

УДК 625.852

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2024.106.0.102

АНАЛІЗ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ КОНСТРУКЦІЇ ДОРОЖНЬОГО ОДЯГУ ЗАЛЕЖНО ВІД РОЗТАШУВАННЯ НАВАНТАЖЕННЯ СПІВВІДНОСНО КРАЇВ КОМБІНОВАНОЇ ПЛИТИ

Батракова А. Г., Дорожко Є. В., Урдзік С. М., Шелкова І. С.
Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Україна

Анотація. Наявні методи розрахування не враховують особливості напружено-деформованого стану асфальтобетонного шару на жорсткій основі у вигляді цементобетонних плит за різних умов навантаження, зокрема таких, як середина, край чи кут плити. Здійснено моделювання напружено-деформованого стану дорожнього одягу методом скінченних елементів за допомогою програмного комплексу ANSYS, досліджено три варіанти розміщення транспортного навантаження: в центрі плити, на її краю та в куті. Здійснено порівняльний аналіз напружено-деформованого стану шарів дорожнього одягу для цих варіантів навантаження та проаналізовано отримані результати з порівняння з вже відомими рішеннями.

Ключові слова: асфальтобетонний шар, метод скінченних елементів, модуль пружності, навантаження, напруження, цементобетонна плита.

Вступ

На автомобільних дорогах у всьому світі тривалий час спостерігається значне збільшення кількості транспортних засобів та значення навантаження на конструкцію дорожнього одягу [1]. Така тенденція спонукає до збільшення обсягу будівництва автомобільних доріг з використанням дорожнього одягу жорсткого типу, оскільки саме цей тип дорожнього одягу забезпечує вищу міцність і великий термін експлуатації, як порівняти з нежорстким типом дорожнього одягу [2].

Цементобетонні покриття визначаються складністю ремонтних робіт, тому для їх ремонту чи нового будівництва доцільно використовувати покриття з асфальтобетонної суміші [3], що дозволяє поліпшити техніко-експлуатаційний стан покриття цементобетонних плит, оскільки асфальтобетонний шар здійснює функцію захисного або зносостійкого шару на цементобетонних плитах [3]. У таких умовах важливо запобігти руйнувань асфальтобетонного шару покриття, оскільки від нього залежить загальний стан дорожнього одягу [4, 5].

Напружено-деформований стан асфальтобетонних шарів на цементобетонних плитах суттєво відрізняються від інших, що використовують для інших конструктивних рішень. Наявні методи визначення міцності асфальтобетонних покриттів для жорстких дорожніх одягів є недостатньо точними, оскільки вони враховують не усі види деформацій і руйнувань асфальтобетонного шару. Не враховуються особливості напружено-

деформованого стану асфальтобетонного шару на цементобетонних плитах за різних умов навантаження, зокрема таких, як середина, край та кут плити [5].

З огляду на складний напружено-деформований стан асфальтобетонного шару на жорсткій основі [6] актуальним стає аналіз напружено-деформованого стану, спрямований на визначення найбільш небезпечного варіанта розташування транспортного навантаження для забезпечення міцності асфальтобетонного шару.

Аналіз публікацій

Результати спостережень за руйнуваннями асфальтобетонних покриттів на жорсткій основі наведено в роботі [3, 5]. Зазначено, що для запобігання утворенню тріщин в асфальтобетонному шарі над стиками цементобетонних плит існують кілька варіантів технологічних рішень. Одним із найбільш ефективних методів є передбачення деформаційних швів в асфальтобетонному покритті над швами, що вже наявні в цементобетонних плитах. Такий підхід до боротьби з відображеними тріщинами також обґрунтований у роботах [7–10]. Таким чином, дорожнє покриття поділяється на комбіновані плити, які функціонують незалежно одна від одної.

У дослідженнях [8–10] наведено, що функціонування комбінованих плит, які складаються з асфальтобетонних шарів на цементобетонних плитах, суттєво відрізняється від інших конструктивних рішень. Зазначено, що під час дорожнього будівництва використо-

вують недостатньо досконалі методи визначення міцності асфальтобетонних покриттів жорстких дорожніх конструкцій через недостатнє вивчення напружено-деформованого стану асфальтобетонних шарів на жорсткій основі. У цьому випадку нормуються лише окремі критерії міцності асфальтобетонного шару, що не повною мірою відповідають реальним умовам експлуатації.

Згідно з дослідженнями [5, 10], розташування навантаження в середині, на краю або в куті плити значно впливає на напружено-деформований стан конструкції. Таким чином, розміщення навантаження співвідносно комбінованої плити суттєво впливає на міцність асфальтобетонного покриття.

Згідно з [5, 10, 11], недостатнє вивчення напружено-деформованого стану асфальтобетонного шару на жорсткій основі за різних умов прикладення навантаження призводить до невідповідності наявних критеріїв міцності та граничних станів реальним умовам експлуатації покриття. Це також скорочує термін міжремонтного періоду експлуатації дорожнього одягу та збільшує витрати на передчасні ремонти. У зв'язку з цим доцільним є проведення дослідження, спрямованого на аналіз напружено-деформованого стану асфальтобетонного шару на жорсткій основі та визначення найбільш критичного варіанта прикладення навантаження.

Мета та постановка завдання

Метою статті є визначення напружено-деформованого стану конструкції дорожнього одягу з асфальтобетонного шару на жорсткій основі за різних варіантів розміщення транспортного навантаження співвідносно країв цементобетонної плити, що дозволить визначити найбільш небезпечний варіант розміщення навантаження.

Моделювання напружено-деформованого стану

Для розроблення розрахункової схеми та вибору моделі матеріалів були застосовані загальні методи розв'язання задач механіки деформованого твердого тіла. Структура цементобетону складається з часток крупного (щебінь) і дрібного (пісок) заповнювача, пов'язаних між собою цементним каменем. Використання тіла як суцільного середовища полегшує математичний опис його поведінки. Матеріал цементобетону розглядається як пружне, суцільне, однорідне та ізотропне тіло [5, 7].

Для вирішення завдання, відповідно до [4, 9, 12], асфальтобетонний шар визначений як в'язко-пружне тіло, тобто воно деформується без залишкових деформацій, але з огляду на час розвитку напружено-деформованого стану. У межах застосованої моделі в'язко-пружного деформування не розглядається така властивість, як повзучість, а досліджується лише в'язко-пружний діапазон [12]. Розташування окремих структурних елементів в об'ємі асфальтобетонного матеріалу є досить випадковим. Розміри бітумно-мінеральних конгломератів (елементів мінерального скелета та асфальтового в'язучого навколо них) значно менші, як порівняти з розмірами асфальтобетонного покриття дорожнього одягу. Тому для розрахування шарів з асфальтобетону можливо ідеалізувати реальне середовище, визначаючи матеріал асфальтобетону як квазіоднорідний.

Розрахування здійснено для таких умов:

- навантаження, величиною $P = 0,8$ МПа;
- штамп круглий, жорсткий, діаметром 34,5 см.

Варіанти розміщення місця прикладення жорсткого штампа, що імітує колесо автомобіля:

- 1 – штамп в центрі плити (рис. 1);
- 2 – штамп з краю плити (посередині) (рис. 2);
- 3 – штамп у куті плити (рис. 3).

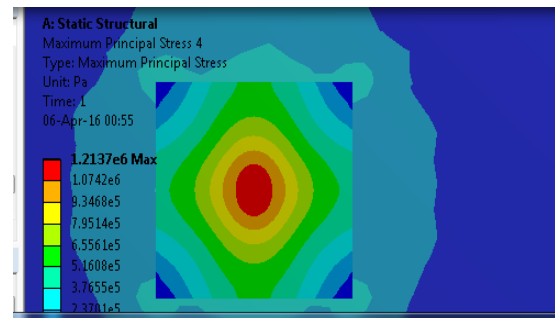


Рис. 1. Відображення результатів моделювання за розміщення навантаження в центрі плити

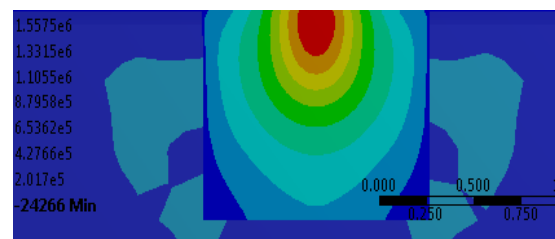


Рис. 2. Відображення результатів моделювання за розміщення навантаження з краю плити (посередині)

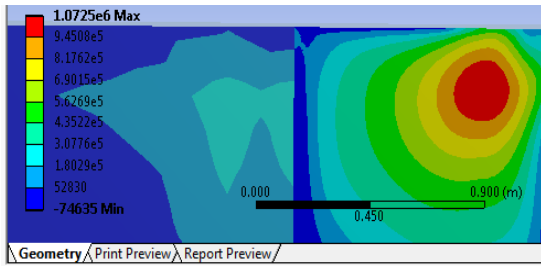


Рис. 3. Відображення результатів моделювання за розміщення навантаження в куті плити

У процесі моделювання напружено-деформованого стану визначено:

- напруження за Мізесом;
- головне напруження;
- горизонтальні напруження;
- максимальні дотичні напруження.

Аналіз результатів моделювання

Аналіз та порівняння результатів моделювання здійснено для трьох варіантів розташування штампа та для трьох варіантів значень модуля пружності асфальтобетону.

Результати моделювання напруження за Мізесом наведено на рисунках 4–6.

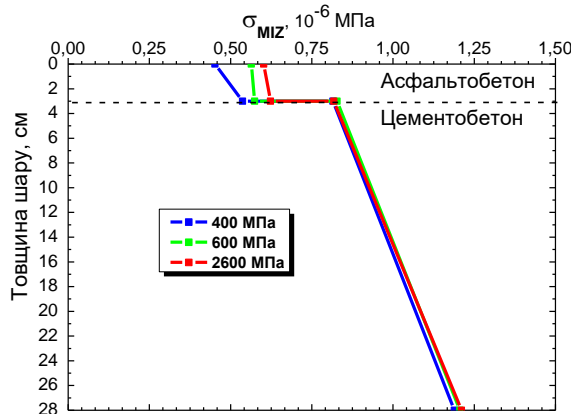


Рис. 4. Напруження за Мізесом у процесі прикладання навантаження в центрі плити

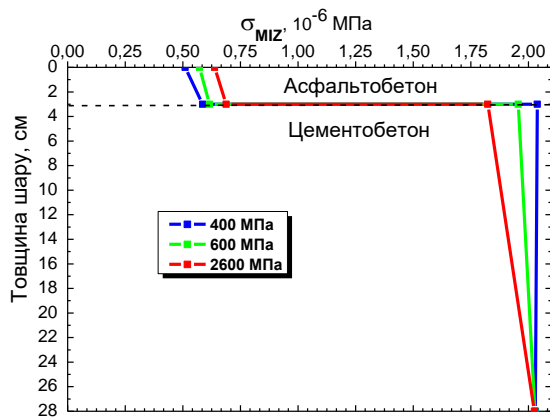


Рис. 5. Напруження за Мізесом у процесі прикладання навантаження на краю плити

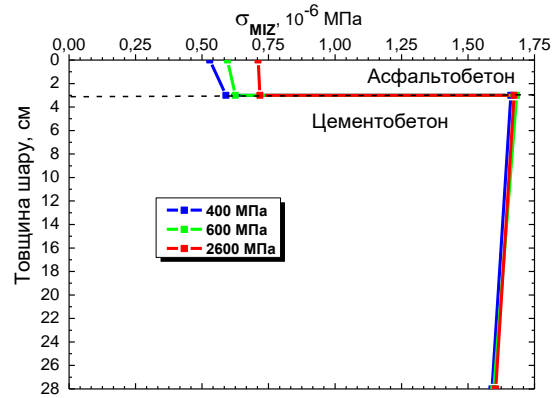


Рис. 6. Напруження за Мізесом у процесі прикладання навантаження в куті плити

Згідно з результатами моделювання, наведеними на рис. 4–6, визначено, що зміна модуля пружності асфальтобетону в діапазоні від 400 МПа до 2600 МПа не призводить до суттєвої зміни закономірності зміни напружень за Мізесом вздовж глибини конструкції, зокрема в шарі цементобетонної плити. Аналогічна залежність зберігається і для головного напруження, горизонтального напруження та максимального дотичного напруження.

Розглянемо порівняльний аналіз результатів моделювання з різними варіантами прикладання навантаження (рис. 7–10).

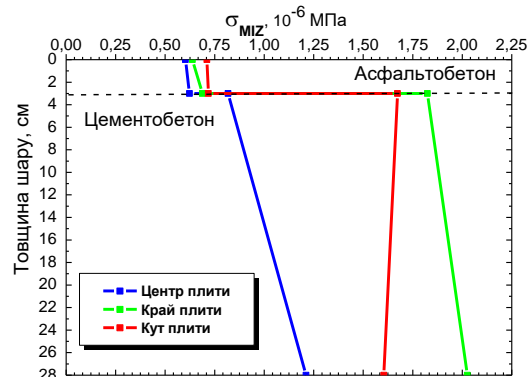


Рис. 7. Співставлення напружень за Мізесом для трьох варіантів розташування штампа

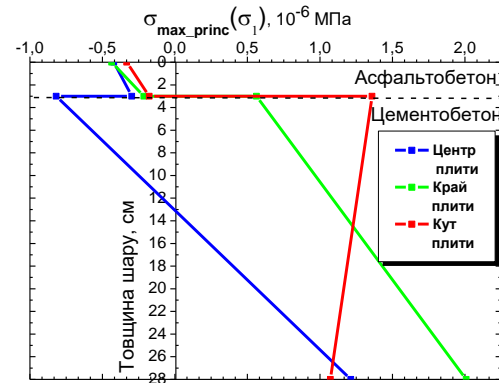


Рис. 8. Співставлення головних напружень для трьох варіантів розташування штампа

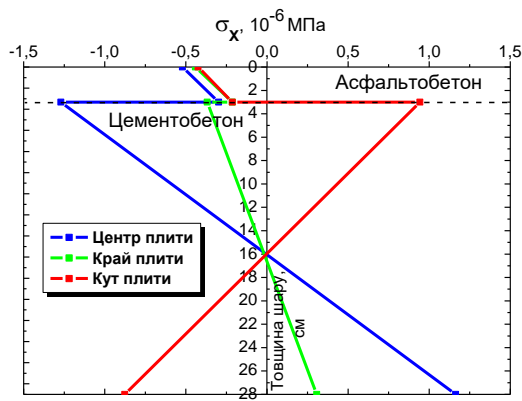


Рис. 9. Співставлення горизонтальних напружень для трьох варіантів розташування штампа

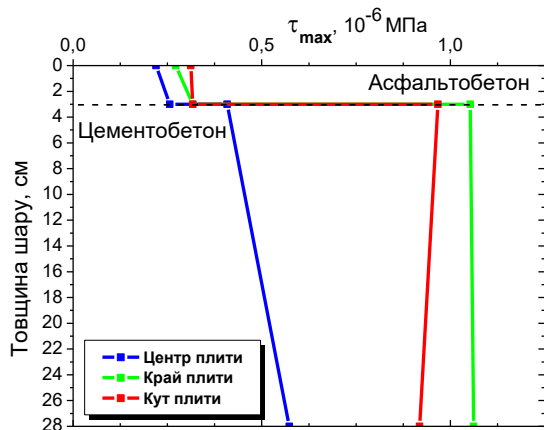


Рис. 9. Співставлення дотичних напружень для трьох варіантів розташування штампа

Варіант прикладання навантаження на краю плити є найбільш небезпечним як за розтягувальними, так і за зсувними напруженнями. Під час аналізу зручно скористатися результатами визначення напружень за Мізесом, оскільки вони відображають об'ємний напружений стан конструкції. Під час процесу розрахунку було визначено таке:

- напруження від навантаження, прикладеного на краю плити, перевищують напруження від навантаження, прикладеного вздовж центру плити приблизно на 60 %;

- напруження від навантаження, прикладеного в куті плити, перевищують напруження від навантаження, прикладеного вздовж центру плити приблизно на 35 %.

Отримані методом скінченних елементів результати моделювання напружено-деформованого стану конструкції дорожнього одягу на відміну від результатів розрахунку напружень у цементобетонній плиті, що були здійснені за аналітичними рішеннями Вестергарда, узгоджуються відхиленням в таких межах:

- 3 % – для варіанта прикладення навантаження в центрі плити;

- 7 % – для варіанта прикладення навантаження з краю плити;

- 5 % – для варіанта прикладення навантаження в куті плити.

Висновки

За результатами моделювання напружено-деформованого стану комбінованої плити з асфальтобетонного шару на жорсткій основі визначено, що край плити є найбільш небезпечним як за розтягувальними, так і за зсувними напруженнями в цементобетонній плиті.

Для асфальтобетонного шару розміщення навантаження в куті плити є найбільш небезпечним як за дотичними зсувними напруженнями, так і за напруженнями за Мізесом.

Отримані результати та наведені висновки потребують подальшого дослідження й аналізу, оскільки доцільно більш детально вивчити та врахувати під час моделювання механізм прикладення транспортного навантаження й вірогідність розташування та циклічності транспортного навантаження співвідносно країв плити.

Наведені результати дослідження отримано за підтримки Національного фонду досліджень України в межах здійснення проекту «Розроблення комплексу методів і засобів георадарної діагностики для визначення надійності об'єктів критичної транспортної інфраструктури».

Література

1. Толмачев С. М. Будівництво автодоріг із цементобетонним покриттям в Україні – реальність сьогодення. Автошляховик України. 2013. № 4. С. 36–40.
2. Гамеляк І. П., Корецький А. С., Корецький С. С. Про необхідність будівництва в Україні автомобільних доріг із цементобетонним покриттям. Автошляховик України. 2013. №5. С. 24–31.
3. Dorozhko E., Ryapuhin V., Makovyey R. Design procedure by strength criteria of asphalt layers on a rigid base taking into account the simultaneous action of external loads and thermal stresses. Procedia Engineering. 2016. Vol. 134. P. 101–108.
4. Onischenko A., Kovalchuk V., Zagorodnyy O. Determining the residual service life of polymer-modified asphalt concrete pavement on road bridges. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2023. Vol. 3 № 1(123). P. 41–51.
5. Дорошко Є. В. Удосконалення методу розрахунку тонких асфальтобетонних шарів на жо-

- рсткій основі: дис. ...канд. техн. наук: 05.22.11. Харків, 2016. 280 с.
6. Дорожко Є. В. Врахування сумісної дії зовнішнього навантаження та температури при розрахунках тонких асфальтобетонних шарів на жорсткій основі. Науковий вісник будівництва. 2015. № 4. С. 132–136.
 7. Гамеляк І. П., Шургая А. Г., Якименко Я. М. Математичні моделі властивостей високоміцних цементобетонів для дорожнього будівництва. Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. 2017. Вип. 169. С. 103–110.
 8. Hussan S., Kamal M., Khan M. Determining the contribution of different structural layers of asphalt pavement system to rutting using transverse profile analysis. American Journal of Civil Engineering and Architecture. 2013. Vol. 1. № 6. P. 174–180.
 9. Onischenko A., Aksenov S., Nevynhlovskyy V. Numerical Simulation of Stress-Strain State of Asphalt Concrete Pavement on the Carriageway of the South Bridge in Kiev. Procedia Engineering. 2016. Vol. 134. P. 322–329.
 10. Батракова А. Г., Ряпухін В. М., Дорожко Є. В. Проектування асфальтобетонних покриттів на жорсткій основі. Частина 2. Розрахунок асфальтобетонних покриттів на жорсткій основі за критеріями міцності: монографія. Харків: ХНАДУ, 2020. 110 с.
 11. Ryapuhin V., Nechytyaylo N., Burlachka V. Criteria for flexible pavement calculation. TRANSBALTICA 2011: Proceedings of the 7th International Scientific Conference, Vilnius, 5–6 may 2011. Pp. 252–256.
 12. Арсеньєва Н. О. Удосконалення методу розрахунку нежорстких дорожніх одягів з урахуванням критерію міцності асфальтобетонних шарів на зсув: дис. ...канд. техн. наук: 05.22.11. Харків, 2014. 213 с.
- rigid base: thesis. ...candidate technical Sciences: 05.22.11. Kharkiv, 280.
6. Dorozhko, Y. (2015). Taking into account the combined effect of external load and temperature when calculating thin asphalt concrete layers on a rigid base. Scientific bulletin of construction. 4. 132–136.
 7. Hamelyak, I., Shurgaya, A., Yakymenko, Y. (2017). Mathematical models of the properties of high-strength cement concrete for road construction. Collection of scientific works of the Ukrainian State University of Railway Transport. 169. 103–110.
 8. Hussan, S., Kamal, M., Khan, M. (2013). Determining the contribution of different structural layers of asphalt pavement system to rutting using transverse profile analysis. American Journal of Civil Engineering and Architecture. 1/6. 174–180.
 9. Onischenko, A., Aksenov, S., Nevynhlovskyy, V. (2016). Numerical Simulation of Stress-Strain State of Asphalt Concrete Pavement on the Carriageway of the South Bridge in Kiev. Procedia Engineering. 134. 322–329.
 10. Batrakova, A., Ryapukhin, V., Dorozhko, Y. (2020). Design of asphalt concrete coatings on a rigid basis. Part 2. Calculation of asphalt concrete coatings on a rigid base according to strength criteria: monograph. 110.
 11. Ryapuhin, V., Nechytyaylo, N., Burlachka, V. (2011). Criteria for flexible pavement calculation. TRANSBALTICA 2011. Proceedings of the 7th International Scientific Conference. 252–256.
 12. Arsenyeva, N. (2014). Improvement of the method of calculation of non-rigid road surfaces taking into account the shear strength criterion of asphalt concrete layers: diss. ...candidate technical Sciences: 05.22.11. Kharkiv, 213.

References

1. Tolmachev, S. (2013). Construction of highways with cement concrete coating in Ukraine is a reality today. Avtoshlyahovik Ukraïni. 4. 36–40.
2. Gamelyak, I., Korec'kij, A., Korec'kij, S. (2013). About the need to build cement-concrete roads in Ukraine. Avtoshlyahovik Ukraïni. 5. 24–31.
3. Dorozhko, E., Ryapuhin, V., Makovyey, R. (2016). Design procedure by strength criteria of asphalt layers on a rigid base taking into account the simultaneous action of external loads and thermal stresses. Procedia Engineering. 134. 101–108.
4. Onischenko, A., Kovalchuk, V., Zagorodniy, O. (2023). Determining the residual service life of polymer-modified asphalt concrete pavement on road bridges. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 3. 1(123). 41–51.
5. Dorozhko, Y. (2016). Improvement of the calculation method of thin asphalt concrete layers on a

Батракова Анжеліка Геннадіївна¹, д.т.н, проф. каф. проектування доріг, геодезії і землеустрою, гр@khadi.kharkov.ua, тел. 38(057)707-37-32

Дорожко Євген Вікторович¹, к.т.н., доц. каф. проектування доріг, геодезії і землеустрою, evgeniy.dorozhko@gmail.com, тел. +380680699722,

Урдзік Сергій Миколайович¹, к.т.н., доц. каф. проектування доріг, геодезії і землеустрою, гр@khadi.kharkov.ua, тел. 38(057)707-37-32

Шелкова Ірина Сергіївна¹, асист. каф. проектування доріг, геодезії і землеустрою, irinagunko98@gmail.com, тел. 38(057)707-37-32.

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, 61002, Україна.

Analysis of the stress-deformed state of the structure of road clothing depending on the location of the load relative to the edges of the combined slab

Abstract. Problem. Cement-concrete coatings are characterized by the complexity of repair work, therefore, for their repair or new construction, it is advisable to use asphalt-concrete coating. This constructive solution during the repair of cement concrete slabs helps to improve their technical and operational condition since the asphalt concrete layer performs the function of a protective or wear-resistant layer on cement concrete slabs. The operating conditions of asphalt concrete layers on cement concrete slabs are significantly different from those typical for other structural solutions. The existing methods of calculating the strength of asphalt concrete coatings for hard road wear are not accurate enough, because they take into account only certain criteria of the strength of the asphalt concrete layer. The specifics of the stress-strain state of the asphalt concrete layer on cement concrete slabs under different load conditions, such as the middle of the slab, the edge of the slab, and the corner of the slab, are not taken into account. Given the complex stress-strain state of the asphalt concrete layer on a rigid base, the analysis of the stress-strain state is particularly relevant, aimed at determining the most dangerous variant of the location of the transport load to ensure the strength of the asphalt concrete layer. **Goal.** The purpose of this article is to determine the stress-deformed state of an asphalt concrete layer on a rigid base with various options for applying a transport load, which will allow the establishment of the most dangerous option for the location of the load. **Methodology.** General methods of solving problems of the mechanics of a deformed solid body were used to develop a calculation scheme and select a material model. Simulation of the stress-strain state of the road surface was carried out using the finite element method using the ANSYS software complex, investigating three options for placing the transport load: in the center of the slab, on its edge, and in the corner. **Results.** According to the results of the simulation of the stress-strain state of a combined slab made of an asphalt concrete layer on a rigid base, it was established that the edge of the slab is the most

unsafe both in terms of tensile and shear stresses for a cement concrete slab. For the asphalt concrete layer, placing the load in the corner of the slab is the most dangerous both in terms of tangential shear stresses and Mises stresses. **Originality.** According to the results of the simulation of the stress-strain state of a combined slab made of an asphalt concrete layer on a rigid base, it was established that the edge of the slab is the most unsafe both in terms of tensile and shear stresses for a cement concrete slab. **Practical value.** Based on the results of modeling the stress-strain state of a combined slab made of an asphalt concrete layer on a rigid base, it was established that the edge of the slab is the most dangerous both in terms of tensile and shear stresses for a cement concrete slab. For the asphalt concrete layer, placing the load in the corner of the slab is the most dangerous both in terms of tangential shear stresses and Mises stresses.

Keywords: asphalt concrete layer, finite element method, modulus of elasticity, load, stress, cement concrete slab.

Batrakova Angelika G.,

Dr. Techn. Sci., Professor of Department of Highway Design, Geodesy and Land Management
rp@khadi.kharkov.ua
tel.+38(057)707-37-32

Dorozhko Yevhen¹, Ph.D, Associate Professor of the Department of Highway Design, Geodesy and Land Management,
evgeniy.dorozhko@gmail.com,
tel +380680699722,

Urdzik Sergey¹, Ph.D, Associate Professor of the Department of Highway Design, Geodesy and Land Management,
rp@khadi.kharkov.ua,
tel. 38(057)707-37-32

Shelkova Iryna¹, assistant of the Department of Highway Design, Geodesy and Land Management,
irinagunko98@gmail.com,
tel. 38(057)707-37-32.

¹Kharkov National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine.