

ТРАНСПОРТНІ СПОРУДИ

УДК 625.8

Гуляєв В.І., докт. техн. наук, **Гайдайчук В.В.**, докт. техн. наук,
Мозговий В.В., докт. техн. наук, **Заєць Ю.О.**, канд. техн. наук,
Шевчук Л.В., канд. техн. наук, **Куцман О.М.**, **Баран С.А.**

МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ КОНСТРУКЦІЇ ДОРОЖНЬОГО ОДЯГУ ПІД ДІЄЮ ТРАНСПОРТНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

Анотація. Поставлена задача про визначення напружено-деформованого стану шаруватого напівпростору під дією транспортних навантажень. Побудована скінченно-елементна модель пружної деформації масиву, виконаний комп'ютерний аналіз системи. Показано, що найнебезпечніші для покриття напруження розтягу локалізуються у нижній зоні шарів із монолітних матеріалів.
Ключові слова: автомобільна дорога, асфальтобетонне покриття, транспортні навантаження, поле напружень, напружено-деформований стан.

UDC 625.8

Huliaev V., Dr.Tech.Sci., **Haidaichuk V.**, Dr.Tech.Sci.,
Mozhovyi V., Dr.Tech.Sci., **Zaiets Yu.**, Cand. Eng. Sci. (Ph.D.),
Shevchuk L., Cand. Eng. Sci. (Ph.D.), **Kutsman O.**, **Baran S.**

SIMULATION OF STRESS-STRAIN STATES OF ROAD STRUCTURES UNDER ACTION OF TRANSPORT LOADS

Abstract. The problem on analysis of stress-strain states of a layered road massif 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 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 crack generation and layer destruction are discussed.

Keywords: automobile road, asphalt-concrete coating, transport loads, stress fields, stress-strain state.

УДК 625.8

Гуляев В.И., докт. техн. наук, **Гайдайчук В.В.,** докт. техн. наук,

Мозговой В.В., докт. техн. наук, **Заец Ю.А.,** канд. техн. наук,

Шевчук Л.В., канд. техн. наук, **Куцман А.М., Баран С.А.**

Аннотация. Поставленная задача об определении напряженно-деформированного состояния слоистого полупространства под действием транспортных нагрузок. Построена конечно-элементная модель упругой деформации массива, выполненный компьютерный анализ системы. Показано, что самые опасные для покрытия растягивающие напряжения локализуются в нижней зоне слоев с монолитных материалов.

Ключевые слова: автомобильная дорога асфальтобетонное покрытие, транспортные нагрузки, поле напряжений, напряженно-деформированное состояние.

Вступ

Розтріскування асфальтобетонного покриття автомобільних доріг, викликане низькими температурами і дією транспортних навантажень, є однією з основних причин їх передчасного руйнування. У процесі експлуатації дороги наявність тріщини призводить до несної здатності монолітних шарів, а також і до проникнення через неї вологи в конструкцію дорожнього одягу і ґрунтового полотна. Моделювання напружено-деформованого стану 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 [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.

Наприклад, в умовах впливу низьких температур виникають наступні питання:

1. Чому на початковому етапі формування низькотемпературні тріщини орієнтовані, як правило, в поперечному напрямку дороги?

2. Чому кількість низькотемпературних тріщин на розглядуваному покритті збільшується з року в рік?

3. Чим можна пояснити приблизно рівні відстані між ними?

4. Як пов'язані їхні кількісні характеристики з показниками погодно-кліматичних умов місцевості?

5. Чи можна знайти такий матеріал для дорожнього покриття, при використанні якого не з'являються низькотемпературні тріщини або їхня кількість буде істотно меншою в порівнянні з традиційними видами асфальтобетону?

6. Які конструктивні і технологічні заходи можна вжити, щоб повністю або частково запобігти появі низькотемпературних тріщин? та ін.?

Відповіді на деякі з цих питань подані в роботах [2, 3].

Не менш складним є також питання аналізу утворення тріщин 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 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.

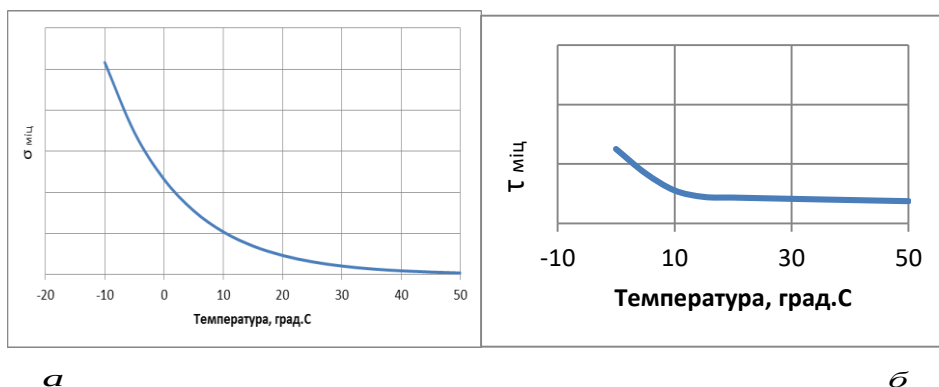


Рисунок 1 - Значення граничних напружень розтягу $\sigma_{міц}$ (а) і зсувних напружень $\tau_{міц}$ (б) для асфальтобетонних матеріалів

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.

Постановка задачі. Сформулюємо задачу про визначення напружено-деформованого стану конструкції дороги під дією транспортних навантажень. Дослідимо характер розподілу зон розтягуючих і зсувних напружень під колесами великовантажного автомобіля (рис.2) з метою аналізу впливу накладення полів напружень в залежності від міжосьових відстаней «а» і «b» і відстаней між колесами «с» і «d». Будемо вважати, що відповідно до загальноприйнятої методики [1] і результатів натурних спостережень пляма від контакту колеса з поверхнею дорожнього покриття (рис.3) являє собою прямокутник (рис.4), 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 контактного тиску « p » дорівнює силі, що діє на колесо, тобто

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

де p – тиск в пневматиці.

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

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

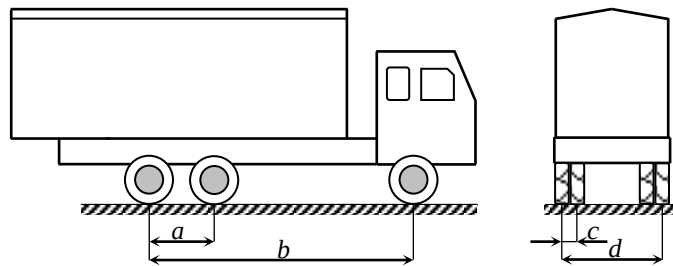


Рисунок 2 – Геометрична схема розташування коліс трьохвісного автомобіля

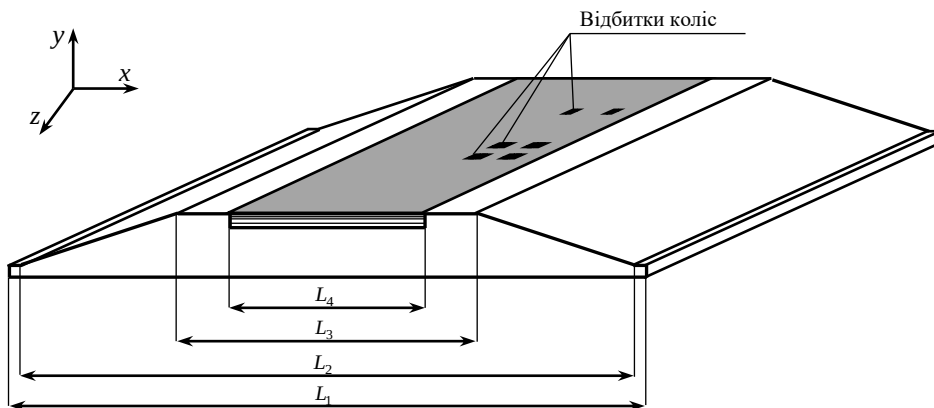


Рисунок 3 – Конструктивна схема дорожньої конструкції

Представлена задача є тривимірною. Для її розв'язання необхідно площинами $x = \text{const}$, $y = \text{const}$, $z = \text{const}$ 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 (рис.3). 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

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

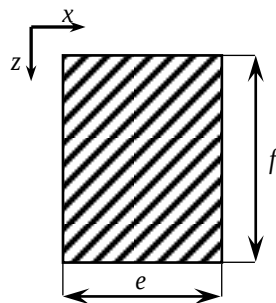


Рисунок 4 – Схема прямого контакту між колісним пневматиком і поверхнею покриття

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 прямого 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

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

Для розв'язання задачі був використаний метод скінченних елементів. При цьому виділений для розрахунків шаруватий масив розбивався на тривимірні скінченні елементи (рис.5) 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.

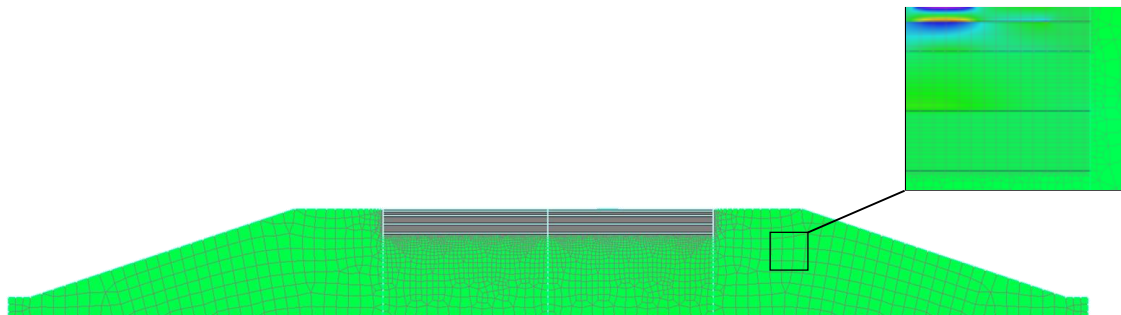


Рисунок 5 – Скінченно-елементна модель перерізу дорожнього масиву

В результаті розв'язання цієї системи обчислювалися деформації у всіх вузлах скінченно-елементної моделі і будувалися поля напружень. Обробка результатів обчислень проводилася із застосуванням спеціально розробленого постпроцесора, що дозволяє кожному знайденому значенню шуканої функції ставити у відповідність кольоровий мазок на виділеному полі і за допомогою кольорової шкали ідентифікувати їх величини.

Результати чисельного аналізу. Для аналізу обрано чотиришарова конструкція дорожнього покриття з габаритними розмірами $L_1 = 24,5$ м, $L_2 = 23,5$ м, $L_3 = 11,5$ м, $L_4 = 7,5$ м. Матеріали шарів, їх товщини і механічні властивості обрані наступними: 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 розрахунку виділений масив дороги довжиною $l = 1,8$ м. Скінченно-елементна схема перетину конструкції дороги представлена на рис. 5. Загальна кількість скінченних елементів для неї склало 331104, число вузлів – 236475, число шуканих невідомих – 687633.

В роботі [1] методами експериментального і комп'ютерного моделювання встановлено, що взаємний вплив полів напружень від коліс, які закріплені на двох найближчих сусідніх осях автомобіля (рис. 2), не перевищує 10%. Тому на початковому етапі вважалося, що на верхній шар діє вертикальне навантаження

від одного колеса, яке розташоване на одній осі, і дія навантажень від інших коліс не враховувалась. У зв'язку з тим, що задача розв'язувалася в тривимірній постановці, а шари покриття мають малу товщину, верхній шар був апроксимований всього лише двома елементами по вертикалі.

З урахуванням того, що розглянута система має симетрію відносно площини $z=0$, яка проходить через осьову лінію коліс, для розрахунку виділений масив дороги, обмежений площинами $z=0$ і $z=1,8$ м. У математичній моделі на цих площинах задавалися граничні умови симетрії.

На рис. 6 у кольоровому зображенні показано поля розподілу вертикальних переміщень в перерізі дорожнього масиву. Справа подана шкала значень кольорової палітри, яка відповідає значенням переміщень $u_z(x, y)$. Як видно, максимальне переміщення склало $3 \cdot 10^{-4}$ м. При цьому максимальні значення функцій напружень локалізуються у прилеглій до колеса зоні. В зв'язку з цим, тут доречно звернути увагу на висновки, які зроблені американськими вченими в роботі [1]. Вони відзначили, що оскільки, конструкція дороги складається з тонких шарів покриття, доводиться їх апроксимувати скінченними малих розмірів і для досягнення необхідної точності приходиться будувати скінченно-елементні моделі з великим числом ступенів вільності. В результаті розв'язання, сформульованих таким чином систем рівнянь, вимагає великого обсягу розрахункового часу на сучасних швидкодіючих комп'ютерах. Тому для якісного аналізу полів напружень у фрагментах конструкції і встановлення найбільш загальних закономірностей їх розподілу в роботі [1] запропоновано розв'язати двовимірну задачу в площині Oxy , яка проходить через вісь автомобіля перпендикулярно напрямку Oz дороги.

У нашому випадку відстань між серединними площинами коліс $c=0,365$ м, центр крайнього колеса віддалений від краю покриття дороги на величину $0,5$ м, ширина контактної плями $e=0,2$ м, інтенсивність рівномірно розподіленого тиску колеса на поверхню дороги дорівнює тиску в пневматиці $p=0,8$ МПа.

Завдяки моделюванню задачі в двовимірній постановці, вдалося істотно згустити скінченно-елементну сітку в площині XoY і апроксимувати верхній шар десятьма рядами скінченних елементів у висоту. При такій апроксимації число скінченних елементів у всій моделі виявилось рівним 195028, число вузлів – 294777, число шуканих переміщень – 687600.

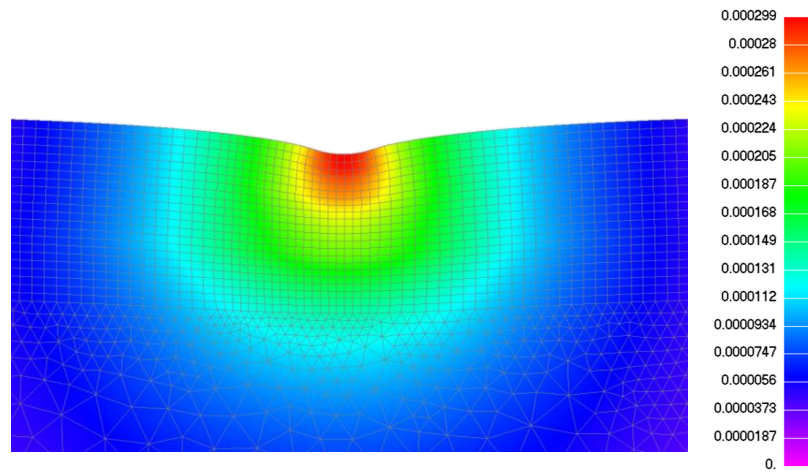


Рисунок 6 – Поле переміщень в шаруватому масиві під дією навантаження від одного колеса

На рис. 7 показано перетин конструкції дороги під колесами в деформованому стані. Максимальне переміщення u_y під колесами склало $3,23 \cdot 10^{-3}$ м.

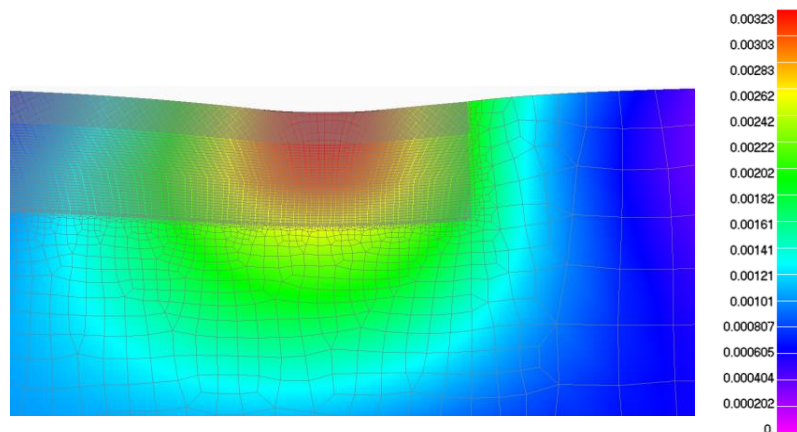


Рисунок 7 – Поле переміщень в шаруватому масиві під дією навантаження коліс від двох

Поле розподілу нормальних напружень σ_y на горизонтальних площадках пружного масиву представлено на рис. 8. Вони всюди від'ємні, тобто є стискаючими і швидко зменшуються по вертикалі.

Більш істотний інтерес представляє характер розподілу в перерізі функції нормальних напружень σ_x , оскільки вони є знакозмінними. На рис. 9 ділянки максимальних по модулю від'ємних і додатних напружень виділені окремо. Вони мають місце у верхній і нижній зонах першого і другого шарів асфальтобетонного покриття, причому стискаючі напруження істотно перевищують значення напружень розтягу. Такий характер розподілу напружень σ_x можна пояснити тим, що значення модулів пружності E_1 , E_2 двох верхніх

шарів набагато більші модулів пружності нижніх шарів, тому два верхніх шара можна вважати плитою, яка лежить на пружній основі, утворену двома шарами, які нижче лежать, і ґрунтовим масивом, а конструкцію покриття для обраного навантаження можна моделювати як згин плити на пружній основі.

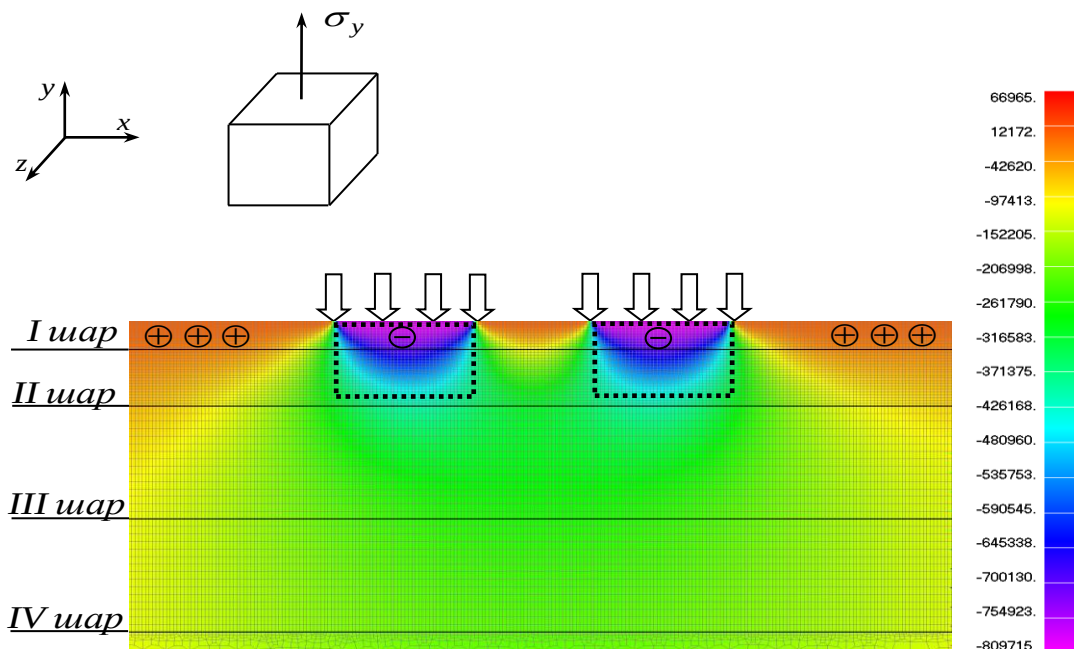


Рисунок 8 – Поле напружень σ_y у перерізі дорожнього покриття

У цьому випадку верхні елементи шару 1 стиснуті, а нижні елементи нижнього шару 2 – розтягнуті. Природно очікувати, що утворення тріщин і руйнування цієї конструкції має починатися з нижніх елементів другого шару, якщо причиною руйнування є розтягнення.

Звернемося тепер до поля розподілу дотичних напружень τ_{xy} , що діють на площадках $x = \text{const}$ в напрямку осі Oy , (рис. 10). Зони їх максимальних величин виділені в прямокутники і їх числові значення подані праворуч на кольоровій шкалі. Як і вище, кожен колірний відтінок цієї палітри відповідає певному значенню даної величині.

Співставляючи результати обчислень на рис. 9 і 10, випишемо максимальні значення цих величин: $\sigma_x^{\max} = 0,813$ МПа, $\tau_x^{\max} = 0,512$ МПа.

Необхідно підкреслити, що максимальні значення зсувних напружень $\tau_x^{\max}$ реалізуються в зонах, де нормальні напруження σ_x , σ_y , σ_z є стискаючими, тому в ній елементи покриття можуть чинити опір зсувним навантаженням. Однак для встановлення конкретного рівня небезпеки тих і інших напружень необхідно на

основі діаграм, представлених на рис. 1, досліджувати окремо вплив кожного з цих видів напружень.

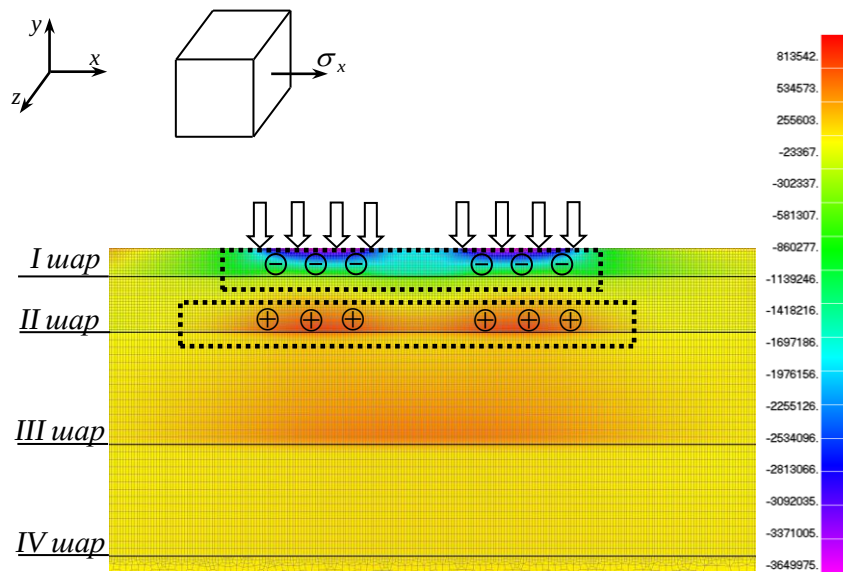


Рисунок 9 – Поле напружень σ_x у перерізі дорожнього покриття

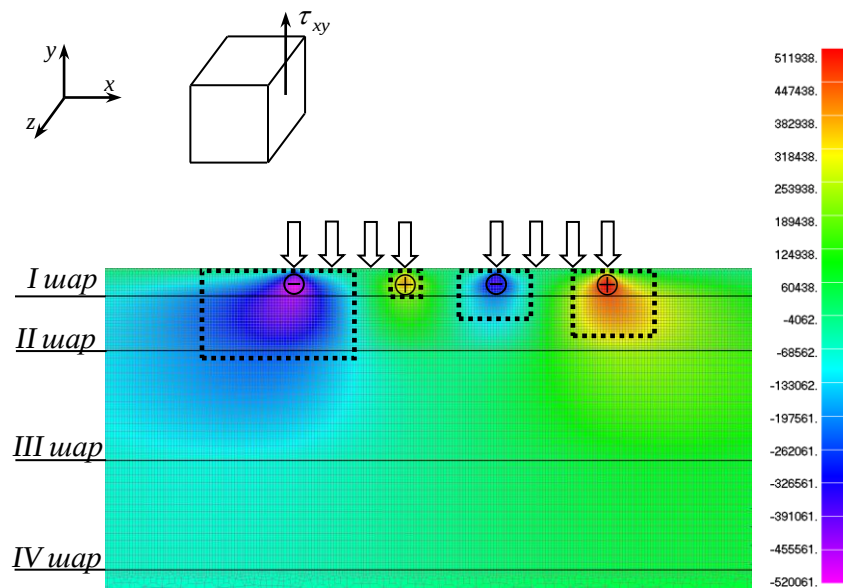


Рисунок 10 – Поле розподілу дотичних напружень τ_{xy}

Однією з причин прогресуючого руйнування дорожнього покриття є порушення зв'язків між його шарами. Для аналізу впливу розшарування на поля напружень в його конструкції приймемо, що на деякій ділянці дороги сталося відшарування першого шару від другого і шари можуть вільно ковзати відносно один одного. При цьому в напрямку вертикальної осі між ними реалізуються нормальні стискаючі напруження і контакт між ними зберігається.

Для такої постановки задачі виконано комп'ютерне моделювання напружено-деформованого стану покриття транспортного навантаження. Вважалося, що розшарування одягу сталося на ділянці, яка розташована на відстані на 2,34 м зліва і праворуч 0,54 м від центру колісної пари.

Розрахунки показали, що конструкція в цьому випадку стала більш піддатливою і її максимальний прогин склав $u_x^{\max} = 3,51 \cdot 10^{-3}$ м. Відбулася також деяка перебудова полів напружень.

Література

1. 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.
2. 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.
3. 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.
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. Гуляев В.І. Дослідження термонапруженого стану конструкцій дорожнього одягу / В.І. Гуляев, В.В. Гайдайчук, В.В. Мозговий, Ю.О. Засць, Л.В. Шевчук // Промислове будівництво та інженерні споруди. – 2017. – №1. – С. 6-12.
6. Гайдайчук В.В. Чисельне моделювання термонапруженого стану шаруватого покриття автомобільної дороги / В.В. Гайдайчук, В.В. Мозговий, Ю.О. Засць, Л.В. Шевчук // Опір матеріалів і теорія споруд. – 2017. – Вип. 100 – С. 6-12

Рецензенти:

Савенко В.Я., д-р тех. наук, Національний транспортний університет.
Марчук О.В., д-р техн. наук, Національний транспортний університет.

Reviewers:

Savenko V.Ya., Dr. Tech. Sci., National Transport University
Marchuk O.V., Dr. Tech. Sci., National Transport University.

Стаття надійшла до редакції: **15.08.2017 р.**