

УДК 625.7/.8

Гайдайчук В.В., д. техн. наук, Заєць Ю.О., канд. техн. наук

ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ПРУЖНОСТІ ДОРОЖНЬОГО ПОКРИТТЯ НА ЙОГО НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНІЙ СТАН ПІД ДІЄЮ ТРАНСПОРТНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Анотація. Досліджується ефект перебудови полів напружень в несучих шарах дорожнього покриття під дією транспортних навантажень. Розглянуто випадок варіації параметрів пружності різних фрагментів шаруватої структури. Побудована скінчено-елементна модель пружної рівноваги масиву, виконаний комп'ютерний аналіз системи. Показано, що найбільш небезпечні для покриття напруження розтягу локалізуються в нижніх зонах другого шару, водночас як максимальні значення напружень зсуву мають місце в першому шарі в околі прикладання вертикальних сил. Обговорюються питання міцності системи.

Ключові слова: шаруватий дорожній одяг, параметри пружності, транспортні навантаження, напружено-деформований стан.

Abstract. The effect of the stress fields redistribution in the carrying layers of the road coating under action of transport loads is investigated. The case of elasticity parameters varying in different fragments of the layer structure is considered. The finite element model of the elastic massif equilibrium is constructed, the computer analysis of the system is performed. It is demonstrated that the most dangerous tensile stresses are localized in the lower zones of the second layer, while the maximal values of the shear stresses take place in the first layer in the vicinity of the external load application. The question of the strength of the system are discussed.

Keywords: layered road wear parameters of elasticity, transport loads, stress-strain state.

Сучасна тенденція збільшення інтенсивності руху транспортних засобів, зростання кількості великовантажних автомобілів із збільшеною кількістю осей, загальною вантажопідйомністю, підвищеним тиском у пневматиках та

невідповідність існуючої мережі автомобільних доріг України таким навантаженням, призвело до розтріскування асфальтобетонного покриття та його передчасного руйнування. У процесі подальшої експлуатації дороги наявність тріщини призводить до несної здатності монолітних шарів, а також і до проникнення через неї вологи в конструкцію дорожнього одягу і ґрунтове полотно. Комп'ютерне моделювання напружено-деформованого стану конструкції дорожнього одягу дозволить оцінити вірогідність утворення тріщин, сприяти їх прогнозуванню та зниженню рівня негативного впливу на міцність і довговічність системи.

Зазначені ефекти давно привертали увагу вчених і фахівців-дорожників, тому явище утворення тріщин стало предметом їхніх багаторічних досліджень. Так, починаючи ще з 50-60-х років минулого століття, тривають як теоретичні, так і експериментальні роботи, спрямовані на вивчення проблем розтріскування асфальтобетонного покриття автомобільних доріг. Тим не менш, саме фізичне явище, при виникненні якого має місце розтріскування дорожнього асфальтобетонного покриття, до сих пір не вивчено повністю. Як зазначено в роботі [5], основними причинами, що викликають утворення тріщин, є низькотемпературний вплив і деформаційні ефекти, спричинені дією статичних і динамічних транспортних навантажень. Чисто механічні погляди на процес виникнення тріщин не дали переконливого пояснення багатьом практично важливим особливостям поведінки конструкції дорожнього одягу під час експлуатації.

Одним із основних питань у проблемі руйнування дорожнього покриття є питання аналізу утворення тріщин на асфальтобетонному покритті під дією транспортних навантажень [1, 2]. Складність цього питання зумовлена тим, що асфальтобетони проявляють властивості в'язкопружних матеріалів, тому аналіз їх деформування повинен здійснюватися з урахуванням досить складних реологічних процесів релаксації та повзучості, а навантаження від транспортних засобів викликають в багатошаровому масиві конструкції дороги тривимірний напружено-деформований стан з суттєвими градієнтами стискаючих, розтягуючих та зсувних напружень. Необхідно також врахувати, що асфальтобетон по-різному чинить опір цим видам напружень і особливо їх комбінації. Так, якщо його міцність при стисненні порівняно велика, то при розтягуванні та зсуві вона є значно меншою і до того ж суттєво залежить від

температури. На рис.1 представлені, отримані експериментально [4], графіки нормальних напружень розриву $\sigma_{міц}$ та зсувних напружень $\tau_{міц}$ асфальтобетону в залежності від температури.

Не менш актуальним є вивчення питання міцності асфальтобетонних шарів під дією дотичних напружень, оскільки в реальних умовах вони досить слабо чинять опір зсуву. Причому здатності чинити опір цим діям сприяють додаткові об'ємні стискаючі напруження в розглянутій зоні і зменшують напруження розтягу.

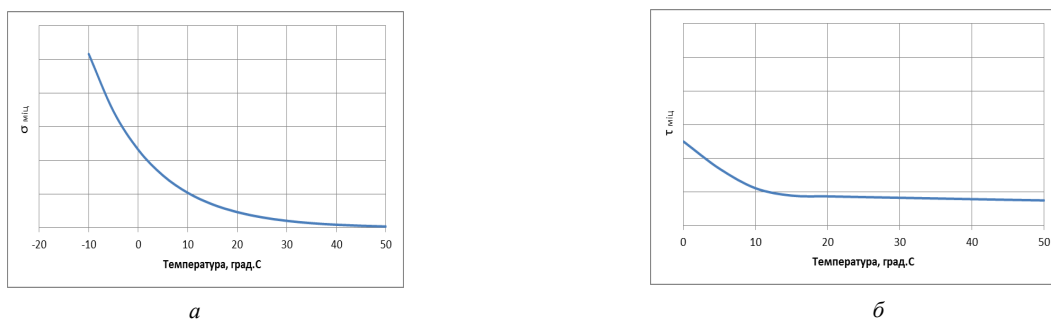


Рисунок 1 – Значення граничних напружень розтягу $\sigma_{міц}$ (а) і зсувних напружень $\tau_{міц}$ (б) для асфальтобетонних матеріалів

З огляду на ці обставини, можна спробувати встановити деякі найбільш загальні особливості і тенденції настання граничних напружено-деформованих станів конструкцій дорожнього одягу, як шаруватих масивів дороги, методами тривимірної теорії пружності, визначаючи зони з найбільшими розтягуючими та зсувними напруженнями і аналізуючи умови, при яких мають місце їхні найбільш несприятливі комбінації.

Сформулюємо задачу про визначення напружено-деформованого стану конструкції дороги під дією транспортних навантажень. Будемо вважати, що відповідно до загальноприйнятої методики [5] і результатів натурних спостережень пляма від контакту колеса з поверхнею дорожнього покриття являє собою прямокутник (рис.2), ширина « e » якого визначається конструкцією колеса і не змінюється зі зміною навантаження на колесо, а висота « f » залежить від цього навантаження так, що рівнодіюча P контактної тиску « p » дорівнює силі, що діє на колесо, тобто

$$P = p \cdot e \cdot f \quad (1)$$

Тут p – тиск в пневматиці.

Прийmemo, що P і p відомі, тоді висота « f » плями визначається рівністю

$$f = P / (p \cdot e). \quad (2)$$

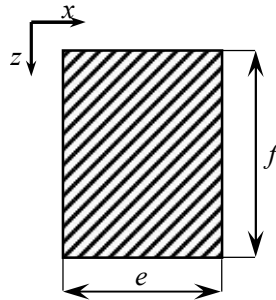


Рисунок 2 – Схема плями контакту між колісним пневматиком і поверхнею покриття

Представлена задача є тривимірною. Для її розв’язання необхідно площинами $x = const$, $y = const$, $z = const$ виділити із загального неоднорідного шаруватого масиву прямокутний паралелепіпед і, задавши відповідні граничні умови на відповідних граничних площинах, розв’язати відповідні рівняння теорії пружності чисельним методом.

При побудові цих рівнянь врахуємо, що швидкості поширення хвиль пружних деформацій в масиві, що розглядається, (складові сотні метрів в секунду) набагато перевищують швидкості руху автомобілів. Тому навантаження від сил тяжіння рухомого транспортного засобу можна вважати квазістатичним і задачу формулювати в статичній постановці.

Вважаємо, що конструкція дороги складається з чотирьох шарів, що лежать на ґрунтовій основі. Надамо їм номери 1-4 в порядку слідування зверху вниз, номер 5 присвоїмо ґрунтовій основі.

Тоді в межах кожного фрагменту 1-5 дороги задовольняються рівняння пружної рівноваги [4]

$$\mu \nabla^2 \vec{u} + (\lambda + \mu) \text{grad div } \vec{u} = 0. \quad (3)$$

Тут λ і μ – параметри Ляме. Вони виражаються через модуль пружності E і коефіцієнт Пуассона за допомогою співвідношень

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)}, \quad \mu = \frac{E}{2(1+\nu)}.$$

На вільних площинах шару 1 і ґрунтовому масиві задані умови рівності нулю нормальних і дотичних напружень

$$\sigma_y = 0, \quad \tau_{yx} = \tau_{yz} = 0. \quad (4)$$

У межах плями контактної взаємодії напруження σ_y дорівнює тиску p в пневматиці, тому

$$\sigma_y = -p. \quad (5)$$

На площинах зчленування суміжних шарів, а також четвертого шару з ґрунтовою основою задавалися умови неперервності переміщень

$$u_{i-1} = u_i, \quad v_{i-1} = v_i, \quad w_{i-1} = w_i \quad (i=2,3,..5). \quad (6)$$



Рисунок 3 – Схема поперечного перерізу конструкції дорожнього покриття

Для розв'язання задачі був використаний метод скінченних елементів. При цьому виділений для розрахунків шаруватий масив розбивався на тривимірні

скінченні елементи (рис.4) і система диференціальних рівнянь замінювалася системою алгебраїчних скінченно-елементних рівнянь

$$[K_u] \{u\} = \{q\}, \quad (7)$$

сформованих з урахуванням граничних рівнянь (4) – (6).

Тут $[K_u]$ – матриця жорсткості для скінченно-елементної моделі всього пружного масиву,

$\{u\}$ – вектор вузлових переміщень,

$\{q\}$ – вектор навантаження.

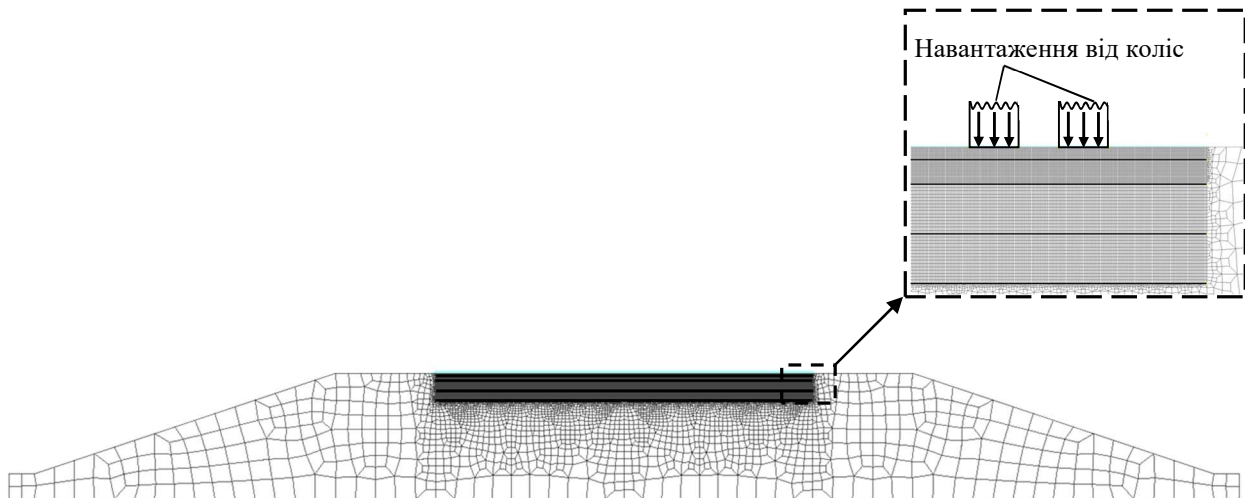


Рисунок 4 – Скінченно-елементна модель перерізу дорожнього масиву з навантаженням

В результаті розв'язання цієї системи обчислювалися деформації у всіх вузлах скінченно-елементної моделі і будувалися поля напружень.

Для порівняльного аналізу обрано дві чотиришарові конструкції дорожнього покриття з габаритними розмірами $L_1=245$ м, $L_2=235$ м, $L_3=115$ м, $L_4=7,5$ м. Матеріали шарів, їх товщини і механічні властивості обрані наступними: для першої моделі шар 1 – асфальтобетон дрібнозернистий, $h=0,05$ м, $E=5 \cdot 10^9$ Па, $\nu=0,2$; шар 2 – асфальтобетон пористий крупнозернистий, $h=0,1$ м, $E=1,4 \cdot 10^9$ Па, $\nu=0,25$; шар 3 – щебінь, $h=0,2$ м, $E=0,4 \cdot 10^9$ Па, $\nu=0,3$; шар 4 – пісок, $h=0,2$ м, $E=0,1 \cdot 10^9$ Па, $\nu=0,3$; ґрунт – $h=2,5$ м, $E=0,1 \cdot 10^9$ Па, $\nu=0,35$; для другої моделі шар 1 – асфальтобетон

дрібнозернистий, $h=0,05$ м, $E=2410^9$ Па, $\nu=0,2$; шар 2 – асфальтобетон пористий крупнозернистий, $h=0,1$ м, $E=7\cdot 10^9$ Па, $\nu=0,25$. Механічні властивості трьох останніх шарів другої моделі співпадають із заявленими характеристиками відповідних шарів першої моделі. Зазначені параметри для першої моделі відповідають температурі дорожнього покриття $T=20^{\circ}\text{C}$ в літній час, а другої моделі - $T=-20^{\circ}\text{C}$ взимку.

Під дією транспортного навантаження в дорожньому масиві сформувались поля напружень. Воно визначене методом скінченних елементів. Результати розрахунків показали, що під дією вибраного навантаження два верхніх асфальтобетонних шари працюють як згинна плита і у другому шарі сформувалась зона додатних напружень (напружень розтягу) σ_x з максимальним значенням $\sigma_x^{\max}=814\text{кПа}$ (рис. 5а).

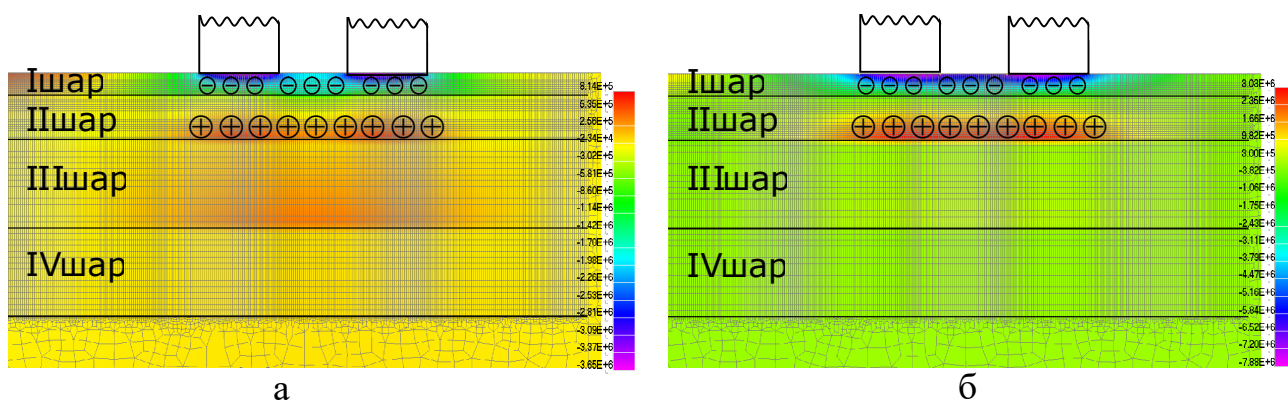


Рисунок 5 – Розподіл функцій напружень σ_x при $T=20^{\circ}\text{C}$ (а) та $T=-20^{\circ}\text{C}$ (б)

Потім було прийнято, що внаслідок сезонних змін температури T в зимовий час в двох верхніх шарах відбулися термо-реологічні зміни і їх модулі пружності досягли значень $E_1=24\cdot 10^9$ Па і $E_2=7\cdot 10^9$ Па при $T=-20^{\circ}\text{C}$, в той час як в щебеновому, піщаному і ґрунтовому фрагментах вони залишилися без зміни. Розрахунки, виконані зі збереженням вихідних умов для всіх інших параметрів моделі, показали, що при цьому напруження розтягу збереглися в тих же зонах, але досягли значень $\sigma_x^{\max}=3027\text{кПа}$. Проведений аналіз дозволяє

обґрунтувати ще один парадоксальний механізм більш інтенсивного руйнування асфальтобетонних покриттів в зимовий час, при збільшенні модуля пружності матеріалів верхніх шарів.

Звернемося тепер до поля розподілу дотичних напружень τ_{xy} , що діють на площадках $x = cont$ в напрямку осі Oy , (рис. 6). Зони їх максимальних величин виділені в прямокутники і їх числові значення подані праворуч на кольоровій шкалі. Кожен колірний відтінок цієї палітри відповідає певному значенню даної величині.

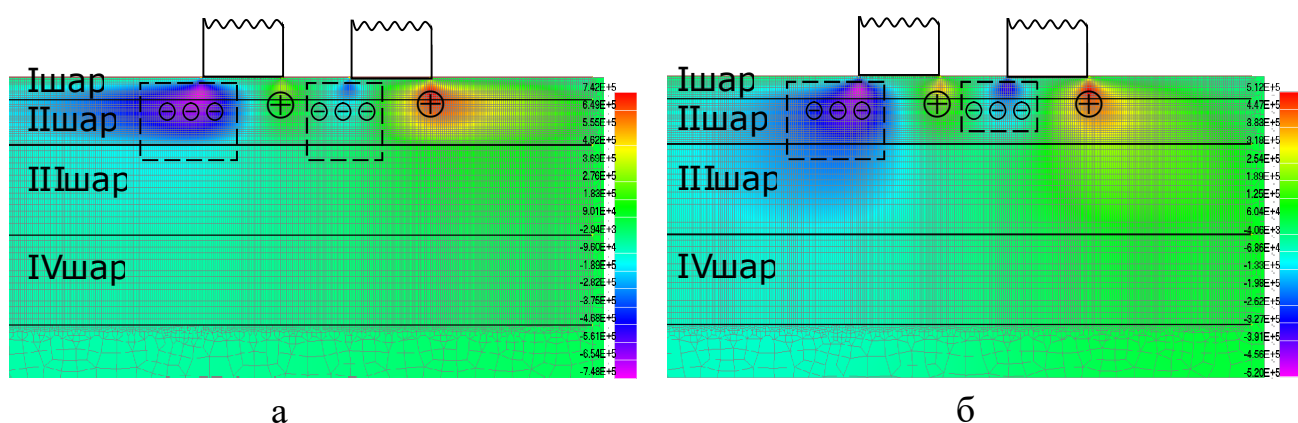


Рисунок 6 - Розподіл функцій напружень τ_{xy} при $T=20^{\circ}C$ (а) та $T=-20^{\circ}C$ (б)

Співставляючи результати обчислень на рис. 6а і рис. 6б, випишемо максимальні значення цих величин: $\tau_x^{\max} = 742 \text{ кПа}$ для першої моделі і, $\tau_x^{\max} = 512 \text{ кПа}$ - для другої. Необхідно підкреслити, що максимальні значення зсувних напружень τ_{xy}^{\max} реалізуються в зонах, де нормальні напруження σ_x , є стискаючими, тому в ній елементи покриття можуть чинити опір зсувним навантаженням.

Отримані числові результати, які свідчать про те, що зі збільшенням модуля пружності несущих шарів дорожнього покриття, що лежать на ґрунтовій основі, згинні нормальні напруження в них збільшуються, на перший погляд, здаються суперечливими. Однак цей ефект може бути обґрунтований з використанням аналітичного розв'язку задачі про напружено-деформований стан балки на пружній основі під дією поперечної зосередженої сили. Дійсно,

згідно з цим розв'язком, згинний момент цієї балки досягає максимального значення під цією силою і складає [3]

$$M = P \sqrt[4]{4EI/k} / 4. \quad (8)$$

Тут M - згинний момент в балці; P - діюча зосереджена сила; E - модуль пружності балки; I - момент інерції перерізу балки; k - Коефіцієнт Пастеля.

З рівності (8) маємо, що зі збільшенням модуля пружності E момент M в балці (а разом з ним і згинні напруження) збільшується. Хоча при цьому, однак, на всіх інших ділянках балки відбувається перерозподіл значень моменту M і вони зменшуються. Оскільки в нашому випадку досліджувана конструкція дорожнього покриття на ґрунтовій основі, в конструктивному сенсі, аналогічна балці на пружній основі, то виявлений нами ефект збільшення згинних напружень у верхніх шарах покриття під дією локалізованого навантаження можна вважати обґрунтованим.

Перелік посилань

1. Гайдайчук В.В. Чисельне моделювання термонапруженого стану шаруватого покриття автомобільної дороги / В.В. Гайдайчук, В.В. Мозговий, Ю.О. Заєць, Л.В. Шевчук // Опір матеріалів і теорія споруд. – 2017. – Вип. 98 – С. 56-71.
2. Гуляєв В.І. Дослідження термонапруженого стану конструкцій дорожнього одягу / В.І. Гуляєв, В.В. Гайдайчук, В.В. Мозговий, Ю.О. Заєць, Л.В. Шевчук // Промислове будівництво та інженерні споруди. – 2017. – №1. – С. 6-12.
3. Писаренко Г.С. Сопротивление материалов. – К. Вища школа. Головное издательство. 1986. – 775 с.
4. Страгис В. И. Зависимость параметров сдвига асфальтобетона от температуры / В.И. Страгис, С.Ю. Рокас // Санитарная техника. Дороги. Гидротехническое строительство. Инженерная геодезия. Основания и фундаменты. Материалы Республиканской XIX научно-технической конференции. – Каунас. – 1969. – С. 51-54.
5. Litton R.L., Tsai F.L., Lee S.I., Luo R., Hu S., Zhou F. «Models for Predicting Reflection Cracking of Hot-Mix Asphalt Overlays» Research Report 669, Texas Transportation Institute, Texas A&M University, College Station, Texas, 2010. P.61.