліджується напружено-деформований стан багатошарового пружного півпростору в процесі осесиметричного навантаження, рівномірно розподіленого по площі кола, то, якщо задати параметри пружності, за яких були зроблені розрахунки Б.Л. Фаянс [4], порівнювати значення напруг і переміщень цілком коректно.

Постановка завдання. Основною метою дослідження є моделювання напружено-деформованого стану асфальтобетонних шарів нежорсткого дорожнього одягу; аналіз покриття з урахуванням термопластичних властивостей матеріалу шару, та визначення небезпечних напружень у конструкції.

Виклад основного матеріалу дослідження. Під час моделювання напружено-деформованого стану асфальтобетонних шарів нежорсткого дорожнього одягу насамперед необхідно визначити елементи конструкції і розрахункове навантаження. Елементом конструкції, відносно якого досліджується напружено-деформований стан, є верхні асфальтобетонні шари нежорсткого дорожнього одягу. Ці шари можуть бути покриттям або покриттям і верхніми шарами основи. У теорії розрахунку нежорстких дорожніх одягів предметом дослідження є багатошаровий півпростір, до якого застосовані рішення теорії пружності. Допускається замінити низку шарів, які підстилають верхні шари дорожнього одягу, на еквівалентний за прогином півпростір, що значно спрощує задачу. Будемо аналізувати чотиришарову модель, в якій три верхні шари монолітні (асфальтобетон), четвертий шар – пружний півпростір. Враховуючи термопластичні властивості асфальтобетону, модуль пружності прийнято як функцію релаксації асфальтобетону за певної температури і часу дії навантаження (статичні і динамічні модулі). За математичний апарат для моделювання напружено-деформованого стану асфальтобетонних шарів покриття під дією вертикального і горизонтального навантажень був вибраний метод кінцевих елементів. Для вибраної розрахункової моделі основними граничними умовами будуть:

$$\begin{aligned} \sigma_z &= P \quad \text{при} \quad z = 0; \quad x = (-r; +r) \\ \tau_{xz(yz)} &= 0 \quad \text{при} \quad z = 0; \quad -r < x < +r; \quad Q_{\text{зоп}} = 0 \\ \tau_{xz(yz)} &\neq 0 \quad \text{при} \quad z = 0; \quad Q_{\text{зоп}} \neq 0 \\ \sigma_z, \sigma_x, \sigma_y, \tau &\rightarrow 0 \quad \text{при} \quad z \rightarrow \infty \\ \sigma_z, \sigma_x, \sigma_y, \tau &\rightarrow 0 \quad \text{при} \quad x \rightarrow \infty \end{aligned} \quad (1)$$

За забезпеченого зчеплення на контакті шарів (А-В, С-Д, Е-Ф) $\tau_{xz(yz)} \neq 0$. За незабезпеченого зчеплення на контакті шарів А-В, або С-Д, або Е-Ф, або вільні контакти на цих контактах дотичні напруження не можуть перебільшувати сили тертя-зчеплення

$$\tau_{xz(yz)} \leq P_z f + C \quad (2)$$

де P_z – вертикальний тиск на глибині z , м;
 f – коефіцієнт тертя;
 C – зчеплення, МПа.

Таким чином, форма розрахункової моделі визначається як шаруватий півпростір зі спаяними або вільними контактами між шарами. Для практичних цілей розміри розрахункової моделі слід обмежити, ґрунтуючись на літературних даних досліджень у цій галузі [5]. Розмір моделі – $2 \times 2 \times 2$ м. Параметри розрахункової моделі вибрані наступним чином: кожен шар з асфальтобетону характеризується товщиною (h_i), модулем пружності (E_i) і коефіцієнтом Пуассона (μ_i). Основа характеризується загальним (еквівалентним) модулем пружності (E_d) і коефіцієнтом Пуассона (μ_d).

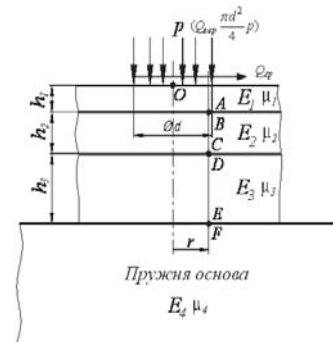


Рис. 1. Розрахункова модель чотиришарової конструкції дорожнього одягу

На поверхні моделі прикладене вертикальне ($Q_{\text{вер}}$) або вертикальне та горизонтальне ($Q_{\text{вер}} + Q_{\text{зоп}}$) навантаження. Розрахунок напружень для моделювання напружено-деформованого стану виконується методом кінцевих елементів та програмного забезпечення. Термопластичні властивості асфальтобетону враховуються через розрахункову температуру шару і термін дії навантаження. Тобто, модуль шару (E) і коефіцієнт Пуассона призначають для конкретної температури

шару і для терміну дії навантаження. Як контрольні використовувалися точки O, A, B, C, D, E, F . Точка O знаходиться на осі симетрії. Навантаження здійснювалося на поверхні першого шару по колу діаметром D см. На бічних поверхнях задавалися умови симетрії. Граничні умови закріплення задавалися на нижній стороні основи. Як такі використовувалися обмеження на переміщення за всіма напрямками. Всього було проаналізовано більше 100 моделей з різними значеннями модулів шарів по глибині і коефіцієнту Пуассона. Цим враховувався фактор зміни температури по глибині шарів, а також різні типи навантаження [6]. У результаті розрахунку отримані значення головних напружень ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$), напружень по Мізесу (σ_M) і еквівалентних напружень σ_{e4} по площинах: O – на поверхні моделі, A – на глибині 2,5 см, B – на глибині 5 см, C – на глибині 7,5 см, D – на глибині 10 см, E – на глибині 12,5 см, F – на глибині 22,5 см; 27,5 см; 32,5 см і 37,5 см. Після аналізу графіків і таблиць, за даними яких вони будуються, стає зрозумілим, що за дії тільки вертикального навантаження епюри ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) симетричні зліва і справа відносно осі на кожній з 7-ми площин ($O - F$). Така ж сама залежність і у ($\tau_{окт}$). Тому під час пошуку небезпечних перетинів достатньо буде проаналізувати перетин на осі і ліву або праву половини, оскільки вони однакові. Епюри розподілу напружень на поверхнях від O до F за дії вертикального навантаження представлені на рис. 2–5.

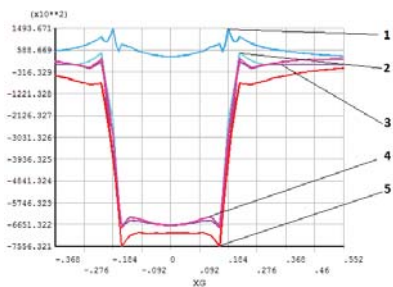


Рис. 2. Графіки розподілу напружень на поверхні O за дії вертикального навантаження. 1 – σ_{e4} – еквівалентне напруження згідно з енергетичною теорією міцності; 2, 3, 5 – $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – головні напруження; 4 – σ_x горизонтальний складник напруженого стану

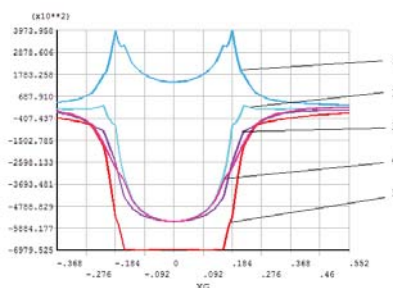


Рис. 3. Графіки розподілу напружень на поверхні A за дії вертикального навантаження

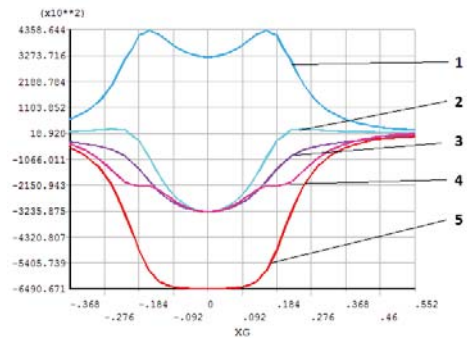


Рис. 4. Графіки розподілу напружень на поверхні C за дії вертикального навантаження

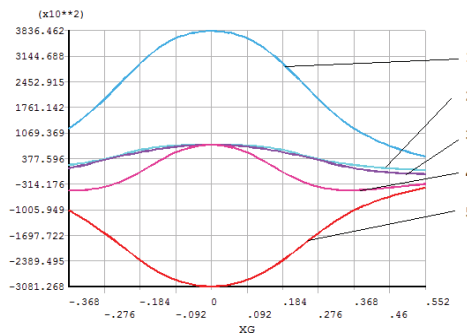


Рис. 5. Графіки розподілу напружень на поверхні F за дії вертикального навантаження

Аналіз напружено-деформованого стану за даними розрахунку показує, що небезпечні перетини максимального головного і максимального октаедричного напружень знаходяться на різній відстані від осі штапу. Небезпечний перетин буде в тому місці, де максимальні еквівалентні напруження за критерієм міцності Писаренка-Лебедева, оскільки вони враховують максимальні головні, максимальні октаедричні напруження і те, що асфальтобетон по-різному працює на розтяг і стиск [7]. Під час розрахунку було розглянуто 3 варіанти, а саме: модуль пружності покриття більше модуля пружності основи, модуль пружності основи більше модуля пружності покриття і варіант, за якого ці величини рівні (190 МПа \approx 200 МПа). Можливо стверджувати, що ці фактори не впливають на місце знаходження небезпечних перетинів, оскільки у всіх випадках виявилось, що на осі штапу виникають максимальні стискаючі, а на відстані 22,08 см від вісі вліво і вправо максимальні напруження, які розтягують. У реальних умовах на асфальтобетонне покриття діє не тільки вертикальне навантаження, але і горизонтальне, яке змінюється залежно від різних умов руху (рух на горизонтальній прямолинійній ділянці, на кривих в плані, на підйом – спуск з максимальним ухилом, рух на підйом – спуск на кривих в плані,

планове (передбачене) гальмування перед зупинками, перехрестями, екстремне гальмування). Тому необхідно проаналізувати місце знаходження небезпечних перетинів за комплексної дії вертикальної і горизонтальної сил. В результаті аналізу напружено-деформованого стану по всім перетинам (O – F), виявилось, що під час появи горизонтальної сили у головного напруження (σ_1) і октаедричного напруження ($\tau_{окт}$) зникла симетрія відносно осі штапу [7]. Тому визначення небезпечного перетину необхідно робити на осі, ліворуч від осі і праворуч (рис.6 – рис.9).

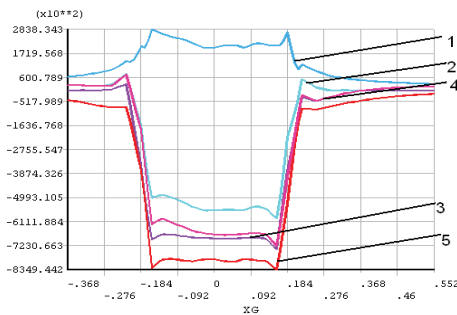


Рис. 6. Графіки розподілу напружень на поверхні O за дії комплексного навантаження. 1 – σ_{e4} – еквівалентне напруження згідно з енергетичною теорією міцності; 2, 3, 5 – $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – головні напруження; 4 – σ_x горизонтальний складник напруженого стану

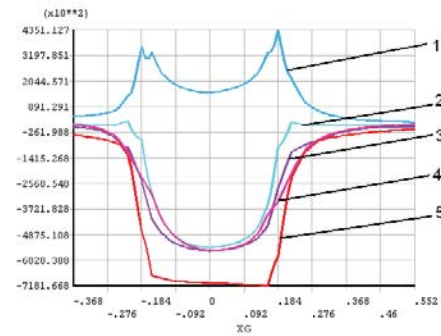


Рис. 7. Графіки розподілу напружень на поверхні A за дії комплексного навантаження

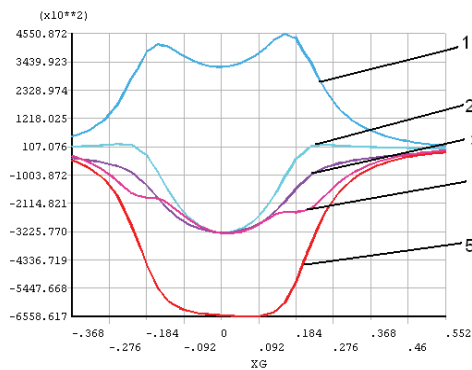


Рис. 8. Графіки розподілу напружень на поверхні C за дії комплексного навантаження

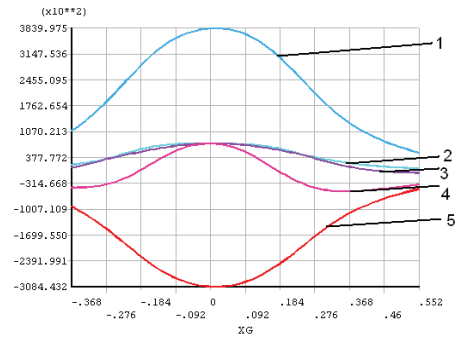


Рис. 9. Графіки розподілу напружень на поверхні F за дії комплексного навантаження

В результаті аналізу розрахунку на моделях під час прикладання горизонтальної сили 5 МПа, 10 МПа, 35 МПа, 40 МПа виявилось наступне: на вісі штапу виникають максимальні стискаючі напруження; на відстані 22,08 см від вісі максимальне напруження перед штапом (колесом) менше, ніж на відстані 22,08 см за штапом. Цей показник незмінний по всій глибині моделі, окрім покриття. На покритті навпаки перед штапом напруження більше ніж за штапом. У зв'язку з тим, що небезпечні перетини визначають за критерієм Писаренка-Лебедева, за результатами моделювання НДС асфальтобетонних шарів різної товщини з різним співвідношенням модуля шару і основи, були проведені спеціальні розрахунки. Визначались величини еквівалентних напружень за Писаренком-Лебедевим за різних $\chi = \frac{R_{роз}}{R_{ос}}$ від 0,08 до 0,15 по всьому перерізу моделей. В результаті можна констатувати наступне:

- найбільшого значення еквівалентні напруження (критерій міцності) набувають або по вісі, або на відстані $0,6 D$ від вісі;
- за дії тільки вертикального навантаження графіки симетричні і не має значення, на якій ділянці навантаження визначати напруження;
- за дії комплексного навантаження (вертикального та горизонтального) небезпечною є ділянка завантаження.

Висновки. На основі аналізу моделювання напружено-деформованого стану асфальтобетонних шарів нежорсткого дорожнього одягу встановлено, що небезпечними можуть бути один з перетинів – по вісі моделі ($x=0$) або на відстані $0,6D$ від вісі на ділянці завантаження ($x = -0,6D$). На підґрунті всього масиву результатів моделювання були побудовані розрахункові таблиці для визначення головних напружень і встановлені розрахункові небезпечні перетини покриття за умови вертикального і комбінованого навантаження конструкції.

Список літератури:

1. Корсунский М.Б. Метод численного определения напряжений и перемещений в многослойном линейно-деформированном полупространстве. Доклады и сообщения на научно-техническом совещании по строительству автомобильных дорог. М.: Из-во Союздорнии, 1963. С. 227–239.
2. Кандауров И.И. Механика зернистых сред и ее применение в строительстве. М.: Стройиздат, 1966. 318 с.
3. Цытович М.А. Механика грунтов. М.: Госстройиздат, 1968. 636 с.
4. Фаянс Б.Л. Построение линий равных напряжений и деформаций в однородном полупространстве от вертикальной равномерно-распределенной нагрузки по кругу. Труды научно-исследовательского института оснований и подземных сооружений. М.: Стройиздат, 1964. Вып. 55. С. 16–26.
5. Иванов Н.И. Конструирование и расчет нежестких дорожных одежд. М.: Транспорт, 1973. 328 с.
6. Ряпухін В.М., Нечитайло Н.О. Моделивання напружено-деформованого стану асфальтобетонних шарів. Містобудування та територіальне планування: наук.-тех збірник. К.: КНУБА, 2011. Вип. 40. Част. 2. С. 258–263.
7. Ряпухін В.М., Нечитайло Н.О., Дорожко Є.В. Визначення найбільш небезпечних перетинів у асфальтобетонних шарах при розрахунках міцності на зсув. Проектування, будівництво і експлуатація нежорстких дорожніх одягів: міжнарод. наук.-техн. конф., яка присвячена 80-річчю ХНАДУ та дор.-буд. факультету, 28-30 жовтня 2010 р.: тези допов. Харків: ХНАДУ, 2010. С. 44–50.

**АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СЛОЕВ НЕЖЕСТКОЙ ДОРОЖНОЙ ОДЕЖДЫ
ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ЕЕ КОНСТРУКЦИИ**

Статья посвящена моделированию напряженно-деформированного состояния асфальтобетонных слоев нежесткой дорожной одежды. Для большей части материалов, которые применяют в технике, пластические деформации зависят только от величин действующих сил и от порядка их прикладывания, но не от длительности действия и не от скорости, с которой прилагается нагрузка. Асфальтобетон, как термопластичный композитный материал находится в другом положении. В эксплуатационных условиях для асфальтобетонных материалов при повышенных температурах связь между силами и перемещениями существенно зависит от времени. Поэтому ставится задание об определении внутренних сил (напряжений), деформаций (перемещений для точек) тела произвольной формы при его произвольной нагрузке.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние нежесткой дорожной одежды, асфальтобетонные слои, метод конечных элементов, главные напряжения, эквивалентные напряжения.

**ANALYSIS OF THE ASPHALT LAYERS STRESS-STRAIN STATE
OF FLEXIBLE PAVEMENT WHEN HER DESIGNS MODELLING**

The article is devoted to modeling the asphalt-concrete layers stress-strain state of flexible pavement. For most of the materials used in the technique, plastic deformations only depend of the acting forces values and of their application order, but not on the duration of the action and not on the speed which the load is applied. Asphalt concrete, as thermoplastic composite material is in a different position. In asphalt-concrete materials operating conditions when temperatures elevated, the relationship between forces and displacements is significantly time-dependent. Therefore, a task is set about determining the internal forces (stresses), deformations (displacements for points) of arbitrary shape body with its arbitrary load.

Key words: stress-strain state of flexible pavement, asphalt concrete layers, method of eventual elements, main stresses, equivalent stresses.