

УДК 539.3

Шевчук Л.В., канд. техн. наук, **Ващіліна О.В.**, канд. фіз.-мат. наук,
Баран С.А.

ВПЛИВ РОЗШАРУВАННЯ КОНСТРУКЦІЇ ДОРОЖНОГО ПОКРИТТЯ НА ЙОГО НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНІЙ СТАН

Анотація. Поставлена задача про визначення впливу розшарування конструкції неоднорідного дорожнього покриття на розподіл в ньому полів напружень і деформацій під дією транспортних навантажень. Побудована скінченно-елементна модель пружної деформації масиву, виконаний комп'ютерний аналіз системи. Показано, що в конструкції без розшарування найнебезпечніші для покриття напруження розтягу локалізуються у нижніх зонах другого шару, в той час як максимальні значення напружень зсуву мають місце в першому шарі в околі прикладання вертикальних сил. При розшаруванні конструкції напруження розтягу зміщуються до нижніх волокон першого шару і набувають великих значень.

Ключові слова: автомобільна дорога, асфальтобетонне покриття, розшарування, пляма навантаження, поле напружень.

Аннотация. Поставлена задача об определении влияния расслоения конструкции неоднородного дорожного покрытия на распределение в нем полей напряжений и деформаций под действием транспортных нагрузок. Построена конечно-элементная модель упругого равновесия массива, выполнен компьютерный анализ системы. Показано, что в конструкции без расслоения наиболее опасные для покрытия напряжения растяжения локализируются в нижних зонах второго слоя, в то время как максимальные значения напряжений сдвига имеют место в первом слое в окрестности приложения вертикальных сил. При расслоении конструкции напряжения растяжения смещаются к нижним волокнам первого слоя и приобретают большие значения.

Ключевые слова: автомобильная дорога, асфальтобетонное покрытие, расслоение, пятно нагрузки, поле напряжений.

Abstract. The problem on analysis of stress-strain states of a layered road massif with delaminated zones under action of transport loads is formulated. The finite element

model of the elastic massif equilibrium is constructed, the computer analysis of the system is performed. It is demonstrated that in the initial structure 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 structure delamination leads to enlargement of tensile stresses which are the most dangerous for the asphalt material.

Keywords: automobile road, asphalt-concrete coating, delamination, transport loads.

Вступ

Розшарування асфальтобетонного покриття автомобільних доріг, викликане низькими температурами і дією транспортних навантажень, є однією з основних причин їх передчасного руйнування. У процесі експлуатації дороги наявність розшарування призводить до несної здатності монолітних шарів, а також і до проникнення через неї вологи в конструкцію дорожнього одягу і ґрунтове полотно. Моделювання напружено-деформованого стану дозволить оцінити вірогідність утворення розшарування, 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 розшарування асфальтобетонного покриття автомобільних доріг. Тим не менш, саме фізичне явище, при виникненні якого має місце розшарування дорожнього асфальтобетонного покриття, до сих пір не вивчено повністю. Як зазначено в роботі [1], 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.

Відповіді на деякі з цих питань подані в роботах [1, 2].

Суттєво складним є також питання аналізу утворення розшарування на асфальтобетонному покритті під дією транспортних навантажень. Ця складність 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 багат шаровому 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.

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.

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.

Постановка задачі

Проаналізуємо вплив розшарування конструкції одягу на характер перерозподілу в ній полів напружень. Дослідимо характер розподілу зон розтягуючих і зсувних напружень під колесами великовантажного автомобіля (рис.1) з метою аналізу впливу накладення полів напружень в залежності від міжосьових відстаней «*a*» і «*b*» і відстаней між колесами «*c*» і «*d*». Будемо вважати, що відповідно до загальноприйнятої методики [1] і результатів натурних спостережень пляма від контакту колеса з поверхнею дорожнього покриття (рис.2) являє собою прямокутник, ширина «*e*» якого визначається конструкцією колеса і не змінюється зі зміною навантаження на колесо, а висота «*f*» залежить від цього навантаження.

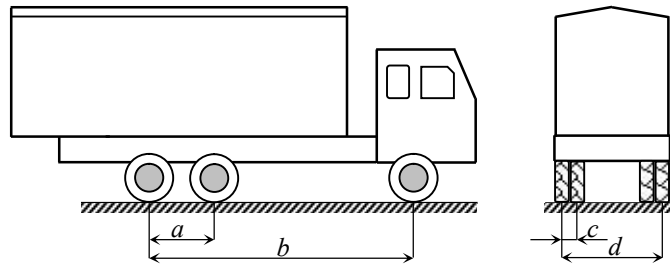


Рисунок 1 – Геометрична схема розташування коліс трьохвісного автомобіля

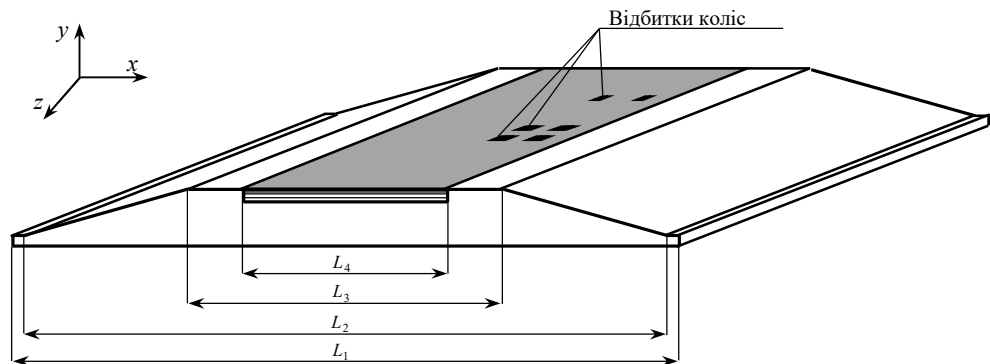


Рисунок 2 – Конструктивна схема дорожнього масиву

Дослідження напружено-деформованого стану системи проводиться на основі рівнянь теорії пружності методом скінченних елементів. Об'ємними силами будемо нехтувати. В цьому випадку рівняння рівноваги елемента описується рівняннями [3-6]

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} &= 0, \\ \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} &= 0, \\ \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} &= 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Тут σ_x , σ_y , σ_z – відповідні нормальні напруження, τ_{xy} , τ_{yz} , τ_{zx} – дотичні напруження.

Вони обчислюються за допомогою рівностей

$$\begin{aligned} \sigma_i &= \lambda \Delta + 2G \varepsilon_i, \\ \tau_{ij} &= \tau_{ji} = G \gamma_{ij} = G \gamma_{ji}, \end{aligned} \quad (2)$$

де λ і G – сталі Ламе, які виражаються через модуль пружності E і коефіцієнт Пуассона ν формулами

$$\lambda = \frac{\mu E}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)},$$
$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)}.$$
(3)

Використовувані в рівностях (2) символи

$$\Delta = \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z},$$
$$\gamma_{ij} = \frac{\partial u_j}{\partial i} + \frac{\partial u_i}{\partial j},$$
$$\varepsilon_i = \frac{\partial u_j}{\partial i}.$$
(4)

де $i, j = x, y, z$.

Після скінченно-елементної дискретизації система (1) – (4) зводиться до скінченно-елементної системи лінійних алгебраїчних рівнянь [3, 4]

$$[K_u]\{u\} = \{q\}.$$
(5)

Тут $[K_u]$ – матриця жорсткості для скінченно-елементної моделі (рис.3) всього пружного масиву, $\{u\}$ – вектор вузлових переміщень, $\{q\}$ – вектор навантаження.

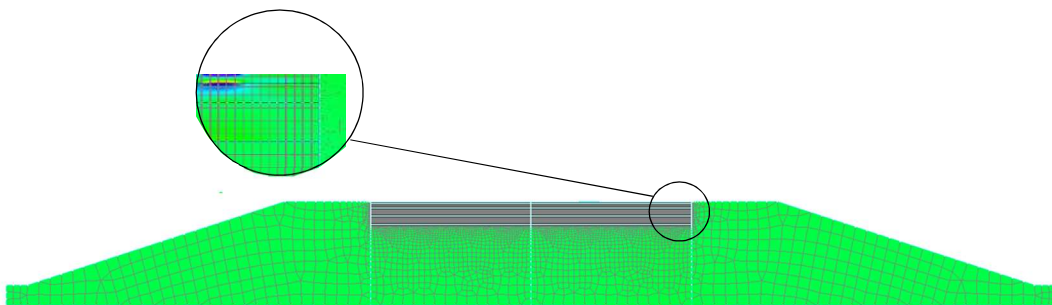


Рисунок 3 – Скінченно-елементна модель перерізу дорожнього масиву

В результаті її розв’язання підраховуються значення переміщень, деформацій і напружень у відповідних вузлах і елементах скінченно-елементної решітки.

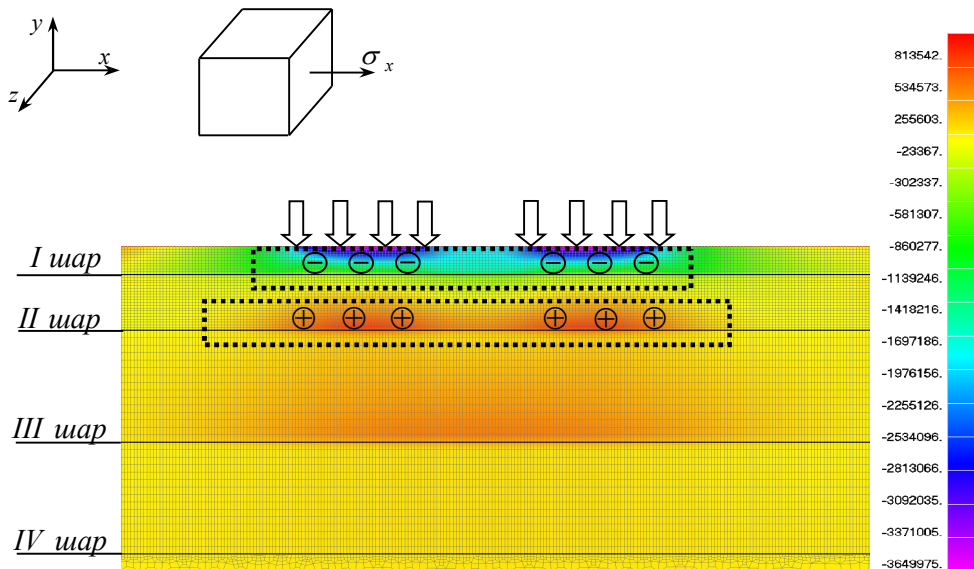


Рисунок 4 – Поле напружень σ_x у перерізі дорожнього покриття

На початку розглядається випадок коли між першим і другим шаром має місце повне зчеплення на всій площині їх контакту. На рис.4 представлено поле напружень σ_x , орієнтація яких показана на кубіку в лівому верхньому куті. Обчислення свідчать, що найбільші напруження σ_x мають місце в верхніх волокнах першого шару і вони являються стискаючими (від'ємними). Зони цих напружень виділені прямокутним контуром. В ньому $\sigma_{x,\max} = -3649$ кПа. При цьому в нижніх волокнах другого шару досягаються максимальні розтягуючі напруження, які однак, по модулю суттєво менші за стискаючі і дорівнюють $\sigma_{x,\max} = 813$ кПа.

Розшарування конструкції між першим і другим шарами приводить до суттєвої перебудови полів напружень σ_x . Було прийнято, що ширина зони розшарування складає 2,9 м і знаходиться під плямами контакту коліс з дорогою. На рис.5 ширина ділянки розшарування відповідає ширині представленого фрагменту. В цьому випадку напруження стиску в верхніх волокнах першого шару дещо зменшилися і дорівнюють $\sigma_{x,\max} = -238$ кПа. Однак при цьому суттєво зросли напруження розтягу, які перемістилися від нижніх волокон другого шару до нижніх волокон першого шару і стали рівними $\sigma_{x,\max} = 2125$ кПа. На рис. 5 ці зони виділені відповідними прямокутниками. Відзначимо, що другий випадок є більш небезпечним, оскільки тут зросли напруження розтягу, які пов'язані з меншою міцністю асфальтобетону.

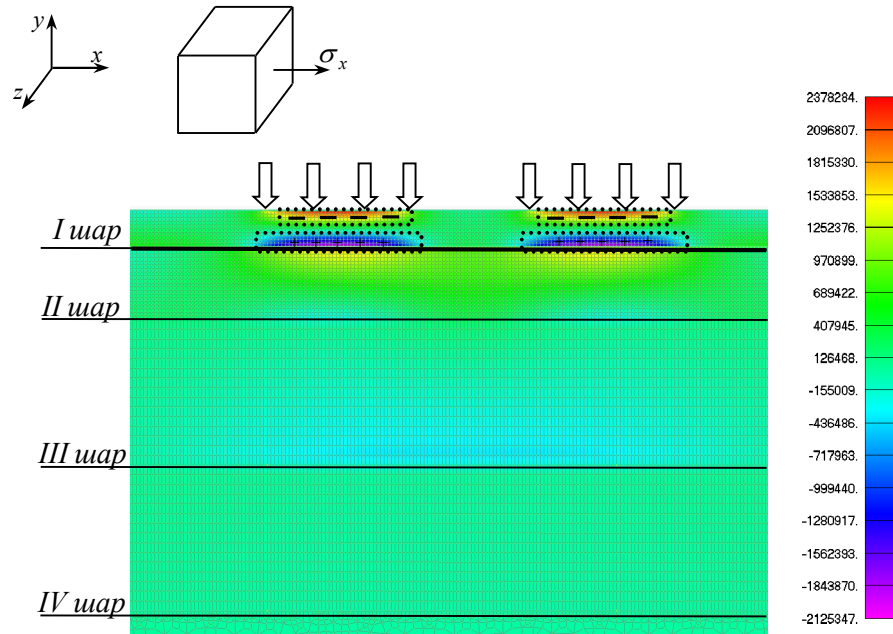


Рисунок 5 – Поле напружень σ_x у перерізі дорожнього покриття з розшаруванням

На рис.6 і 7 показані поля дотичних напружень τ_{xy} , які відповідають відповідним випадкам. Можна бачити, що в площині контакту першого і другого шарів конструкції з розшаруванням ці напруження рівні нулю. Проте в інших зонах ці напруження зросли. Наприклад в першому випадку (рис.6) $\tau_{xy, \max} = 511$ кПа, в другому (рис.7) $\tau_{xy, \max} = 625$ кПа.

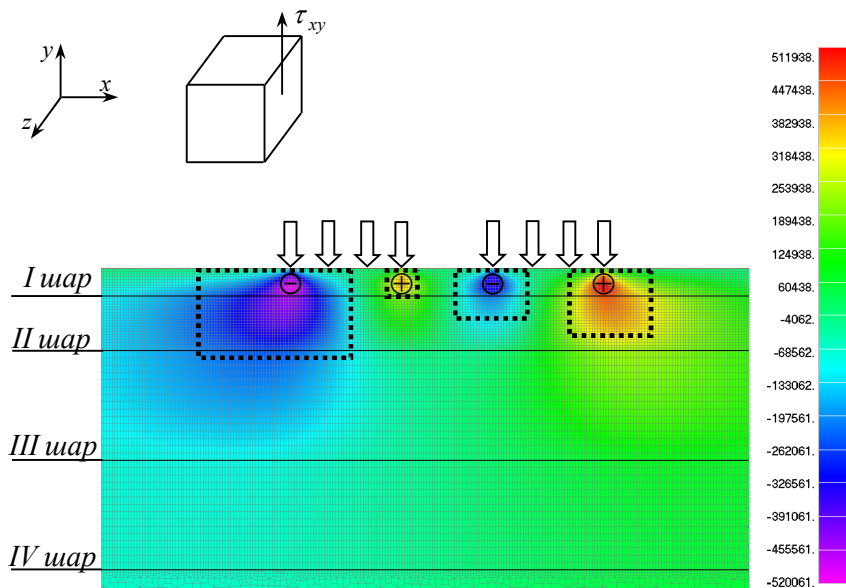


Рисунок 6 – Поле розподілу дотичних напружень τ_{xy}

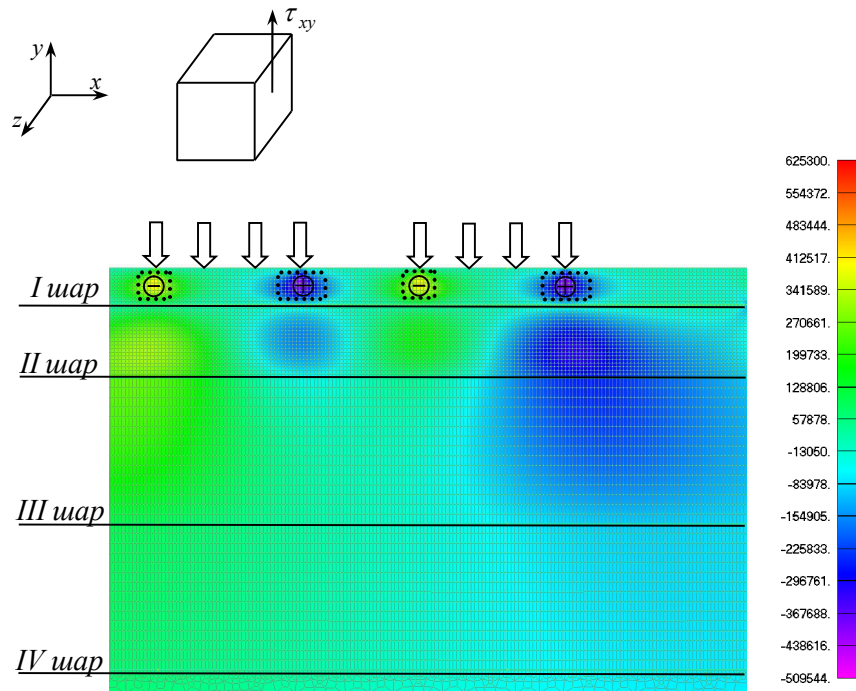


Рисунок 7 – Поле розподілу дотичних напружень τ_{xy} в покритті з розшаруванням

Наприкінці зазначимо, що як впливає з результатів розрахунку розшарування дорожнього покриття між першим і другим шаром приводить до помітного збільшення як дотичних, так і нормальних розтягуючих напружень, що є найбільш небезпечним для асфальтобетонних матеріалів.

Перелік посилань

1. Radovsky B. Ways to reduce low-temperature cracking of asphalt pavements / B. Radovsky, V. Mozgovoj // 4-th Eurobitum Symposium. Summaries and papers. Madrid, 4-9 Oct. 1989. Vol. 1. – P. 571-575.
2. Мозговой В.В. Повышение гидроизоляционной способности асфальтобетонного покрытия / В.В. Мозговой // Проблемы механики и строительства транспортных сооружений: Труды II Международной научно-практической конференции. - Алматы. – 2015. – С. 54-60.
3. Гуляев В.І. Дослідження термонапруженого стану конструкцій дорожнього одягу / В.І. Гуляев, В.В. Гайдайчук, В.В. Мозговий, Ю.О. Заєць, Л.В. Шевчук // Промислове будівництво та інженерні споруди. – 2017. – №1. – С. 6-12.

4. 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.

5. Гуляєв В.І. Деякі закономірності термопружного деформування асфальтобетонного покриття дороги/ В.І. Гуляєв, В.В. Мозговий, В.В. Гайдайчук, Ю.О. Заєць, Л.В. Шевчук// Вісник НТУ. – 2017. Вип.37. С. 80-92.

6. Мозговий В.В. Аналіз термопружних процесів в асфальтобетонних шарах автомобільних доріг / В.В. Мозговий, В.В. Гайдайчук, Ю.О. Заєць, Л.В. Шевчук, С.А. Баран, О.М. Куцман, В.М. Бондар // Вісник Одеської державної академії будівництва і архітектури. – 2017. – Вип. 67. – С. 96-103.