

УДК 625.852

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2024.106.0.115

## МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ КОНСТРУКЦІЇ ДОРОЖНЬОГО ОДЯГУ З ОГЛЯДУ НА СУМІСНУ ДІЮ ВЕРТИКАЛЬНОГО ТИСКУ ТА ГОРИЗОНТАЛЬНОЇ СИЛИ ВІД ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

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

***Анотація.** Подано результати досліджень щодо визначення напружено-деформованого стану різних конструкцій дорожнього одягу, що складається з асфальтобетонного покриття на цементобетонній плиті, від дії транспортного навантаження та здійснено їхній аналіз. Наведено результати аналізу літературних даних щодо переваги використання жорсткого дорожнього одягу з порівняння з нежорстким за умов постійного збільшення інтенсивності руху та навантаження від транспортних засобів. Визначення напружено-деформованого стану асфальтобетонних шарів на цементобетонних плитах під дією вертикального тиску від транспортних засобів та горизонтальної сили від тягового зусилля чи гальмування транспортних засобів здійснено за допомогою методу кінцевих елементів. Аналіз результатів моделювання дозволив визначити вплив модулів пружності конструктивних шарів, товщин шарів та умов руху транспортного засобу (величини горизонтальної сили) на закономірності зміни напружено-деформованого стану асфальтобетонного шару на цементобетонній плиті.*

***Ключові слова:** асфальтобетонний шар, модуль пружності, напружено-деформований стан, розташування навантаження, цементобетонна плита.*

### Вступ

В Україні та світі більша частина вантажів перевозиться автомобільним транспортом. Як зазначає І. П. Гамеляк [1], протягом багатьох років спостерігається збільшення інтенсивності руху (більш ніж удвічі за десять років), навантаження на вісь (від 60 кН–100 кН до 115 кН–130 кН) та тиску (від 0,45 МПа–0,60 МПа до 0,85 МПа–0,90 МПа). Конструкції нежорсткого дорожнього одягу не розраховані на таке навантаження, що призводить до катастрофічного руйнування дорожнього покриття, зокрема в теплу пору року.

### Аналіз публікацій

У дослідженнях І. П. Гамеляка, С. М. Толмачова та ін. доводиться доцільність процесу будівництва доріг з використанням дорожнього одягу жорсткого типу, оскільки він має високу міцність і більший на відміну від інших термін експлуатації [1–5]. Важливими є й економічні аспекти будівництва бетонних покриттів. В Україні спостерігається нестача власної сировини для виробництва дорожнього бітуму, а випуск цементу майже не обмежений через наявність сировини та ресурсів. Процес ремонту цементобетонних покриттів є досить складним, тому найчастіше на них укладають шар із асфальтобетону. Таке конструктивне рішення під час ремонту

цементобетонних плит дозволяє покращити їх транспортно-експлуатаційний стан [6]. Однак у цьому випадку на асфальтобетонні шари на жорсткій основі впливають навантаження від дії транспортних засобів та температурних деформацій і напружень [7].

Конструкції дорожнього одягу з асфальтобетонним покриттям на цементобетонних плитах використовуються досить давно. Спочатку жорсткі шари основи розглядалися як звичайні конструктивні шари без урахування їхньої підвищеної жорсткості [8, 9], потім враховувався той факт, що на твердій основі з'являються температурні тріщини, які згодом впливають на стан покриття [10].

Найвні методи розрахування як нежорстких, так і жорстких дорожніх одягів ґрунтуються на теорії пружності. Нині визначено, що найбільш продуктивним способом розрахування інженерних конструкцій є розрахування за критеріями міцності [11, 12].

Під час дорожнього будівництва розроблено недостатньо досконали методи конструювання та розрахування міцності асфальтобетонних шарів на цементобетонних плитах. Нормуються лише окремі критерії міцності асфальтобетонного шару, не враховується одночасність дії температурних напружень і напружень, викликаних дією транспортних засобів, також не враховуються особливості змін, що відбуваються з асфальто-

бетонним шаром на цементобетонних плитах, вплив горизонтальної сили від гальмування транспортних засобів тощо [7, 13]. Відповідно до вищезазначеного, теоретична основа процесу розрахування міцності асфальтобетонного шару на цементобетонних плитах розроблена недостатньо. Недосконалість методик розрахування за критеріями міцності асфальтобетонного шару на цементобетонних плитах призводить до передчасних руйнувань асфальтобетонного шару та, як наслідок, зниження міжремонтного терміну [7]. Отже, для розроблення методики розрахування міцності асфальтобетонних шарів на цементобетонних плитах необхідно визначити та проаналізувати весь тензор напружень в асфальтобетонному шарі з огляду на вертикальний тиск та горизонтальну силу від транспортних засобів.

#### Мета та постановка завдання

Метою проведеного дослідження є визначення та аналіз напружено-деформованого стану асфальтобетонного шару на цементобетонній плиті від дії транспортного навантаження.

#### Розроблення розрахункової моделі асфальтобетонного шару на цементобетонній плиті

Визначення напружено-деформованого стану асфальтобетонних шарів на цементобетонних плитах під дією вертикального тиску від транспортних засобів та горизонтальної сили від тягового зусилля або гальмування транспортних засобів здійснено за допомогою методу кінцевих елементів. Для визначення напруження в асфальтобетонних шарах на цементобетонних плитах використані тришарові моделі, що складаються з асфальтобетонного шару, цементобетонної плити, пружної основи [7, 14]. Асфальтобетонний шар визначається модулем пружності, коефіцієнтом Пуассона та товщиною. Значення модуля пружності та коефіцієнта Пуассона залежать від температури асфальтобетонного шару. Цементобетонна плита визначається модулем пружності та коефіцієнтом Пуассона, пружна основа – загальним (еквівалентним) модулем пружності та коефіцієнтом Пуассона. На поверхні моделі прикладено вертикальне навантаження та горизонтальну силу, яка імітує тягове зусилля або зусилля від гальмування. Місцем застосування навантаження щодо країв цементобетонної плити, обмеженої температурними швами, є середина цементобе-

тонної плити. Відповідно до робіт [15, 17] асфальтобетонним шаром є в'язко-пружне тіло, тобто шар деформується без залишкових деформацій, але з урахуванням часу розвитку напружено-деформованого стану. В'язко-пружне деформування не має властивості повзучості [15]. Асфальтобетон є твердим тілом, що має власну форму, певний об'єм і здатність чинити опір впливу зовнішнього навантаження [18]. Згідно з сучасними уявленнями про вплив структури та текстури на напружено-деформований стан твердого тіла, у процесі дослідження асфальтобетонних шарів матеріал є квазіоднорідним і квазіізотропним тілом відповідно до [7, 15, 18, 19].

Розрахункова модель є шаруватим напівпростором із забезпеченим зчепленням між асфальтобетонним та цементобетонним шарами. Її розміри згідно з дослідженням [20] становили 2 м на 2 м на 2 м. Схема розрахункової моделі наведена на рисунку 1. Навантаження прикладалось на поверхні моделі вздовж кола, діаметром  $D$ .

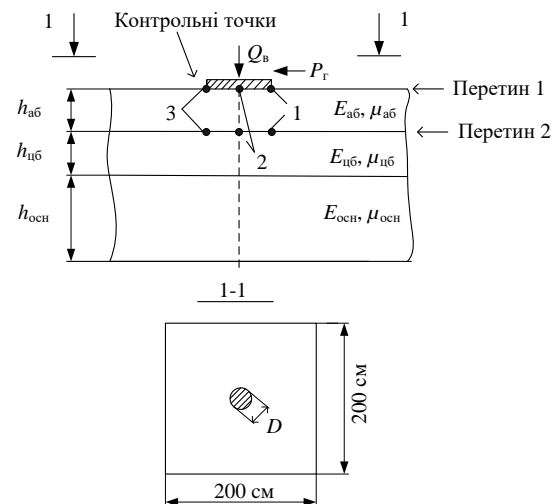


Рис. 1. Схема розрахункової моделі асфальтобетонного шару на цементобетонній плиті

#### Порівняння результатів моделювання з відомими апробованими рішеннями

Для підтвердження правильності результатів моделювання здійснено зіставлення значень напружень, отриманих методом кінцевих елементів, і напружень, отриманих за аналітичними рішеннями проф. В. П. Плевако [21, 23], для конструкцій із жорстким шаром, які визнаються коректними, апробованими та достовірними. Значення напружень, отриманих методом кінцевих елементів, та напружень, отриманих за аналітичними рішеннями проф. В. П. Плевако, коректно порівнювати,

оскільки в обох випадках досліджується напружено-деформований стан багат шарового пружного напівпростору за осесиметричного навантаження, рівномірно розподіленого за площею кола.

Для перевірки адекватності та достовірності цієї моделі було здійснено моделювання напружено-деформованого стану асфальтобетонного шару на цементобетонних плитах з

різними товщинами та модулями пружності. Параметри моделей наведено в табл. 1.

Параметри моделей мають охоплювати весь діапазон товщин і модулів пружності конструктивних шарів, які були використані для моделювання, це дасть можливість порівняти отримані результати та довести їх правильність.

Результати розрахунків наведено в табл. 2.

Таблиця 1 – Параметри моделей, використаних для пошукового моделювання

Параметр	Номер моделі															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Товщина асфальтобетонного шару, см	2	5	7	10	2	5	7	10	2	5	7	10	2	5	7	10
Товщина цементобетонного шару, см	20				28				20				28			
Модуль пружності асфальтобетонного шару, МПа	5000								400							
Коефіцієнт Пуассона асфальтобетонного шару	0,25								0,40							
Модуль пружності цементобетонного шару, МПа	27000															
Коефіцієнт Пуассона цементобетонного шару, МПа	0,15															
Модуль пружності та коефіцієнт Пуассона основи, МПа	150 / 0,30															

Таблиця 2 – Приклад порівняння напружень, визначених методом кінцевих елементів, з напруженнями, визначеними за рішеннями проф. В. П. Плевако

Модель	Розташування перерізу	Напруження за методом кінцевих елементів, МПа		Напруження за проф. В. П. Плевако, МПа		Відносна похибка, %	
		$\sigma_z$	$\sigma_x, \sigma_y$	$\sigma_z$	$\sigma_x, \sigma_y$	$\sigma_z$	$\sigma_x, \sigma_y$
1	2	3	4	5	6	7	8
1	A	-0,800	-0,699	-0,800	-0,725	0,0	3,6
	B	-0,799	-0,655	-0,799	-0,677	0,0	3,4
	C	-0,809	-0,670	-0,797	-0,632	1,5	5,7
	D	-0,033	1,937	-0,035	1,883	6,1	2,8
2	A	-0,800	-0,705	-0,800	-0,734	0,0	4,1
	B	-0,793	-0,613	-0,793	-0,637	0,0	3,9
	C	-0,785	-0,581	-0,774	-0,553	1,4	4,8
	D	-0,031	1,780	-0,032	1,708	3,2	4,1
3	A	-0,800	-0,680	-0,800	-0,714	0,0	5,0
	B	-0,790	-0,571	-0,791	-0,594	0,0	4,0
	C	-0,765	-0,527	-0,754	-0,503	1,4	4,5
	D	-0,029	1,668	-0,030	1,589	3,4	4,7

Завершення табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8
4	A	-0,800	-0,677	-0,800	-0,691	0,0	2,1
	B	-0,795	-0,532	-0,795	-0,522	0,0	1,9
	C	-0,740	-0,422	-0,720	-0,435	2,7	3,1
	D	-0,028	1,386	-0,027	1,417	3,6	2,3
5	A	-0,800	-0,527	-0,800	-0,554	0,0	5,1
	B	-0,800	-0,503	-0,800	-0,528	0,0	5,0
	C	-0,800	-0,488	-0,799	-0,503	0,1	3,1
	D	-0,018	1,071	-0,019	1,124	5,5	4,9
6	A	-0,800	-0,529	-0,800	-0,560	0,0	5,9
	B	-0,796	-0,478	-0,796	-0,504	0,0	5,4
	C	-0,798	-0,469	-0,784	-0,457	1,8	2,6
	D	-0,017	0,991	-0,018	1,041	5,9	5,0
7	A	-0,800	-0,522	-0,800	-0,547	0,0	4,8
	B	-0,795	-0,451	-0,795	-0,477	0,0	5,7
	C	-0,783	-0,439	-0,771	-0,427	1,5	2,7
	D	-0,017	0,957	-0,017	0,984	0,0	2,8

Позначення розташування перерізу в таблицях такі:

- A – поверхня асфальтобетонного шару;
- B – середина асфальтобетонного шару;
- C – низ асфальтобетонного шару;
- D – низ цементобетонної плити.

Відносна похибка у значеннях напружень, визначених за аналітичними рішеннями проф. В. П. Плевако та в процесі чисельного моделювання з використанням методу кінцевих елементів, не перевищує 6 %.

#### Моделювання напружено-деформованого стану асфальтобетонного шару на цементобетонній плиті від дії транспортного навантаження

Під час досліджень визначалися напруження на поверхні асфальтобетонного шару та в зоні його контакту з цементобетонною плитою. Як контрольні використовувалися точки, що знаходяться на поверхні моделі (перетин 1 на рис. 1) і на нижній поверхні асфальтобетонного шару (перетин 2 на рис. 1) на осі штампа з навантаженням (точка 2 на рис. 1) і на його краях (точки 1 і 3 рис. 1).

Навантаження прикладалося через штамп круглої форми, діаметр якого дорівнює відбитку сліду колеса розрахункового автомобіля

групи А2 відповідно до ДБН В.2.3-4 [24]. Розрахункове навантаження групи А<sub>2</sub> відповідало величині вертикального навантаження 0,8 МПа, діаметр штампа дорівнював 34,5 см, горизонтальна сила приймалася в межах від 5 кН (для прямолінійних ділянок на перегоні) до 40 кН (для умов екстреного гальмування) [7, 15].

Під час моделювання використовувалися поєднання таких параметрів:

- модуль пружності та коефіцієнт Пуассона цементобетонної плити ( $E_{цб} = 27000$  МПа,  $\mu_{цб} = 0,15$ );
- товщина цементобетонної плити варіювалася в діапазоні від 20 см до 28 см;
- товщина асфальтобетонного шару становила 2 см; 5 см; 7 см та 10 см;
- модуль пружності асфальтобетону E – 5000 МПа; 4000 МПа; 3000 МПа; 2000 МПа; 1000 МПа та 400 МПа.

Приклад результатів моделювання наведено в табл. 3.

Аналіз результатів моделювання дозволив визначити, що за зміни модуля пружності асфальтобетонного шару напруження змінюються лінійно (рис. 2).

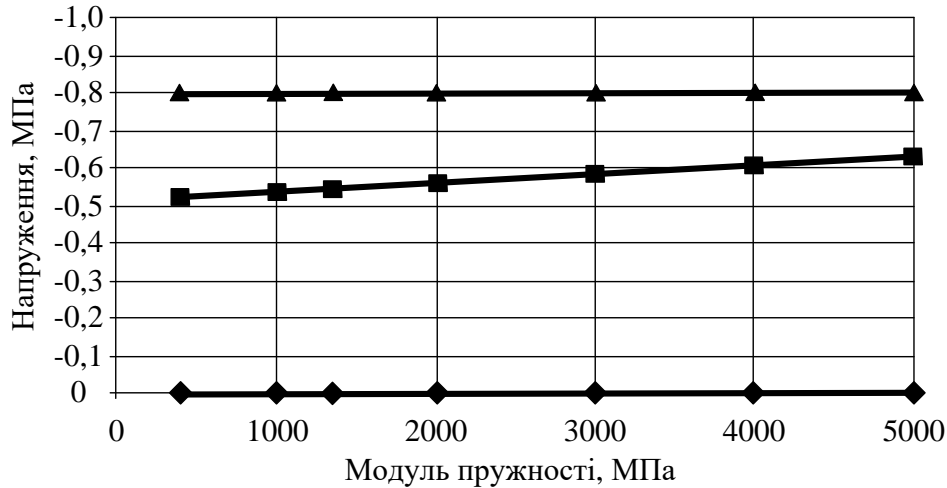
Таблиця 3 – Частина зведеної таблиці напружень

Вертикальне навантаження, прикладене в розмірі 0,8 МПа, діаметр штамп –  $d_{шт} = 34,5$  см, горизонтальна сила – 40 кН

Товщина цементобетонної плити $h_{цб}$ , см	Розташування перерізу вздовж глибини								Розташування перерізу щодо осі штамп (рис. 1)
	поверхня моделі (асфальтобетонного шару)				нижня поверхня асфальтобетонного шару				
	товщина асфальтобетонного шару $h_{аб}$ , см								
	2	5	7	10	2	5	7	10	
	Напруження $\sigma_x$ , МПа								
20	0,529	0,458	0,338	0,306	-0,055	-0,215	-0,243	-0,252	Край штамп (точка 1)
	-0,618	-0,544	-0,524	-0,431	-0,884	-0,716	-0,72	-0,589	Вісь штамп (точка 2)
	-0,949	-0,943	-0,853	-0,828	-0,850	-0,688	-0,623	-0,553	Край штамп (точка 3)
24	0,537	0,467	0,348	0,316	0,050	-0,177	-0,214	-0,234	Край штамп (точка 1)
	-0,605	-0,529	-0,508	-0,418	-0,798	-0,672	-0,641	-0,571	Вісь штамп (точка 2)
	-0,938	-0,930	-0,840	-0,816	-0,792	-0,667	-0,608	-0,547	Край штамп (точка т.3)
28	0,542	0,473	0,355	0,322	-0,010	-0,139	-0,182	-0,166	Край штамп (точка 1)
	-0,597	-0,520	-0,499	-0,410	-0,756	-0,635	-0,611	-0,551	Вісь штамп (точка 2)
	-0,931	-0,922	-0,831	-0,809	-0,765	-0,643	-0,588	-0,534	Край штамп (точка 3)
Напруження $\tau_{xz}$ , МПа									
20	-0,270	-0,315	-0,299	-0,257	-0,085	0,041	0,074	0,086	Край штамп (точка 1)
	-1,307	-0,580	-0,476	-0,348	-0,753	-0,355	-0,265	-0,205	Вісь штамп (точка 2)
	-0,483	-0,499	-0,473	-0,448	-0,517	-0,500	-0,466	-0,411	Край штамп (точка 3)
24	-0,270	-0,315	-0,299	-0,257	-0,088	0,037	0,069	0,082	Край штамп (точка 1)
	-1,308	-0,580	-0,476	-0,348	-0,747	-0,345	-0,265	-0,205	Вісь штамп (точка 2)
	-0,483	-0,499	-0,473	-0,448	-0,520	-0,508	-0,472	-0,415	Край штамп (точка 3)
28	-0,270	-0,315	-0,299	-0,257	0,089	0,035	0,066	0,080	Край штамп (точка 1)
	-1,308	-0,580	-0,476	-0,348	-0,741	-0,343	-0,264	-0,205	Вісь штамп (точка 2)
	-0,483	-0,499	-0,473	-0,448	-0,516	-0,502	-0,468	-0,414	Край штамп (точка 3)

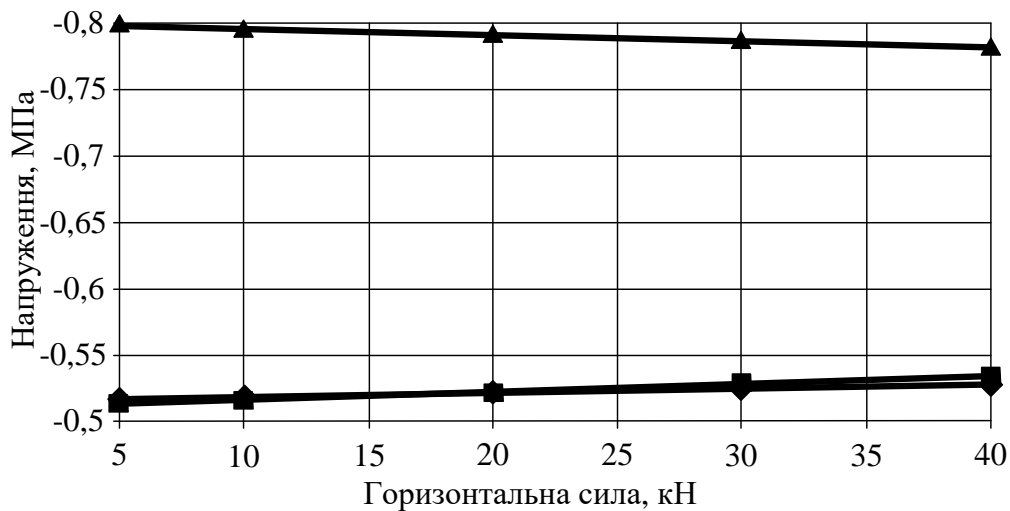
Перевірку наведеної залежності здійснено для діапазону модулів пружності асфальтобетону від 400 МПа до 5000 МПа за величин горизонтальної сили від 5 кН до 40 кН. Тому надалі можна здійснити лінійну інтерполяцію значень напружень за модулями пруж-

ності сусідніх значень. За результатами чисельного моделювання визначено, що в разі зміни горизонтальної сили в діапазоні від 5 кН до 40 кН напруження змінюються за лінійною залежністю (рис. 3 та 4).



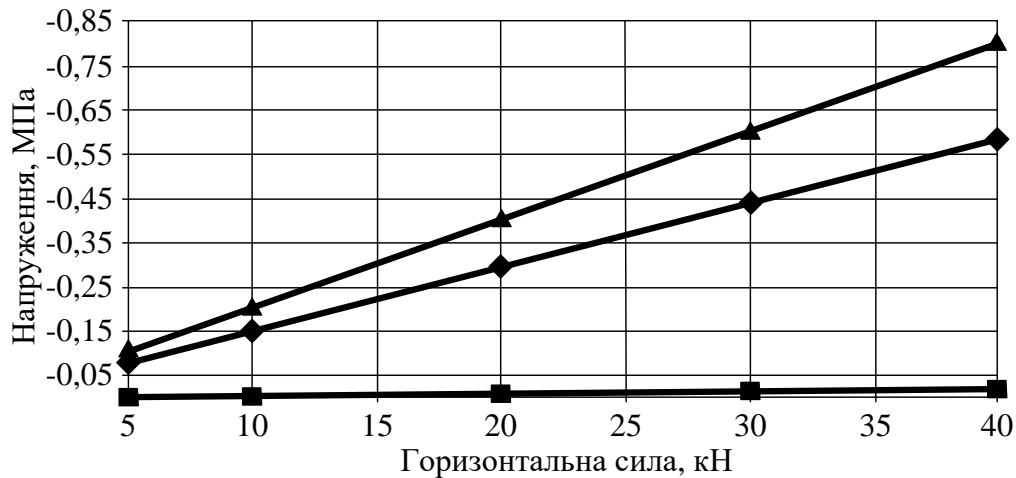
Позначення напружень на графіку: ■ –  $\sigma_x = \sigma_y$ ; ▲ –  $\sigma_z$ ; ◆ –  $\tau_{xy} = \tau_{yz} = \tau_{xz}$

Рис. 2. Залежність напруження на осі штампів на поверхні моделі від модуля пружності асфальтобетонного шару (точка 2 на перерізі 1 із рис. 1)



Позначення напружень на графіку: ▲ –  $\sigma_z$ ; ◆ –  $\sigma_x$ ; ■ –  $\sigma_y$

Рис. 3. Залежність напружень на осі штампів на поверхні моделі від величини горизонтальної сили (точка 2 на перерізі 1 із рис. 1)



Позначення напружень на графіку: ▲ –  $\tau_{xy}$ ; ■ –  $\tau_{yz}$ ; ◆ –  $\tau_{xz}$

Рис. 4. Залежність дотичних напружень на осі штампів поверхні моделі від величини горизонтальної сили (точка 2 на перерізі 1 з рис. 1)

Ця залежність дійсна для вибраного під час моделювання інтервалу значень модулів пружності асфальтобетонного шару й товщин конструктивних шарів. Тому для визначення напружень від дії горизонтальної сили в діапазоні значень від 5 кН до 40 кН можна скористатися лінійною інтерполяцією.

### Висновки

Аналіз результатів моделювання напружено-деформованого стану асфальтобетонного шару на жорсткій основі дозволив визначити, що:

– збільшення товщини цементобетонної плити від 20 см до 28 см або товщини асфальтобетонного шару від 2 см до 10 см призводить до зниження напружень  $\sigma_x$  і  $\sigma_y$  на осі штампа вздовж всієї товщини асфальтобетонного шару;

– напруги  $\sigma_x$  та  $\sigma_y$  збільшуються вздовж глибини асфальтобетонного шару, досягаючи максимальних значень на контактній асфальтобетонного шару та цементобетонної плити;

– збільшення горизонтальної сили від 5 кН до 40 кН призводить до зростання напружень  $\sigma_x$  і  $\sigma_y$ ;

– стискальне напруження  $\sigma_x$  і  $\sigma_y$  перед штампом (точка 3 на рисунку 1) завжди більше, ніж на осі штампа або за штампом (точки 2 і 1 на рисунку 1);

– збільшення товщини асфальтобетонного шару призводить до зростання напружень  $\sigma_z$  на краях штампа на поверхні асфальтобетонного шару та на контактній шарів. Зміна товщини цементобетонної плити в діапазоні від 20 см до 28 см не впливає на значення напружень в асфальтобетонному шарі;

– зміна товщини цементобетонної плити від 20 см до 28 см не впливає на величину дотичних напружень  $\tau_{yz}$  та  $\tau_{xy}$  на поверхні асфальтобетонного шару та на контактній асфальтобетонного та цементобетонного шарів. Дотичні напруження  $\tau_{xz}$  на поверхні асфальтобетонного шару не залежать від товщини цементобетонної плити;

– збільшення товщини асфальтобетонного шару від 2 см до 10 см призводить до зниження дотичних напружень  $\tau_{xz}$  на поверхні асфальтобетонного шару та на контактній шарів;

– дотичні напруження  $\tau_{xz}$ ,  $\tau_{yz}$  та  $\tau_{xy}$  значно зростають у разі збільшення значення горизонтальної сили. Наведені висновки є правильними для варіанта застосування транспортного навантаження всередині плити. У подальших дослідженнях доречно здійснити

такий аналіз для варіантів застосування навантаження поблизу температурних швів.

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

### Література

1. 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.
2. Левківська Л. В., Елаллак Д. М. Аналіз факторів впливу на міцність зчеплення між асфальтобетонними шарами дорожнього одягу. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво: науково-технічний збірник. 2021. Вип. 109. 26–32.
3. Onyshchenko 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)). 41–51.
4. Гамеляк, І. П., Смолянець В. В. Застосування цементобетонного покриття в дорожньому будівництві. Дорожня галузь України. 2013. № 6. С. 46–51.
5. Толмачев С. М. Будівництво автодоріг із цементобетонним покриттям в Україні – реальність сьогодні. Автошляховик України. 2013. № 4. С. 36–40.
6. Гаркуша М. В. Підвищення стійкості до утворення колії асфальтобетонного покриття нежорсткого дорожнього одягу. Дороги і мости: збірник наукових праць, 2017. Вип. 17. 27–41.
7. Дорожко. Є. В. Удосконалення методу розрахунку тонких асфальтобетонних шарів на жорсткій основі: дис. ...канд. техн. наук: 05.22.11. Харків, 2016. 280 с.
8. Assessment of the Dynamic Impact of a Truck on the Bridge Pavement Based on the Proposed Mathematical Model of Vehicle Movement Nanotechnology Perceptions / O. Slavinska and other. 2024. 20(S1). 231–251.
9. Shakhan, Mohammad Razeq & Topal, Ali & Sengoz, Burak. Investigation of asphalt concrete mixture types in different layers in asphalt pavement: a mechanistic approach. Journal of Engineering Research. 2023. 11.
10. Іщенко, О. М. Розробка методики розрахунку на температурну тріщиностійкість асфальтобетонного покриття штучних споруд автомобільних доріг: дис. ...канд. техн. наук: 05.22.11. Київ, 2003. 180 с.
11. Моделювання напружено-деформованого стану конструкції дорожнього одягу під дією транспортних навантажень / В. В. Гайдачук

- та ін. Опір матеріалів і теорія споруд. 2017. Вип. 99. 45–57.
12. Rys D. Consideration of dynamic loads in the determination of axle load spectra for pavement design. *Road Materials and Pavement Design*. 2021. 22. (6). 1309–1328.
  13. Determining the most dangerous loading application point for asphalt-concrete layers on a rigid base / Y. Dorozhko and other. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 3. Issue 7–99. P. 36–43.
  14. Kushnir O. V., Hamelak I. P., Raikovsky V. F. Design of a design of road clothes for transportation of heavy and large-sized freights by roads of Ukrain. *Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences*. 2020. VIII(30). 244. 53–62.
  15. Арсеньева, 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.
  16. Golchin B. Optimization in producing warm mix asphalt with polymer modified binder and surfactant-wax additive. *Construction and Building Materials*. 2017. Vol. 141. P. 578–588.
  17. Implementation of Performance-Based HMA Specialty Mixtures in New Jersey / T. Bennert and other. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*. 2011. № 80. P. 719–758.
  18. Ryapuhin V., Nechytaylo N., Burlachka V. Criteria for flexible pavement calculation. *TRANSBALICA 2011: proceedings of the 7th International Scientific Conference*. 2011. P. 252–256.
  19. Олійник А. П., Незамай, Б. С., Пулик, В. І. Mathematical model of the process estimation of the deformation of the road surface. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2014. 3(4(69)). 49–54.
  20. Full-Scale Pavement Testing of a High Polymer-Modified Asphalt Concrete Mixture / Jh. Habbouche and other. *Journal of Testing and Evaluation*. 2022. 50. 20210283.
  21. Dorozhko E., Ryapuhin V. Limit states and strength criteria of thin asphaltic concrete layers on rigid base. *Proceedings of 15th International Conference. Transport Means. Kaunas University of Technology. Kaunas, Lithuania: Technologija*. 2011. P. 254–257.
  22. Дорожко Є. В. Врахування сумісної дії зовнішнього навантаження та температури при розрахунках тонких асфальтобетонних шарів на жорсткій основі. *Науковий вісник будівництва ХНУБА*. 2015. Вип. 4/82. С. 132–136.
  23. Дорожко Є. В., Ряпухін В. М. Аналіз впливу складових температурного деформування цементобетонної плити на напружено-деформований стан асфальтобетонного шару на жорсткій основі. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 2015. Вип. 93. С. 172–180.
  24. ДБН В.2.3-4:2015. Автомобільні дороги. [Чинний від 2016–04–01]. Київ, 2015. 109 с.

### References

1. Hameliak, I. P., Koretskyi, A. S., Koretskyi, S. S. (2013). About the need to build cement-concrete roads in Ukraine. *SUV of Ukraine*. No. 5. P. 24–31.
2. Levkivska, L. V., Elallak, D. M. (2021). Analysis of influencing factors on the strength of adhesion between asphalt concrete layers of road wear Motor roads and road construction. *Scientific and technical collection*. 109. 26–32.
3. Onyshchenko, 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.
4. Hameliak, I. P., Smolyanets, V. V. (2013). Application of cement-concrete coating in road construction. *Road industry of Ukraine*. No. 6. P. 46–51.
5. Tolmachev, S. M. (2013). Construction of highways with cement concrete coating in Ukraine – today's reality. *SUV of Ukraine*. No. 4. P. 36–40.
6. Harkusha, M. V. (2017). Increasing the resistance to rutting of asphalt concrete covering of non-rigid road surface. *Roads and bridges: collection of scientific works*. 17. 27–41.
7. Dorozhko, E. V. (2016). Improvement of the calculation method of thin asphalt concrete layers on a rigid base: dissertation. ...candidate technical Science: 05.22.11. Kharkiv, 2016. 280 p.
8. Slavinska, O., Bubela, A., Razboinikov, O., Ivanushko, O., Kozarchuk, I. (2024). Assessment of the Dynamic Impact of a Truck on the Bridge Pavement Based on the Proposed Mathematical Model of Vehicle Movement Nanotechnology Perceptions. 20(S1). 231–251.
9. Shakhani, Mohammad Razeq & Topal, Ali & Sengoz, Burak. (2023). Investigation of asphalt concrete mixture types in different layers in asphalt pavement: a mechanistic approach. *Journal of Engineering Research*. 11.
10. Ishchenko, O. M. (2003). Development of a methodology for calculating the temperature crack resistance of asphalt concrete pavement of artificial highway structures: diss. ...candidate technical Science: 05.22.11. Kyiv, 180 p.
11. Gaidaichuk, V. V., Mozgoviy, V. V., Zayets Yu. O., Shevchuk, L. V. (2017). Modeling of the stress-strain state of the structure of road clothing under the action of traffic loads. *Resistance of materials and theory of structures*. 99. 45–57.
12. Rys, D. Consideration of dynamic loads in the determination of axle load spectra for pavement design. *Road Materials and Pavement Design*. 2021. 22. (6). 1309–1328.
13. Dorozhko, Y., Arsenieva, N., Sarkisian, H., Synovets, O. (2019). Determining the most dangerous loading application point for asphalt-



- concrete layers on a rigid base. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Vol. 3. Issue 7–99. P. 36–43.
14. Kushnir, O. V., Hamelak, I. P., Raikovsky, V. F. (2020). Design of a design of road clothes for transportation of heavy and large-sized freights by roads of Ukrain. Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences. VIII(30). 244. 53–62.
  15. Arsenyeva, N. O. (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 Science: 05.22.11. Kharkiv, 213 p.
  16. Golchin, B. (2017). Optimization in producing warm mix asphalt with polymer modified binder and surfactant-wax additive. Construction and Building Materials. Vol. 141. P. 578–588.
  17. Bennert, T., Fee, F., Sheehy, E., Blight, R. (2011). Implementation of Performance-Based HMA Specialty Mixtures in New Jersey. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists. № 80. P. 719–758.
  18. Ryapuhin, V., Nechytaylo, N., Burlachka, V. (2011). Criteria for flexible pavement calculation. Transbaltica 2011: proceedings of the 7th International Scientific Conference. P. 252 – 256.
  19. Oliynyk, A. P., Nezamai, B. S., & Pulik, V. I. (2014). Mathematical model of the process estimation of the deformation of the road surface. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 3(4(69)). 49–54.
  20. Habbouche, Jhony & Piratheepan, Murugaiyah & Hajj, Elie & Bista, Sailesh & Sebaaly, Peter. (2022). Full-Scale Pavement Testing of a High Polymer-Modified Asphalt Concrete Mixture. Journal of Testing and Evaluation. 50. 20210283.
  21. Dorozhko, E., Ryapuhin, V. (2011). Limit states and strength criteria of thin asphaltic concrete layers on rigid base. Proceedings of 15th International Conference. Transport Means. Kaunas University of Technology. Kaunas, Lithuania: Technologija. P. 254–257.
  22. Dorozhko, E. V. (2015). Taking into account the combined effect of external load and temperature in the calculation of thin asphalt concrete layers on a rigid base. Scientific Bulletin of Construction. Kharkiv, KhNUBA, Issue 4/82. P. 132–136.
  23. Dorozhko, E. V., Ryapukhin V. M. (2015). Analysis of the influence of components of temperature deformation of a cement concrete slab on the stress-strain state of an asphalt concrete layer on a rigid base. Automobile roads and road construction. Vol. 93. P. 172–180.
  24. DBN B.2.3-4:2015. Automobile roads. [Effective from 2016-04-01]. Kyiv, 2015. 109 p.

**Батракова Анжеліка Геннадіївна**, д.т.н, проф. каф. проектування доріг, геодезії і землеустрою, rp@khadi.kharkov.ua,

тел. 38(057)707-37-32

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

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

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

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

### **Simulation of the stress-deformed state of the structure of road clothing taking into account the combined action of vertical pressure and horizontal force from vehicles**

**Abstract. Problem.** *This study was carried out with the aim of determining the stress-strain state of various structures of pavement consisting of asphalt concrete pavement on a cement concrete slab from the action of the transport load and analysis of the results. The article analyzes the literature data regarding the advantages of using hard pavement compared to non-rigid, in the conditions of a constant increase in traffic intensity and load from vehicles. Determination of the stress-strain state of asphalt concrete layers on cement concrete slabs under the influence of vertical pressure from vehicles and horizontal force from traction or braking of vehicles is carried out using the finite element method. In the simulation, three-layer models were used, consisting of an asphalt concrete layer, a cement concrete slab, and an elastic foundation. On the surface of the model, a vertical load (0,8 MPa) and a horizontal force (from 5 kN to 40 kN) are applied, which simulates the pulling force or the braking forces of vehicles. The diameter of the stamp print is 34,5 cm. The location of the load, relative to the edges of the cement concrete slab limited by temperature seams, is taken in the middle of the cement concrete plate. To confirm the correctness of the simulation results, we compared the stress values obtained by the finite element method and the stresses obtained by strict analytical solutions V. P. Plevako, which are recognized as correct, tested and reliable. Relative error in the voltage values determined by analytical solutions prof. V. P. Plevako and determined as a result of numerical simulation using the finite element method does not exceed 6 %. Analysis of the simulation results made it possible to establish the influence of the elastic modulus of structural layers, layer thicknesses and vehicle motion conditions (horizontal forces) on the patterns of change in the stress-strain state of an*

asphalt concrete layer on a cement concrete slab. **Main goal.** The purpose of the research is to determine and analyze the stress-strain state of the asphalt concrete layer on the cement-concrete slab due to the action of transport loading. **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. **Results.** The analysis of the simulation results made it possible to establish that with changes in the modulus of elasticity of the asphalt concrete layer, the stresses change linearly. The verification of the given dependence was performed for the range of modulus of elasticity of asphalt concrete from 400 MPa to 5000 MPa at horizontal force values from 5 kN to 40 kN. Therefore, in the future, it is possible to carry out linear interpolation of stress values according to the elastic moduli of neighboring values. **Practical value.** According to the results of 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.

**Key words:** Asphalt-concrete layer, modulus of elasticity, stressed-strained state, load application point, 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 Yevhen,** Ph.D, Associate Professor of the Department of Highway Design, Geodesy and Land Management,  
evgeniy.dorozhko@gmail.com,  
tel +380680699722,

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

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

---