

УДК 539.3

**КОНЦЕНТРАЦІЯ НАПРУЖЕНЬ В ОКОЛІ ВЕРТИКАЛЬНИХ  
ТРИЩИН ДОРОЖНІХ ПОКРИТТІВ****В.В. Гайдайчук<sup>1</sup>,**

д-р техн. наук

**Л.В. Шевчук<sup>2</sup>,**

канд. техн. наук

**О.І. Білобрицька<sup>2</sup>,**

канд. техн. наук

**С.А. Баран<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Київський національний університет будівництва і архітектури,  
Повітрофлотський просп., 31, м. Київ. 03680*

<sup>2</sup>*Національний транспортний університет,  
вул. М. Омеляновича-Павленка 1, м. Київ. 01010*

DOI: 10.32347/2410-2547.2021.106.41-53

В статті наведені результати комп'ютерного аналізу напружено-деформованого стану багат шарового асфальтобетонного дорожнього покриття під дією транспортних навантажень. На основі скінченно-елементної моделі деформування покриття виконано дослідження особливостей механічної поведінки системи, що розглядаються, при різних конструктивних схемах існування вертикальних тріщин в різних шарах конструкції в умовах дії вертикальних навантажень, що моделюють транспортне навантаження. Виявлені ефекти концентрації напружень в системі, обумовлених високоградієнтними полями деформацій і конструктивними недосконаlostями шарового покриття.

**Ключові слова:** автомобільна дорога, багат шарове покриття, вертикальні тріщини, транспортне навантаження, поля деформацій, концентрація напружень.

**1. Вступ.** Багат шарові асфальтобетонні автомобільні дороги є одним з найбільш поширених будівельних об'єктів. Виходячи з огляду задач науки про їх міцність та довговічність, ці конструкції можна віднести до суттєво складних видів будівельних систем. В першу чергу це пояснюється багатопараметричністю факторів, які визначають їх конструкції, властивості матеріалів, види навантажень та вплив на них, а також умов їх експлуатації. Тому проектувальникам дорожніх конструкцій та спеціалістам, що займаються теоретичним моделюванням механічної поведінки шаруватих масивів в процесі експлуатації, доводиться враховувати множину додаткових факторів, які ускладнюють їх роботу. До них відносяться найбільш важливі конструктивні і експлуатаційні особливості цих систем, що суттєво впливають на характер розподілу полів напружень і деформацій, а також їх інтенсивність. В першу чергу це є особлива конструктивна схема дороги і покриття. Вона представляє собою багат шаровий тривимірний пакет, що має незмірно різні розміри вздовж кожного напрямку.

Додаткову складність в розрахункову модель конструкції можуть вносити приховані (а іноді й явні) вертикальні тріщини та горизонтальні розшарування конструкції, іноді допустимі за умовами експлуатації. Такі порушення суцільності приводять також і до розривності переміщень, ще більше погіршуючи працездатність системи й ускладнюючи задачу її моделювання [18-20].

В загальному масиві багат шарової дорожньої конструкції матеріал кожного шару характеризується своїми термомеханічними властивостями. Тому в загальному масиві навіть в спрощеній моделі функції модуля пружності, коефіцієнта Пуассона, коефіцієнта теплопровідності і коефіцієнта теплового лінійного розширення виявляються розривними, викликаючи тим самим розривність функції деформацій і напружень, які є суттєво неоднорідними з концентраціями напружень в най неочікуваних місцях. Такі функції важко моделювати та прогнозувати простими аналітичними та числовими методами. Дана обставина ускладнює задачу раціонального проектування таких конструкцій.

На ділянках спуску та підйому полотна дороги виявляється криволінійним, що також приводить до більш складних і менш наочних полів деформацій та напружень.

Особливу специфіку в роботу дорожньої конструкції вносять матеріали шарів покриття, що включають асфальтобетон, цемент, щебінь, пісок, ґрунт та ін. Всі вони по-різному опираються розтягу, стисненню та зсуву, а асфальтобетон, крім того у загальному випадку, є нелінійним в'язко-пружно-пластичним матеріалом, властивості якого в значній мірі залежать від температури [7, 11, 17, 19]. В практиці розрахунку напружено-деформованого стану таких систем ці властивості зазвичай використовуються лише для встановлення тенденції загальної механічної поведінки систем, а аналіз конкретної системи відбувається в пружній (термопружній) постановці з використанням так званих приведених модулів, що відповідають даному стану системи при заданому рівні навантаження. Така методика широко використовується в закордонних дослідженнях [17, 19, 20], вона прийнята і в даній статті.

Складні ефекти в дорожній конструкції виникають при добових змінах температури навколишнього середовища. Вони викликані тим, що асфальтобетонні матеріали характеризуються порівняно низьким коефіцієнтом теплопровідності, й при типових розмірах конструкції на протязі доби вона не встигає прогрітися чи схолонути на велику глибину. В результаті помітні високо градієнтні зміни температури відбуваються переважно тільки в верхньому шарі (іноді в двох верхніх шарах), та поле температури набуває вигляд крайового ефекту. При цьому інтенсивні нормальні та дотичні напруження концентруються також у верхніх шарах, що сприяє їх розшаруванню та утворенню тріщин. В загальній теорії теплопровідності такі ефекти відомі давно [7], а рівняння, що їх описують, отримали назву сингулярно збурених.

Розв'язування таких задач (як підтверджено в статтях [3-5]) пов'язане з великими труднощами.

Якщо шари асфальтобетону покладені на металеву основу (в мостовій конструкції) або включають армовані стрижні з підвищеною жорсткістю, то, як показали наші розрахунки, великий вплив на формування полів напружень здійснює різниця значень їх коефіцієнтів теплового лінійного розширення. Оскільки при зміні температури в наслідок цієї різниці різні компоненти масиву прагнуть подовжитись або скоротитись на різні величини, для забезпечення сумісності їх переміщень та деформацій на поверхнях їх контакту формуються інтенсивні дотичні напруження, що сприяють руйнуванню зв'язків між ними. Причому виявилось, що наприклад, в мостовій конструкції ці дотичні напруження швидко зростають зі збільшенням товщини асфальтобетонного шару. Це приводить до парадоксального висновку про те, що для пониження рівня термонапружень потрібно зменшувати товщину покриваючого шару.

Неочікуваний термопружний ефект виявився також у зв'язку з армуванням верхніх шарів. Тут арматура надає підкріплюючий вплив тільки при однакових значеннях коефіцієнтів теплового розширення, коли деформації асфальтобетону і арматури сумісні. Якщо вони різні, то для забезпечення спільності деформацій на поверхні контакту генеруються додаткові напруження, що сприяють передчасному локальному руйнуванню асфальтобетону.

В процесі експлуатації конструкція покриття піддається складному коливанню статичних та динамічних навантажень, а також тепловим впливам. До динамічних сил можна віднести навантаження від рухомого транспорту. В будівельній механіці задачі з рухомими силами вважаються одними з найбільш складних як за складанням їх математичних моделей, так і за методами їх розв'язання. Зазвичай динамічний характер таких навантажень враховується в залежності від відношення швидкостей розповсюдження хвиль деформацій в конструкції та руху сил. Оскільки на автомагістралях швидкості руху автомобілів в багато разів менші за швидкість розповсюдження пружних хвиль в ґрунтовому масиві, силами інерції в конструкції дороги від рухомих впливів транспорту можна знехтувати і задачі формулювати в квазістатичній постановці.

Моделювання механічної поведінки дорожньої конструкції з м'яким шаровим покриттям із врахуванням наведених особливостей її роботи навряд чи можливе за допомогою аналітичних методів. В цій статті воно виконане з застосуванням методу скінчених елементів.

**2. Концентрація напружень в околі зовнішніх і внутрішніх тріщин покриття.** В публікаціях авторів [1-6, 9-12, 14-16] виконанні чисельні дослідження напружено-деформованого стану конструкції дороги при наявності в ній розшарувань та інших концентраторів напружень. Значно менше досліджене питання концентрації напружень в околі порушення регулярності конструкції, які викликані вертикальними тріщинами, що пронизують один або декілька шарів системи в її верхніх чи внутрішніх

зонах. Вони можуть бути викликані початковим розшаруванням дороги або введенні спеціально у вигляді розвантажуючих поперечних швів, що знижують поздовжні температурні напруження. Можна очікувати, однак, що ці тріщини і шви приводять до суттєвої перебудови полів деформацій і напружень при дії транспортних навантажень. Оскільки розглянуті явища широко зустрічаються на практиці, проаналізуємо додатково вплив внутрішніх вертикальних тріщин на зміну полів напружень в шаруватій конструкції дороги з чотирма шарами покриття, який складається з дрібнозернистого асфальтобетонна ( $h_1 = 0,08$  м,  $E_1 = 3200$  МПа), крупнозернистого асфальтобетонна ( $h_2 = 0,1$  м,  $E_2 = 3200$  МПа), щебенево-піщаної суміші ( $h_3 = 0,18$  м,  $E_3 = 700$  МПа)

та піска ( $h_4 = 0,2$  м,  $E_4 = 100$  МПа). Шаруватий одяг покриває ґрунтовий масив з модулем пружності  $E_5 = 88,5$  МПа. Вибрані розрахункові схеми, коли вертикальна тріщина пронизує два верхніх шари (рис. 1 (а)) і третій шар (рис. 1 (б)).

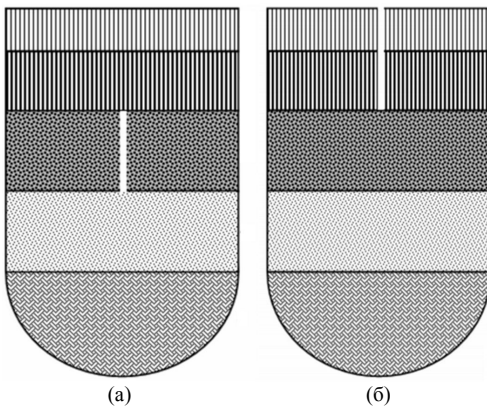


Рис. 1. Конструктивні схеми дорожнього одягу з тріщинами в верхніх (а) і внутрішньому (б) шарах

Як відмічено вище, в загальному випадку під дією транспортних навантажень матеріали шарів асфальтобетонного покриття працюють в

пружнов'язкій (пластичнов'язкій) стадії. Моделювання такої поведінки системи на скінченних проміжках часу пов'язані із значними математичними і технічними труднощами. В результаті таких розрахунків накопичуються великі об'єми числової інформації, яку важко опрацювати і використати. Тому для аналізу міцності і довговічності асфальтобетонних дорожніх покриттів велику роль відіграють їх розрахунки в пружній постановці, яка дозволяє виявляти найбільш напружені зони цих конструкцій і найбільш небезпечні види транспортних навантажень. В зв'язку з цим для аналізу далі використовуються рівняння трьохмірної теорії пружності (7, 11)

$$\mu \nabla^2 \mathbf{u} + (\lambda + \mu) \text{grad div } \mathbf{u} = 0, \quad (1)$$

де  $\mathbf{u}$  – вектор пружних переміщень,  $\lambda$  і  $\mu$  - параметри Ляме.

Система рівнянь (1) приводиться до алгебраїчної форми за допомогою метода скінченних елементів (13, 17, 18)

$$[K] \cdot \{\mathbf{u}\} = \{P\}, \quad (2)$$

де  $[K]$  - матриця жорсткості, для скінченно-елементної моделі пружного масиву, побудована з урахуванням відповідних крайових умов;  $\{u\}$  – вектор дискретних переміщень масиву у вузлах скінченно-елементної решітки;  $\{P\}$  – вектор сил, транспортних навантажень, прикладених у відповідних вузлах вільної поверхні верхнього шару.

Вважалося, що вертикальне навантаження інтенсивністю  $P=900$  кПа рівномірно розподілене на плямі поверхні, що відповідає площадці контакту шини автомобільного колеса з поверхнею дороги. Зона її розподілу на відбиток колеса з дорогою показана на кожному наведеному рисунку.

Спочатку розглянемо випадок, коли покриття не має тріщини. Результати розрахунків представлені на рис. 2. Як для прикладів, наведених вище, тут на кольоровому зображенні поля напружень кожному відтінку кольорової палітри відповідає значення напружень, які наведені справа на стовпчику кольорової шкали. Аналіз поля напружень  $\sigma_{xx}$ , представлених на рис. 2 (а), свідчить про те, що найбільші стискаючі навантаження мають місце на вільній поверхні покриття. Їх локалізація і значення позначені зафарбованим кружком. Розтягуючі напруження  $\sigma_{xx}$  переважають в більш широкій зоні третього шару. Вони збільшуються по мірі наближення до площини контакту третього і четвертого шарів (см. незафарбований кружок), потім зазнають розрив і зменшуються майже до нуля. Характер розподілу цих напружень у вертикальному перерізі, який проходить через середину площадки розподілу зовнішнього навантаження  $P$ , показаний на рис. 2 (в).

Рис. 3 відображає картину розподілу напружень  $\tau_{xy}$ . Ця функція майже симетрична відносно вертикалі, яка проходить через середину площадки розподілу навантаження і має більш гладке розподілення з двома зонами найбільших значень різних знаків. Вони відмічені кружечками. Графіки цієї функції в вертикальному перерізі, що проходить через центр найбільших додатних значень, представлений на рис. 3 в. Тут максимальні значення реалізуються на границі другого і третього шарів, являючись потенційною причиною розшарування покриття в цій зоні. Напруження  $\sigma_{yy}$  і  $\sigma_{zz}$  мають порівняно менші значення і тут не показані.

Введення в цю конструкцію вертикальної тріщини привело до суттєвої перебудови полів деформації і напружень та збільшило їхню інтенсивність. Розглянутий випадок, коли тріщина пронизувала два перших верхніх шари (рис. 1 а), проходячи біля краю площадки розподілу верхнього навантаження. При цьому зона концентрації напружень стиску перемістилася до гирла тріщини (рис. 4), де вони досягли значення  $\sigma_{xx}=-4580$  кПа. Місце локалізації найбільших розтягуючих напружень практично не змінилося, вони також зосереджені в нижній частині третього шару і досягли значення  $\sigma_{xx}=1044$  кПа.

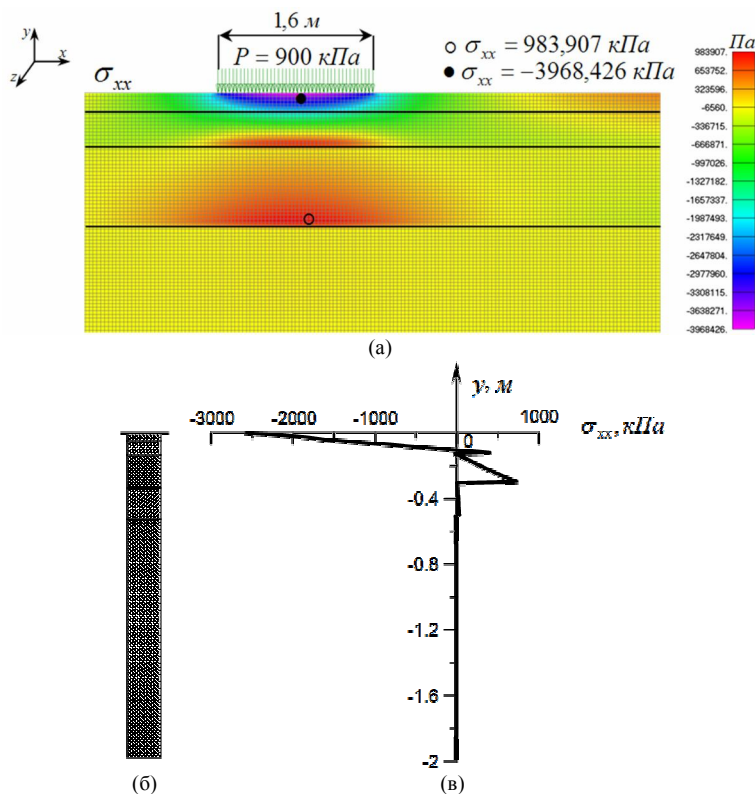


Рис. 2. Нормальні напруження  $\sigma_{xx}$  в шарах покриття, який немає тріщини: (а) - палітра поля напружень  $\sigma_{xx}$ ; (б) - схема розташування шарів; (в) - графік розподілу функції  $\sigma_{xx}$  в вертикальному (центральному по відношенню до навантаження) перерізі дороги

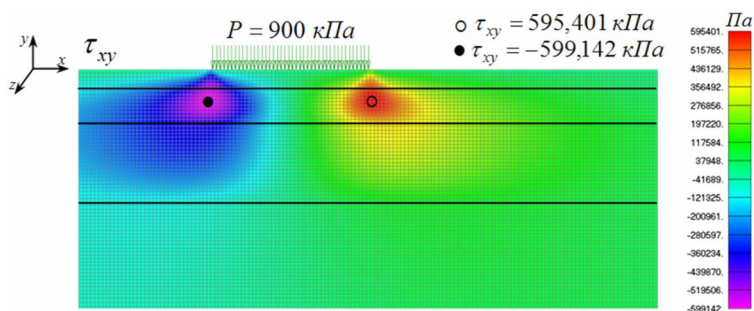
До гирла тріщини змістилися також і найбільші дотичні напруження (рис. 5). Вони досягли значення  $\tau_{xy} = 1710 \text{ kPa}$  і збільшившись при цьому майже в три рази.

Значний практичний інтерес викликає випадок, коли вертикальна тріщина пронизує внутрішній шар (рис. 1 (б)). За розробленою методикою було виконано скінченно-елементне дослідження напружено-деформованого стану системи при розташуванні тріщини в третьому шарі під краєм відбитку контакту колеса з дорогою. Як видно з даних, які наведені на рис. 6, 7, значні величини напружень  $\sigma_{xx}$  і  $\tau_{xy}$  мають місце під крайовою зоною розподілення навантаження  $P$ .

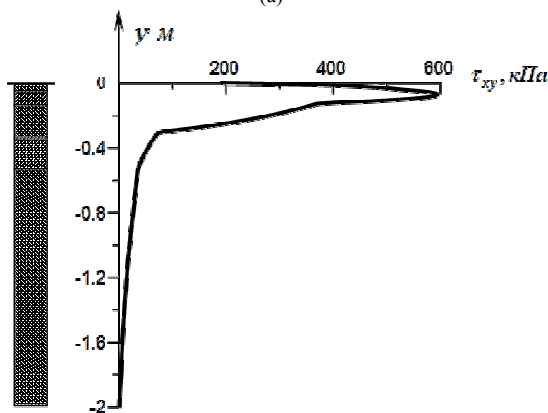
Проте найбільша концентрація функції розтягуючих напружень  $\sigma_{xx}$  має місце у верхньому гирлі тріщини (рис. 6). У нижньому гирлі тріщини ця концентрація є відчутно меншою. У той же час необхідно врахувати, що

підвищенні значення цієї функції досягли поверхні ґрунтового масиву, що має понижену міцність на зсув.

При цьому найбільші стискаючі напруження  $\sigma_{xx}$  реалізуються на поверхні верхнього шару. Вони мають значення  $\sigma_{xx} = -3898$  кПа.



(a)



(б)

(в)

Рис. 3. Дотичні напруження  $\tau_{xy}$  в шарах покриття, який не має тріщини: а - палітра поля напружень  $\tau_{xy}$ ; (б) - схема розташування шарів; (в) - графік розподілу функції  $\tau_{xy}$  в вертикальному (центральному по відношенню до навантаження) перерізі дороги

Внутрішня тріщина суттєво вплинула також і на розподіл та концентрацію дотичних напружень  $\tau_{xy}$  (див. рис. 7). Зона концентрації цих напружень перемістилася до верхнього гирла тріщини.

На закінчення цього підрозділу відзначимо, що виконаний скінченно-елементний аналіз впливу тріщини на напружено-деформований стан багатшарової системи відіграє, швидше, якісну роль, оскільки концентрація напружень в зонах тріщин у значній мірі залежить від геометрії тріщини та її структури в її гирлі. Зі зменшенням елементів скінченно-елементної решітки розрахункові напруження можуть як завгодно збільшуватися, тому уточнення цих розрахунків повинно

здійснюються в пружно-пластичній постановці. Проте навіть пружне формулювання задачі виявляється досить корисною для якісної (і кількісної) оцінки напружено-деформованого стану шаруваті конструкції.

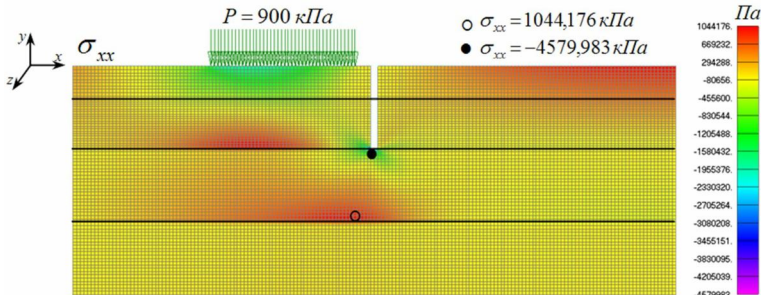


Рис. 4. Поле розподілу напружень  $\sigma_{xx}$  в шарах конструкції з тріщиною

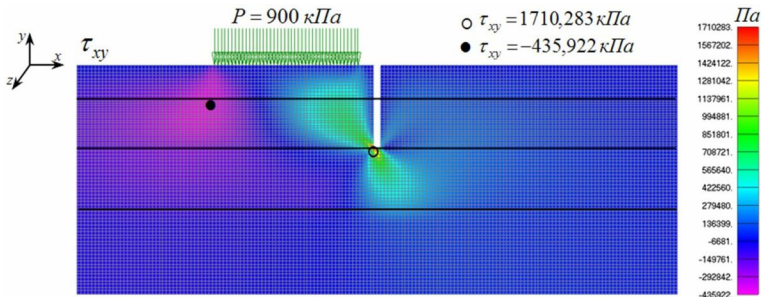


Рис. 5. Поле розподілу дотичних напружень  $\tau_{xy}$

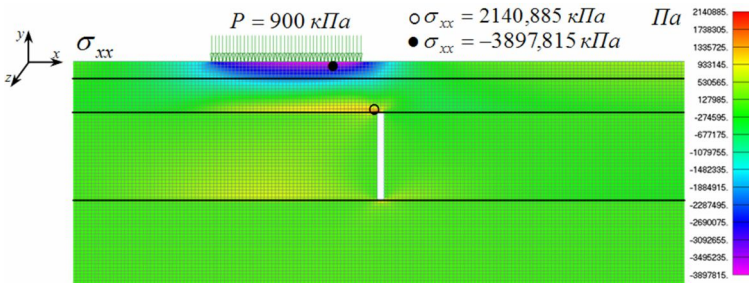


Рис. 6. Поле розподілу функції нормальних напружень  $\sigma_{xx}$

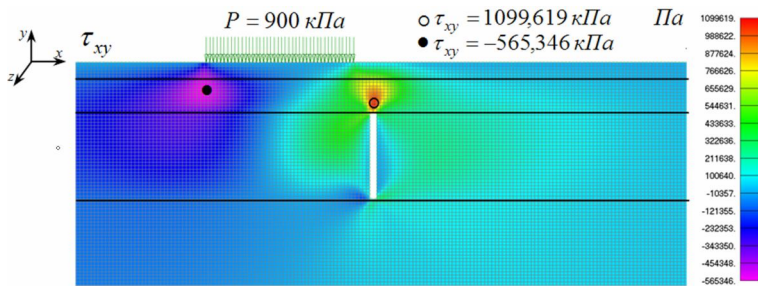


Рис. 7. Поле розподілу дотичних напружень  $\tau_{xy}$

Виконаний аналіз також дає можливість встановлювати найбільш несприятливі місця розташування тріщин по відношенню до навантаження і планувати заходи з ремонту покриття.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Гайдайчук В.В.* Аналіз деформування дорожнього покриття на металевій плиті південного моста / В.В. Гайдайчук, В.В. Мозговий, О.О. Густелєв, Л.В. Шевчук // *Промислове будівництво та інженерні споруди*. – 2019. - №1. – С. 31 – 39.
2. *Гайдайчук В.В.* Моделювання напружено-деформованого стану конструкції дорожнього одягу під дією транспортних навантажень / В.В. Гайдайчук, В.В. Мозговий, Ю.О. Засць, Л.В. Шевчук // *Опір матеріалів і теорія споруд*. – 2017. – Вип. 99 – С.45 – 57.
3. *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. 98 – С. 56-73.
4. *Гуляєв В.І.* Деякі закономірності термопружного деформування асфальтобетонного покриття дороги / В.І. Гуляєв, В.В. Гайдайчук, В.В. Мозговий, Ю.О. Засць, Л.В. Шевчук // *Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки»*. Науково-технічний збірник – К.: НТУ, 2017. – Вип. №1 (37). – С. 80-92.
5. *Гуляєв В.І.* Дослідження термонапруженого стану конструкцій дорожнього одягу / В.І. Гуляєв, В.В. Гайдайчук, В.В. Мозговий, Ю.О. Засць, Л.В. Шевчук // *Промислове будівництво та інженерні споруди*. – 2017. - №1. – С. 6 – 12.
6. *Гуляєв В.І.* Сезонний перерозподіл полів напружень в конструкціях шаруватих покриттів доріг під дією транспортних навантажень / В.І. Гуляєв, Л.В. Шевчук, О.М. Куцман // *Вісник Національного транспортного університету*. — 2018. — Вип. 40. – С. 98 – 105.
7. *Коваленко А.Д.* Основы термоупругости. / А.Д. Коваленко – Киев: Наукова Думка, 1970. – 239 с.
8. *Механика горных выработок при действии гравитационных и динамических нагрузок: монография* / [В. И. Гуляев, П. З. Кошель, Ю. А. Заец и др.]. – Ивано-Франковск: Изд-во Прикарпат. нац. ун-та им. В. Стефаника, 2014. – 438 с.
9. *Мозговий В.В.* Аналіз термопружних процесів в асфальтобетонних шарах автомобільних доріг / В.В. Мозговий, В.В. Гайдайчук, Ю.О. Засць, Л.В. Шевчук // *Вісник Одеської державної академії будівництва і архітектури* – 2017. – Вип. 67. – С. 96-103.
10. *Мозговий В.В.* Механічні ефекти і парадокси явищ термопружного напруження в конструкціях дорожніх одягів / В.В. Мозговий, В.В. Гайдайчук, Ю.О. Засць, Л.В. Шевчук, О.О. Густелєв // *Дороги і мости*. – 2018. – Вип. 18 – С.128 – 146.
11. *Новацкий В.* Динамические задачи термоупругости. / В. Новацкий. – М.: Мир, 1970. – 256 с.

12. *Перельмутер А.В.* О влиянии изменения жесткостей на перераспределение усилий в статически неопределимой системе / А.В. Перельмутер // Строительная механика и расчет сооружений. – 1974. – № 5. – С. 64-67.
13. *Перельмутер А. В.* Расчетные модели сооружений и возможность их анализа / А. В. Перельмутер, В.И Сливнер М.: ДМК Пресс, 2007. 600 с.
14. Термопружний стан багатопшарових дорожніх покриттів. / [В.І. Гуляєв, В.В. Гайдайчук, В.В. Мозговий та ін.] – НТУУ, Київ, 2018. 252с.
15. *Шевчук Л.В.* Скінченно-елементний моніторинг напружено-деформованого стану дорожнього покриття з розшаруванням / Л.В. Шевчук, О.В. Ващільна, І.В. Лебедева, С.А. Баран // Вісник КНУ ім. Т.Г. Шевченка. – 2018. – Вип. 2. – С. 57 – 63.
16. *Gulyayev V.I.* Some regularities of seasonal transformations of stress fields in structures of layered pavements under action of transport loads / V.I. Gulyayev, V.V. Gaidaichuk, V.V. Mozgoviy, Yu.O. Zaets, L.V. Shevchuk // Сучасні методи і проблемно-орієнтовані комплекси розрахунку конструкцій і їх застосування у проектуванні і навчальному процесі: тези доповідей Міжнародної науково-практичної конференції, м. Київ, 25-28 жовтня 2017. – К.: Талком. – С. 59.
17. *Krishnan J.M.* Review of the uses and modeling of bitumen from ancient to modern times. American society of mechanical engineers. / J.M. Krishnan, K.R. Rajagopal // Appl Mech Rev. – 2003. - 56(2). – P. 149–214.
18. 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.
19. *Radovskiy B., Telayev B.* Viscoelastic Properties of Asphalts Based on Penetration and Softening Point. Monograph. - Springer Nature, Switzerland, 2017. – 107 p.
20. *Yoder E.J.* Principles of pavement design. – New York. John Wiley & sons, INC. London. Chapman & Hall, Ltd.

## REFERENCES

1. Gaydaychuk V.V., Mozgoviy V.V., Gustelev O.O., Shevchuk L.V. Analiz deformuvannya dorozhnogo pokryttia na metalevii plyti pivdennoho mosta (Analysis of road surface deformation on the metal plate of the south bridge) // Promyslove budivnytstvo ta inzhenerni sporudy. – 2019. – No 1. – P. 31 – 39.
2. Gaydaychuk V.V., Mozgoviy V.V., Zaets Yu. A., Shevchuk L.V. Modeliuvannya napruzhenodeformovanoho stanu konstruksii dorozhnogo odiahu pid diieiu transportnykh navantazhen (Simulation of stress-strain states of road structures under action of transport loads) // Опір матеріалів і теорія споруд. – 2017. – V. 99 – P.45 – 57.
3. Gaydaychuk V.V., Mozgoviy V.V., Zaets Yu. A., Shevchuk L.V. Chyselne modeliuvannya termonapruzhenoho stanu шаруватого покриття автомобільної дороги (Numerical simulation of the thermal stress state of the layered road surface) // Опір матеріалів і теорія споруд. – 2017. – V. 98 – P.56 – 73.
4. Gulyayev V. I., Gaydaychuk V.V., Mozgoviy V.V., Zaets Yu. A., Shevchuk L.V. Deiki zakonornosti termopruzhenoho deformuvannya asfaltobetonnoho pokryttia dorohy (Some regularities of thermoelastic deformation of asphalt concrete pavement) // Visnyk Natsionalnoho transportnoho universytetu. – 2018. – V. 37, No 1 – P.80-92.
5. Gulyayev V. I., Gaydaychuk, V.V., Mozgoviy, V.V., Zaets, Yu. A., Shevchuk, L.V. Doslidzhennia termonapruzhenoho stanu konstruksii dorozhnogo odiahu (Analysis of thermo-stressed state of the road coating structures) // Promyslove budivnytstvo ta inzhenerni sporudy. – 2017. – No 1. – P. 6 – 12.
6. Gulyayev V. I., Shevchuk, L.V., Kutsman O. M. Sezonnii pererozpodil poliv napruzhen v konstruksiiakh шаруватих покриттів доріг під дією транспортних навантажень (Seasonal redistribution of stress fields in layered road structures under transport load action) // Visnyk Natsionalnoho transportnoho universytetu – 2018. – V. 40. – P. 98 – 105.
7. Kovalenko A.D. Osnovy termopruzgosti (Fundamentals of thermoelasticity). Kyiv: Naukova Dumka, 1970. – 239 p.
8. Gulyayev V. I., Koshel P. Z., Zaets Yu. A. Mekhanika hornykh vyrabotok pry deistvii hravytatsyonnykh y dynamycheskikh nahrzok (Mechanics of mine workings under the action

- of gravitational and dynamic loads). Ivano-Frankovsk: Izd-vo Prykarp. nats. un-ta im. V. Stefanyka, 2014. – 438 p.
9. Mozgoviy V.V., Gaydaychuk V.V., Zaets Yu. A., Shevchuk L.V. Analiz termopruznykh protsesiv v asfaltobetonnnykh sharakh avtomobilnykh dorih (Analysis of thermoelastic processes in asphalt concrete layers of roads) // Visnyk Odeskoï derzhavnoi akademii budivnytstva i arkhitektury. – 2017. – V. 67. – P. 96-103.
  10. Mozgoviy V.V., Gaydaychuk V.V., Zaets Yu. A., Shevchuk L.V., Gustelev O.O. Mekhanichni efekty i paradoksy yavlyshch termopruznoho napruzhenia v konstruktsiakh dorozhnykh odiahiv (Mechanical effects and paradoxes of thermoelastic stress phenomena in pavement structures) // Dorohy i mosty. – 2018. – V. 18 – P.128 – 146.
  11. Novatskiy V. Dinamicheskie zadachi termouprugosti (Dynamic problems of thermoelasticity). Moskva: Mir, 1970. – 256 p.
  12. Perelmuter A.V. O vliianii izmeneniia zhestokosti na pereraspredelenie usilii v staticheski neopredelimoï sisteme (On the effect of changes in cruelty on the redistribution of efforts in a statically indefinable system) // Stroitelnaia mekhanika i raschet sooruzhenii – 1974. – No 5, P. 64-67.
  13. Perelmuter, A.V., Slyvner, V.Y Raschetnye medeli sooruzhenii y vozmozhnost ikh analiza (Estimated construction time and the possibility of their analysis). Moskva: DMK Press, 2007. – 600 p.
  14. Gulyayev, V. I., Gaydaychuk, V.V., Mozgoviy, V.V. Termopruznyi stan bahatosharovykh dorozhnykh pokryttiv (Thermoelastic state of multilayer pavements). NTU Kyiv, 2018. – 252p.
  15. Shevchuk, L.V., Vaschilina, O.V., Lebedieva, I.V., Baran, S.A. Skinchenno-elementnyi monitorynh napruzhenno-deformovanoho stanu dorozhnoho pokryttia z rozsharuvanniam (Finite element monitoring of stress-strain state of pavement with stratification) // Visnyk KNU im. T.H. Shevchenka. – 2018. – V. 2. – P. 57 – 63.
  16. Gulyayev V. I., Gaydaychuk V.V., Mozgoviy V.V., Zaets Yu. A., Shevchuk L.V. Some regularities of seasonal transformations of stress fields in structures of layered pavements under action of transport loads. tezy dopovidei Mizhnarodnoi naukovy-praktychnoi konferentsii, m. Kyiv, 25-28 zhovtnia 2017. – K.: Talkom. – P. 59.
  17. Krishnan J.M., Rajagopal K.R. Review of the uses and modeling of bitumen from ancient to modern times. American society of mechanical engineers // Appl Mech Rev. – 2003. - 56(2). – P. 149–214.
  18. 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.
  19. Radovskiy B., Teltayev B. Viscoelastic Properties of Asphalts Based on Penetration and Softening Point. Monograph. - Springer Nature, Switzerland, 2017. – 107 p.
  20. Yoder E.J. Principles of pavement design. – New York. John Wiley & sons, INC. London. Chapman & Hall, Ltd.

*Стаття надійшла 22.12.2020*

*Gaidaichuk V.V., Shevchuk L.V., Bilobrytska O.I., Baran S.A.*

### **STRESS CONCENTRATION IN THE VICINITY OF ROAD COATING CRACKS**

The article presents the results of a computer analysis of the stress-strain state of a multilayer asphalt pavement under the influence of traffic loads. Based on the finite-element model of coating deformation, a study was made of the mechanical behavior of the system considered for various structural schemes for the existence of vertical cracks in various layers of the structure under the action of vertical transport loads. The effects of stress concentration in the system due to high-gradient deformation fields and structural imperfections of the multilayer coating were found.

Multi-layer asphalt roads are one of the most common construction projects. Based on a review of the tasks of science about their strength and durability, these structures can be attributed to significantly complex types of building systems. This is primarily due to the multi-parameter nature of the factors that determine their design, material properties, types of loads and the impact on them, as well as their operating conditions. Therefore, designers of road structures and specialists who are

involved in the theoretical modeling of the mechanical behavior of layered massifs during operation have to take into account many additional factors that complicate their work. These include the most important design and operational features of these systems, which significantly affect the nature of the distribution of stress and strain fields, as well as their intensity. First of all, they include special structural schemes of the road and pavement. It is a multilayer three-dimensional package having disproportionately different sizes along each direction.

Hidden (as well as obvious) vertical cracks and horizontal delamination of the structure, sometimes permissible under operating conditions, can be added to the design model of a structure. Such violations of the continuity of the system also lead to discontinuity of the displacement functions, which further worsens the system's performance and complicates the task of its modeling.

The materials of the coating layers, which include asphalt concrete, cement, crushed stone, sand, soil, and others, also bring particular specificity to the work of the road structure. All of them differently resist tensile, compression and shear, and asphalt concrete is also elastic-viscous - plastic material, whose properties are largely dependent on temperature.

**Key words:** automobile road, multilayer road, coating structure, vertical cracks, transport load, deformation fields, stress concentration.

*Гайдайчук В.В., Шевчук Л.В., Білобрыцька Е.И., Баран С.А.*

### **КОНЦЕНТРАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В ОКРЕСТНОСТИ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ТРЕЩИН ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ**

В статье приведены результаты компьютерного анализа напряженно-деформированного состояния многослойного асфальтобетонного дорожного покрытия под действием транспортных нагрузок. На основе конечно-элементной модели деформирования покрытия выполнено исследование особенностей механического поведения системы, рассмотренных при различных конструктивных схемах существования вертикальных трещин в различных слоях конструкции в условиях действия вертикальных транспортных нагрузок. Обнаружены эффекты концентрации напряжений в системе, обусловленные высокоградиентными полями деформаций и конструктивными несовершенствами многослойного покрытия.

**Ключевые слова:** Автомобильная дорога, многослойное покрытие, вертикальные трещины, транспортная нагрузка, поля деформаций, концентрация напряжений.

УДК 539.3

*Гайдайчук В.В., Шевчук Л.В., Білобрыцька О.М., Баран С.А.* **Концентрація напружень в околі вертикальних тріщин дорожніх покриттів** // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірн. – К.: КНУБА. 2021. – Вип. 106. – С. 41-53.

*В статті наведені результати комп'ютерного аналізу напружено-деформованого стану багатослойного асфальтобетонного дорожнього покриття під дією транспортних навантажень.*

Ил. 7. Бібліогр. 20 назв.

UDC 539.3

*Gaidaichuk V.V., Shevchuk L.V., Bilobrytska O.I., Baran S.A.* **Stress concentration in the vicinity of road coating cracks** // Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles. – K.: KNUBA. 2021. – Issue 106. – P. 41-53.

*The article presents the results of a computer analysis of the stress-strain state of a multilayer asphalt pavement under the influence of traffic loads.*

Fig. 7. Ref. 20.

УДК 539.3

*Гайдайчук В.В., Шевчук Л.В., Білобрыцька Е.И., Баран С.А.* **Концентрация напряжений в окрестности вертикальных трещин дорожных покрытий** // Сопротивление материалов и теория сооружений. – К.: КНУБА, 2020.

*В статье приведены результаты компьютерного анализа напряженно-деформированного состояния многослойного асфальтобетонного дорожного покрытия под действием транспортных нагрузок.*

Ил. 7. Библіогр. 20 назв.

**Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада):** доктор технічних наук, завідувач кафедри теоретичної механіки КНУБА ГАЙДАЙЧУК Віктор Васильович.

**Адреса робоча:** 03680 Україна, м. Київ, Повітрофлотський проспект 31, КНУБА, кафедра теоретичної механіки, Гайдайчуку Віктору Васильовичу.

**Адреса домашня:** Україна, м. Київ, вул. Миколи Закревського, 27/2, кв. 64.

**Робочий тел.:** +38(044) 241-55-36

**Мобільний тел.:** +38(097) 542-94-27

**E-mail:** viktor\_gaydaychuk@bigmir.net

**ORCID ID:** <http://orcid.org/0000-0003-2059-7433>

**Автор (вчена ступень, вчене звання, посада):** кандидат технічних наук, доцент кафедри вищої математики, ШЕВЧУК Людмила Володимирівна.

**Адреса робоча:** 01103 Україна, м. Київ, вул. М. Бойчука 42, Національний транспортний університет, ШЕВЧУК Людмилі Володимирівні.

**Робочий тел.:** +38(044) 284-71-09

**Мобільний тел.:** +38(066) 715-36-33

**E-mail:** ludmilashevchuk25@gmail.com

**ORCID ID:** <http://orcid.org/0000-0002-5748-9527>

**Автор (вчена ступень, вчене звання, посада):** кандидат технічних наук, доцент кафедри вищої математики, БЛОБРИЦЬКА Олена Іванівна.

**Адреса робоча:** 01103 Україна, м. Київ, вул. М. Бойчука 42, Національний транспортний університет, БЛОБРИЦЬКІЙ Олені Іванівні.

**Робочий тел.:** +38(044) 284-71-09

**Мобільний тел.:** +38(099) 327-04-66

**E-mail:** olenkab@ukr.net

**ORCID ID:** <http://orcid.org/0000-0002-6751-6592>

**Автор (вчена ступень, вчене звання, посада):** кандидат технічних наук, асистент кафедри дорожньо-будівельних матеріалів і хімії, БАРАН Сергій Анатолійович.

**Адреса робоча:** 01103 Україна, м. Київ, вул. М. Бойчука 42, Національний транспортний університет, БАРАНУ Сергію Анатолійовичу.

**Робочий тел.:** +38(044) 285-95-28

**E-mail:** baran\_serg@ukr.net

**ORCID ID:** <http://orcid.org/0000-0002-3591-9880>