

**ЧИСЛОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО – ДЕФОРМОВАНОГО  
СТАНУ ЦЕМЕНТОБЕТОННОГО ПОКРИТТЯ АВТОМОБІЛЬНИХ  
ДОРІГ**

**NUMERICAL SIMULATION OF STRESS - DEFORMED CONDITION  
OF CEMENT CONCRETE ROAD COVERING**

**Онищенко А.М., д.т.н., доц., Худолій С.М., к.т.н., доц.,  
Чиженко Н.П. (Національний транспортний університет, Київ)**

**Onyshchenko A.M., Doctor of Engineering, Associate Professor,  
Khudolii S.N., Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Chyuzhenko N.P.  
(National Transport University, Kyiv)**

*У результаті виконаного числового моделювання напружено – деформованого стану цементобетонного покриття отримано аналітичну залежність для визначення розтягувальних напружень при згині, що виникають в цементобетонному покритті автомобільних доріг від дії навантаження з урахуванням різних розрахункових параметрів, а саме: модуля пружності ( $E$ ), товщини плити ( $h$ ), розрахункового тиску ( $p$ ), діаметру кола, рівновеликого за площею відбитку колеса ( $D$ ), що дозволяє уточнити загальний вираз умови міцності при розрахунку цементобетонного покриття з урахуванням коефіцієнту морозостійкості. Даний метод дозволяє оцінювати міцність цементобетонного покриття автомобільних доріг різних категорій із заданою надійністю та довговічністю.*

*The article is devoted to the problem of development of more exact mathematical models of deformation of road clothes of rigid type depending on a different variant of an arrangement of loading and design features of a plate.*

*The purpose of the work is to carry out modeling by the method of finite elements of the stress-strain state of the cement-concrete pavement of highways depending on the different load location and design features of the slab.*

*The object of research is cement concrete for covering roads.*

*Research method: statistical analysis of scientific publications, technical and normative literature, finite element method. Given the fact that the cement-concrete pavement of the highway is subject to a complex spatial load, so it is advisable to use the numerical method of determining the stress-strain state of the pavement, based on solving the equations of the theory of elasticity - finite element method.*

*Its feature is the direct transition from a continuous object to discrete analysis by dividing the area of the object, which is studied into a number of sub-areas and approximating the fields of displacement, force, stress, for example, using an engineering complex. Four variants of transport load location are considered. As a result of the numerical simulation of the stress-strain state of the cement concrete pavement for the first time obtained an analytical dependence to determine tensile bending stresses arising*

*in the cement concrete pavement of roads from the action of load taking into account various design parameters. taking into account the coefficient of frost resistance. This method allows to evaluate the strength of cement-concrete pavement of roads of different categories with a given reliability and durability.*

*Ключові слова: цементобетон, напруження, міцність, довговічність.*

*Keywords: cement concrete, tension, strength, durability.*

**Вступ.** В останні роки в усьому світі на автомобільних дорогах спостерігається тенденція збільшення інтенсивності руху транспортних засобів і зростання частки великовантажних автомобілів та багатовісних автопоїздів з підвищеним тиском в пневматиках. Це викликає передчасні руйнування і недопустимі деформації на дорогах, швидкий вихід їх із ладу, суттєве підвищення собівартості перевезень. Вимушені і незаплановані ремонти призводять до погіршення умов проїзду та безпеки руху, утворенню заторів, значного зменшення фактичної пропускної здатності доріг, зменшенню продуктивності роботи автотранспорту. Все це веде до значної втрати матеріальних і фінансових ресурсів та суттєвого погіршення соціального забезпечення населення. У розвинутих країнах світу постійно піклуються про підвищення довговічності дорожнього покриття, удосконалюють методи його розрахунку, здійснюють натурні обстеження та моніторинг його стану, застосовують новітні матеріали та технології. Частковим рішенням цієї проблеми може стати використання цементобетону для покриття автомобільних доріг.

Лідером за кількістю цементобетонних доріг є США, де вони складають близько 60% від загальної протяжності. У Німеччині 38%, а в Австрії 50 % доріг влаштовані із цементобетону. В Чеській Республіці в останні 15 років близько 65 % нових доріг були збудовані з цементобетонним покриттям. У Бельгії, цементобетонні шосе складають 40 %.

Область раціонального використання цементобетонних покриттів: згідно п.4.3.4. ДБН В.2.3 – 4:2015 у випадку, коли очікувана інтенсивність великовантажних транспортних засобів більше 15% від загального потоку, то проектується лише жорсткий дорожній одяг, також раціональним використанням є під'їзди до морських портів, митниці, стоянки великовагових транспортних засобів, логістичні центри, об'їзні дороги крупних населених пунктів, дороги промислових підприємств, маршрути руху контейнерів та зерновозів.

**Постановка проблеми.** Багаторічні спостереження за експлуатацією цементобетонних покриттів, а також аналіз зарубіжного досвіду дозволяє об'єктивно оцінити недоліки покриттів даного типу, головними з яких є тріщиноутворення в результаті дії: усадки, коливання температури добової та річної, перемінного заморожування – відтавання води в порах і

ушкоджених місцях, динамічного навантаження від коліс транспортних засобів, руйнування кромки деформаційних швів цементобетонного покриття та його здиблення.

Як відомо, умови роботи цементобетонного покриття в різних його зонах (в центрі плити, по краях, торцях, кутах плити, полісі накату тощо) значно різняться. Це спричиняє можливість накопичення залишкових деформацій основи та часткового порушення контакту із основою, особливо це проявляється по краях та в зонах поперечних швів. Неоднорідність цементобетону, згідно із даними американських дорожників, є головною причиною утворення різних дефектів у вигляді тріщин. Дані Техаського університету по міцності цементобетону свідчать про значний розкид показників (міцність цементобетону у кутах плити – 1,34 МПа, в центрі – 1,70 МПа).

Утворення тріщин в цементобетонному покритті порушують цілісність та монолітність дорожньої конструкції, розділяючи її на окремі блоки, не пов'язані між собою, кількість і протяжність утворених тріщин, що утворилися на покритті, майже не впливають на рух автомобілів до тих пір, поки не утворилися вибоїни та викришування, що призводить до погіршення рівності покриття, зниження рівня безпеки руху та створення аварійно – небезпечних ситуацій (рис. 1).



Рис. 1. Пошкодження поверхні покриття автомобільної дороги після 25 років експлуатації

Як наслідок, збільшуються витрати на утримання та ремонт цементобетонного покриття автомобільних доріг, які зазнають передчасних руйнувань. У зв'язку з цим досить актуальною є проблема розробки більш точних математичних моделей деформування дорожніх одягів жорсткого типу в залежності від різного варіанту розташування навантаження та конструктивних особливостей плити.

**Мета роботи.** Мета роботи полягає в проведенні моделювання методом скінченних елементів напружено – деформованого стану цементобетонного покриття автомобільних доріг в залежності від різного варіанту розташування навантаження та конструктивних особливостей плити.

**Об'єктом дослідження** є цементобетонне покриття автомобільних доріг.

**Основна частина.** Враховуючи те, що на цементобетонне покриття автомобільної дороги діє складне просторове навантаження, тому доцільно використати числовий метод визначення напружено-деформованого стану покриття, що базується на розв'язанні рівнянь теорії пружності – методу скінченних елементів як найбільш універсального і ефективного. Його особливістю є безпосередній перехід від континуального об'єкту до дискретного аналізу шляхом ділення області об'єкту, який досліджується на ряд під-областей та апроксимації полів переміщень, зусиль, напружень, наприклад, з використанням інженерно-розрахункового комплексу.

Тому розглянемо чотиришарову конструкцію жорсткого дорожнього одягу, що складається з цементобетонної плити, трьох шарів, які влаштовані на ґрунтовій основі (табл. 1).

Розмір плит вздовж напрямку руху транспорту складає 5 м та в поперечному напрямку 3 м. Між плитами влаштовані шви розширення, шви стиснення та повздовжні шви (рис. 2). Приймемо припущення, що шви влаштовані на всю товщину плити та не укріплені штирями. Товщини та механічні властивості шарів основи та цементобетонної плити наведено в таблиці 1. В чисельних розрахунках товщина бетонної плити  $h_1$  варіювалася від 18 см до 26 см з кроком 2 см.

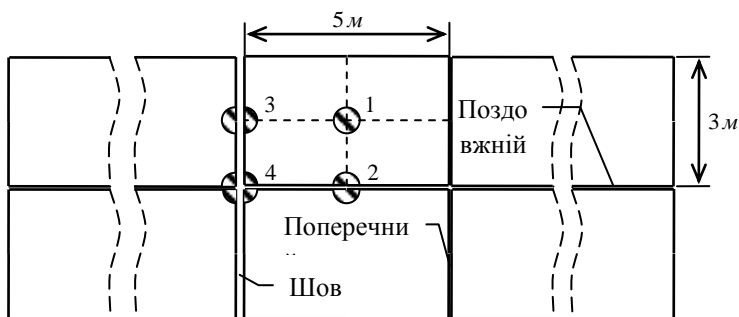


Рис.2. Геометрична схема цементобетонного покриття

Таблиця 1

Механічні властивості та товщини шарів конструкції жорсткого дорожнього одягу

№	шар	$h_i$ , см	Модуль пружності (МПа)	Коефіцієнт Пуасона	Щільність $\text{кг/м}^3$
1	Важкий бетон класу В35ПІІF200W8	18 -26	30000	0,18	2350
2	Щебенево-піщана суміш С7	17,5	400	0,3	2000
3	Щебенево-піщана суміш С5	15	320	0,3	2000
4	Пісок середньої крупності	10	120	0,28	2000
5	Існуюче земляне полотно (супісок пілуватий)	80	48	0,3	2000

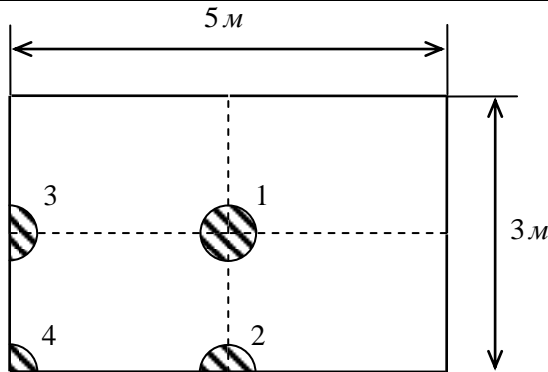


Рис. 3. Варіанти розташування транспортного навантаження на цементобетонній плиті

Виділимо для розгляду одну плиту (рис. 3). Вважаємо, що транспортне навантаження на конструкцію – це тиск  $p$ , що передається від гумового колеса транспортного засобу на круглий відбиток діаметру  $D$ . В розрахунках приймалося що  $p = 1,0$  МПа,  $D = 34,5$  см. Крім транспортного навантаження на конструкцію діє гравітаційне навантаження від її власної ваги в вертикальному напрямку (вздовж осі  $Oz$  (рис. 6)).

Розглянемо чотири варіанти розташування транспортного навантаження (рис. 3, 5):

- Варіант №1 – відбиток колеса знаходиться в центрі бетонної плити;
- Варіант №2 – відбиток колеса знаходиться посередині повздовжнього шва;
- Варіант №3 – відбиток колеса знаходиться посередині поперечного шва;
- Варіант №4 – відбиток колеса знаходиться в куті плити на перетині повздовжнього та поперечного швів.

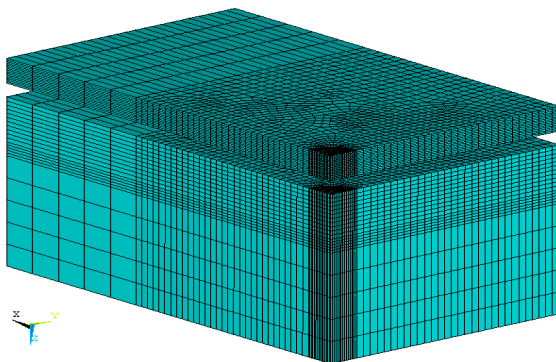


Рис. 4. Скінченно-елементна модель виділеного фрагменту конструкції жорсткого дорожнього одягу

Розглянемо скінченно-елементну модель даної конструкції. Осі  $Ox$  та  $Oy$  розташовані в горизонтальній площині (верхня грань бетонної плити), початок координат знаходиться в центрі кругового відбитку колеса, вісь  $Oz$  направлена вертикально вниз. Між плитою та основою влаштовано контакт з коефіцієнтом тертя 0,5.

На найнижчу грань багат шарової основи що знаходиться в площині  $z = \sum h_i$  накладено умову заборони переміщень. На вертикальні грані багат шарової основи накладено умові заборони преміщень у перпендикулярному до них напрямку [3]. На найвищу горизонтальну грань основи та на нижню горизонтальну грань плити накладено умови контакту. Всі інші грані цементобетонної плити вільні від обмежень.

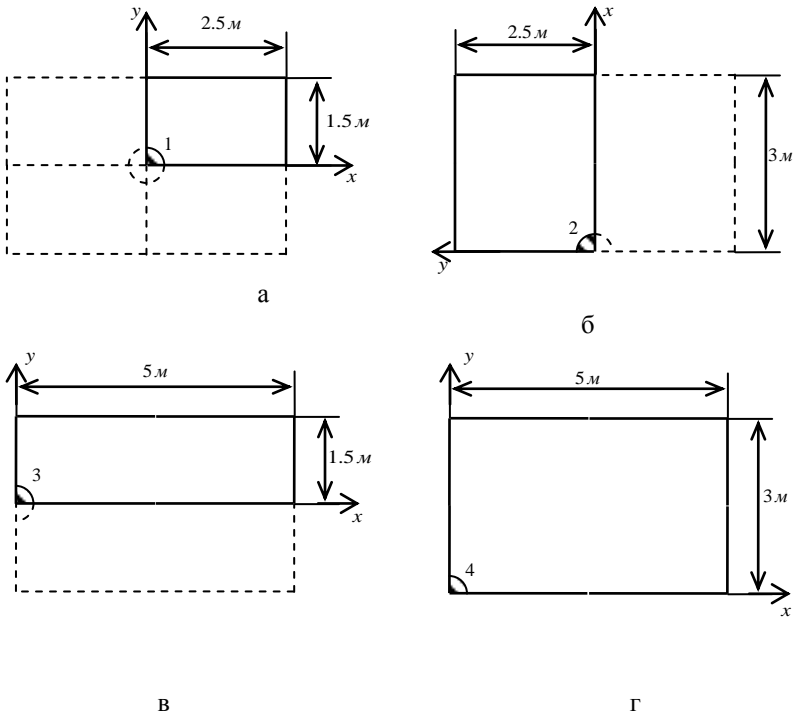


Рис. 5. Розрахункові схеми конструкції для різних варіантів транспортного навантаження

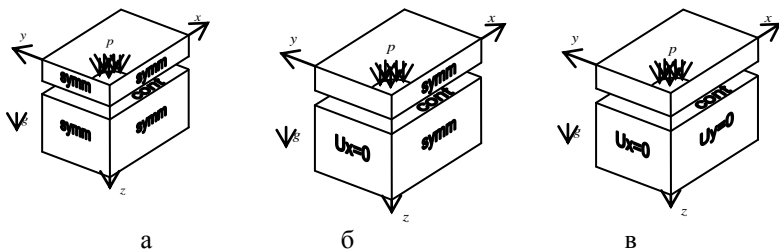


Рис. 6. Варіанти граничних умов

Оскільки для варіанту транспортного навантаження № 1 має місце повздовжня та поперечна симетрії, то є можливість розгляду чверті конструкції (рис. 6, а), яку отримуємо в результаті відтинання частини від цілої конструкції площинами симетрії  $x = 0$  та  $y = 0$  з накладанням

додаткових граничних умов симетрії на вказані площини симетрії (рис. 6, а).

Для варіанту транспортного навантаження № 2 має місце поперечна симетрія, тому можна розглянути половину конструкції (рис. 6, б), яку отримуємо в результаті відтинання від цілої конструкції половини площиною симетрії з накладанням додаткової граничної умови симетрії на вказану площину симетрії (рис. 6, б).

Варіант транспортного навантаження № 3 має повздовжню симетрію, тому розглядається половина конструкції (рис. 6, в) яку отримуємо відтинанням від цілої конструкції половини площиною симетрії з накладанням додаткової граничної умови симетрії на вказану площину (рис. 6, б).

Варіант транспортного навантаження № 4 не має симетрії, тому розглядається повна конструкція (рис. 6, г). Граничні умови для цього варіанту зображені на рис. 6, в.

Слід зауважити, що геометрична модель конструкції є параметричною, тобто такою, що будується за певним алгоритмом, в якому приймається, що вісь  $Ox$  направлена вздовж найбільшого розміру плити або частини плити, що розглядається. Отже, напрямки  $Ox$  для варіантів транспортного навантаження № 1, 3, 4 та варіанту № 2 перпендикулярні. В табл. 2 наведено максимальні та мінімальні значення складових переміщень вузлів скінченоелементної моделі конструкції в залежності від товщини плити і варіантів розташування навантаження. В табл. 3 максимальні значення складових тензора напружень та максимальні еквівалентні напруження за Мізесом в елементах скінченно-елементної моделі конструкції цементобетонного покриття в залежності від товщини плити і варіантів розташування навантаження. На основі проведеного числового моделювання наведено поля повних переміщень вузлів моделі для різних варіантів розміщення транспортного навантаження (рис. 7), зони розтягуючих напружень  $\sigma_x$  та  $\sigma_y$  (рис. 8) та характер розподілу еквівалентних напружень за Мізесом в елементах моделі для різних варіантів розміщення транспортного навантаження (рис. 9).



Таблиця 2

Максимальні та мінімальні значення складових переміщень вузлів скінченоелементної моделі конструкції

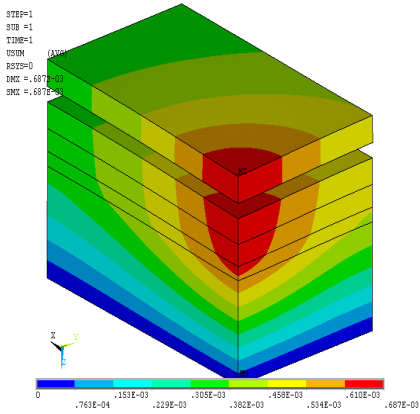
Варіант транспортного навантаження	Товщина бетонної плити, см	Переміщення вузлів моделі конструкції				
		$u_x$ , мм		$u_y$ , мм		$u_z$ , мм
		min	max	min	max	max
№1	18	-0,0191	0,0513	-0,017	0,0354	0,687
	20	-0,0176	0,0459	-0,015	0,0294	0,66
	22	-0,0164	0,0415	-0,0132	0,0245	0,64
	24	-0,0154	0,0378	-0,0117	0,0205	0,624
	26	-0,0145	0,0345	-0,0105	0,0173	0,613
№2	18	-0,0613	0,0626	-0,0237	0,0549	0,835
	20	-0,0595	0,0556	-0,0214	0,0481	0,794
	22	-0,058	0,0498	-0,0196	0,0424	0,763
	24	-0,0565	0,0454	-0,018	0,0375	0,739
	26	-0,0555	0,0421	-0,0166	0,0334	0,72
№3	18	-0,0621	0,0688	-0,0224	0,0428	0,861
	20	-0,0599	0,0624	-0,0199	0,0356	0,823
	22	-0,0574	0,0573	-0,0177	0,03	0,795
	24	-0,0557	0,0528	-0,0158	0,0253	0,772
	26	-0,0541	0,0493	-0,0143	0,0216	0,754
№4	18	-0,0446	0,0724	-0,0584	0,0692	0,978
	20	-0,0419	0,0647	-0,0567	0,0611	0,923
	22	-0,0395	0,058	-0,055	0,0542	0,878
	24	-0,0373	0,0524	-0,0533	0,0483	0,841
	26	-0,0355	0,0476	-0,0517	0,436	0,811

Таблиця 3

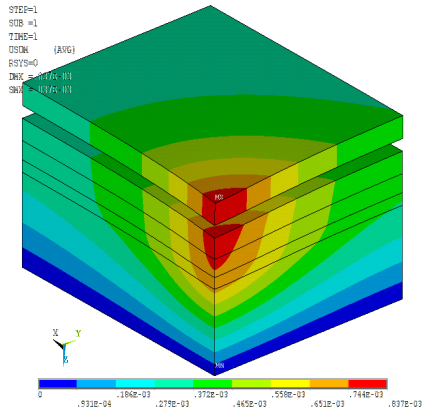
Максимальні значення складових тензора напружень та максимальні еквівалентні напруження за Мізесом в елементах скінченно-елементної моделі конструкції цементобетонного покриття

№	Товщина бетонної плити, см	Максимальні значення складових тензора напружень в елементах скінченно-елементної моделі									Еквівалентні напруження за Мізесом
		$\sigma_x$ , МПа		$\sigma_y$ , МПа		$\sigma_z$ , МПа		$\tau_{xy}$ , МПа	$\tau_{yz}$ , МПа	$\tau_{xz}$ , МПа	
		стиск.	розтяг.	стиск.	розтяг.	стиск.	розтяг.	max	max	max	
№1	18	-3,19	2,94	-3,08	2,85	-1,04	0,0739	0,451	0,578	0,57	2,98
	20	-2,79	2,53	-2,67	2,43	-1,03	0,0644	0,374	0,523	0,516	2,55
	22	-2,48	2,21	-2,35	2,09	-1,02	0,0552	0,334	0,476	0,47	2,21
	24	-2,23	1,94	-2,09	1,81	-1,01	0,0464	0,306	0,436	0,432	1,93
	26	-2,03	1,71	-1,88	1,58	-1,01	0,0379	0,284	0,405	0,401	1,73
№2	18	-0,598	0,645	-3,13	3	-1,05	0,0585	0,78	1,04	0,5	3,05
	20	-0,521	0,562	-2,73	2,57	-1,03	0,0536	0,675	0,908	0,457	2,63
	22	-0,457	0,493	-2,41	2,22	-1,03	0,0507	0,594	0,805	0,424	2,26
	24	-0,407	0,445	-2,16	1,94	-1,01	0,0476	0,531	0,722	0,403	1,97
	26	-0,365	0,432	-1,95	1,7	-1	0,0444	0,481	0,652	0,386	1,8

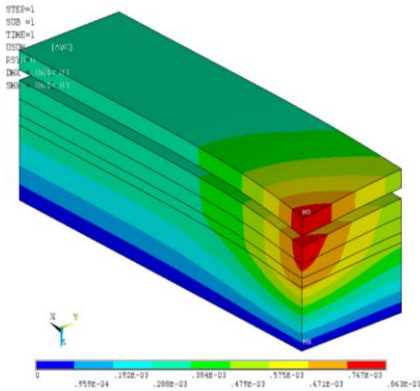
№	Товщина бетонної плити, см	Максимальні значення складових тензора напружень в елементах скінченно-елементної моделі									Еквівалентні напруження за Мізесом	
		$\sigma_x$ , МПа		$\sigma_y$ , МПа		$\sigma_z$ , МПа		$\tau_{xy}$ , МПа	$\tau_{yz}$ , МПа	$\tau_{xz}$ , МПа		$\sigma_{Miz}$ , МПа
		стиск.	розтяг.	стиск.	розтяг.	стиск.	розтяг.	max	max	max		
№3	18	-0,635	0,689	-3,06	2,92	-1,04	0,0727	0,782	1,06	0,426	2,98	
	20	-0,562	0,612	-2,65	2,48	-1,03	0,0633	0,678	0,926	0,39	2,53	
	22	-0,509	0,554	-2,32	2,13	-1,03	0,0543	0,599	0,819	0,359	2,17	
	24	-0,457	0,501	-2,06	1,84	-1	0,0456	0,538	0,731	0,337	1,88	
	26	-419	0,459	-1,85	1,6	-1	0,0373	0,489	0,659	0,318	1,63	
№4	18	-0,716	0,749	-0,729	0,75	-1,05	0,0842	1,05	0,91	0,992	1,83	
	20	-0,614	0,646	-0,627	0,648	-1,04	0,0671	0,92	0,794	0,861	1,6	
	22	-0,531	0,562	-0,544	0,562	-1,05	0,0609	0,811	0,702	0,76	1,42	
	24	-0,463	0,494	-0,473	0,489	-1,06	0,0548	0,725	0,629	0,683	1,32	
	26	-0,408	0,437	-0,414	0,427	-1,07	0,0488	0,654	0,571	0,624	1,24	



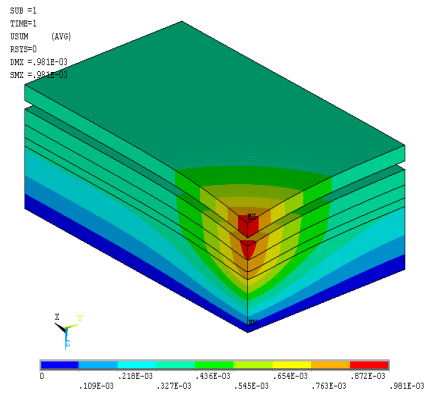
**а**



**б**



**в**



**г**

Рис. 7. Поле повних переміщень вузлів моделі для різних варіантів розміщення транспортного навантаження (Варіант №1 (а), варіант № 2 (б), варіант №3 (в), варіант № 4 (г))

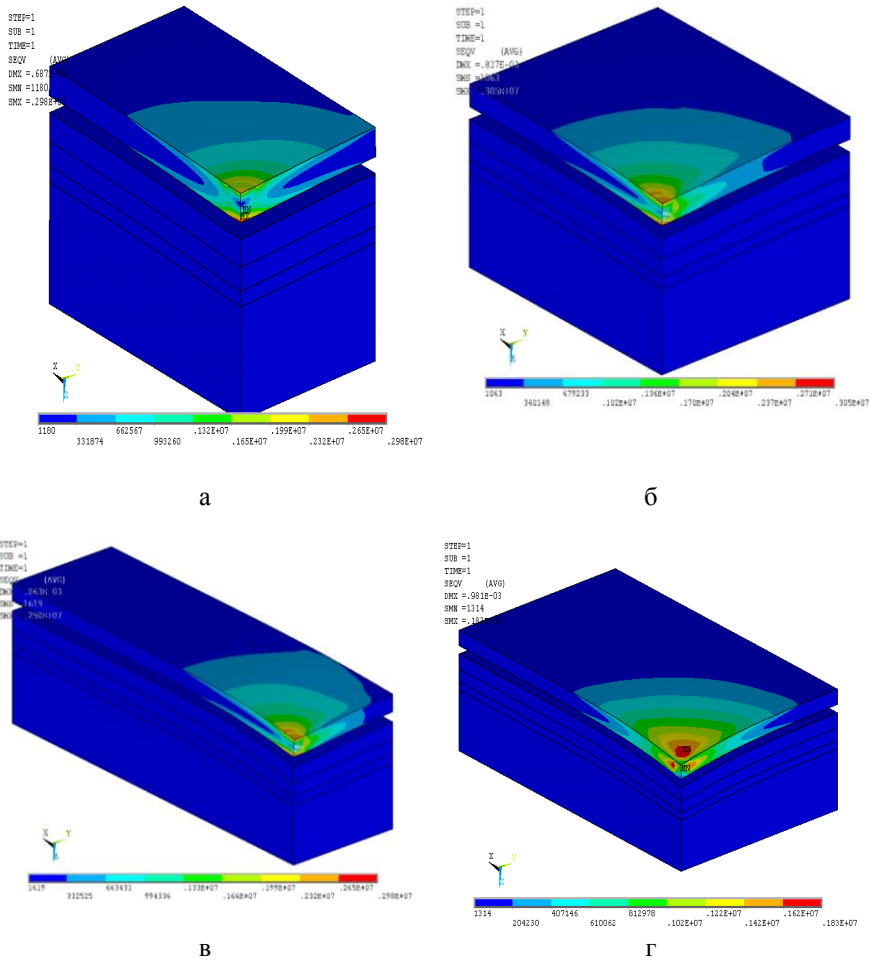


Рис. 8. Характер розподілу еквівалентних напружень за Мізесом в елементах моделі для різних варіантів розміщення транспортного навантаження (Варіант №1 (а), варіант №2 (б), варіант №3 (в), варіант №4 (г))

У табл. 4 наведено максимальні та мінімальні значення складових переміщень вузлів скінченно-елементної моделі конструкції для варіанту транспортного навантаження, коли відбиток колеса знаходиться в центрі цементобетонної плити при різних значеннях модуля пружності та товщинах цементобетонної плити.

Таблиця 4

Максимальні та мінімальні значення складових переміщень вузлів скінченно-елементної моделі конструкції для варіанту транспортного навантаження № 1 при різних значеннях модуля пружності та товщини цементобетонної плити

Модуль пружності цементобетонної плити (МПа)	Товщина бетонної плити, см	Переміщення вузлів моделі конструкції				
		$u_x$ , мм		$u_y$ , мм		$u_z$ , мм
		min	max	min	max	max
25000	18	-0,0213	0,0546	-0,0192	0,0394	0,709
	22	-0,0182	0,0443	-0,0151	0,0276	0,658
	26	-0,016	0,0371	-0,0121	0,0198	0,628
30000	18	-0,0191	0,0513	-0,017	0,0354	0,687
	22	-0,0164	0,0415	-0,0132	0,0245	0,64
	26	-0,0145	0,0345	-0,0105	0,0173	0,613
35000	18	-0,0175	0,0485	-0,0152	0,0324	0,669
	22	-0,015	0,0392	-0,0118	0,022	0,625
	26	-0,0133	0,0325	-0,0092	0,0154	0,601
40000	18	-0,0162	0,0462	-0,0138	0,0299	0,654
	22	-0,0139	0,0374	-0,0106	0,0201	0,613
	26	-0,0124	0,0308	-0,0082	0,0139	0,591

У табл. 5 наведено значення складових тензора напружень та максимальні еквівалентні напруження за Мізесом в елементах скінченно-елементної моделі конструкції цементобетонного покриття для варіанту транспортного навантаження при змінних значеннях модуля пружності та різних товщинах.

Таблиця 5

Максимальні значення складових тензора напружень та максимальні еквівалентні напруження за Мізесом в елементах скінченно-елементної моделі конструкції цементобетонного покриття для варіанту транспортного навантаження № 1 при різних значеннях модуля пружності та товщини плити

Модуль пружності бетонної плити (МПа)	Товщина бетонної плити, см	Максимальні значення складових тензора напружень в елементах скінченно-елементної моделі									Еквівалентні напруження за Мізесом
		$\sigma_x$ , МПа		$\sigma_y$ , МПа		$\sigma_z$ , МПа		$\tau_{xy}$ , МПа	$\tau_{yz}$ , МПа	$\tau_{xz}$ , МПа	$\sigma_{Mis}$ , МПа
		стиск	розтяг	стиск	розтяг	стиск	розтяг	max	max	max	
25000	18	-3,07	2,82	-2,99	2,75	-1,04	0,0737	0,444	0,573	0,565	2,87
	22	-2,4	2,12	-2,29	2,03	-1,02	0,0551	0,333	0,473	0,468	2,14
	26	-1,98	1,65	-1,85	1,54	-1,01	0,0378	0,284	0,403	0,4	1,65
30000	18	-3,19	2,94	-3,08	2,85	-1,04	0,0739	0,451	0,578	0,57	2,98
	22	-2,48	2,21	-2,35	2,09	-1,02	0,0552	0,334	0,476	0,47	2,21
	26	-2,03	1,71	-1,88	1,58	-1,01	0,0379	0,284	0,405	0,401	1,73
35000	18	-3,28	3,04	-3,16	2,94	-1,04	0,0742	0,457	0,582	0,574	3,06
	22	-2,55	2,28	-2,39	2,15	-1,02	0,0554	0,335	0,478	0,473	2,27
	26	-2,08	1,77	-1,91	1,62	-1,01	0,038	0,285	0,406	0,402	1,74
40000	18	-3,37	3,13	-3,23	3,01	-1,04	0,0743	0,461	0,585	0,577	3,14
	22	-2,61	2,34	-2,43	2,19	-1,02	0,0555	0,336	0,48	0,475	2,32
	26	-2,13	1,81	-1,93	1,64	-1,01	0,0381	0,285	0,407	0,403	1,78

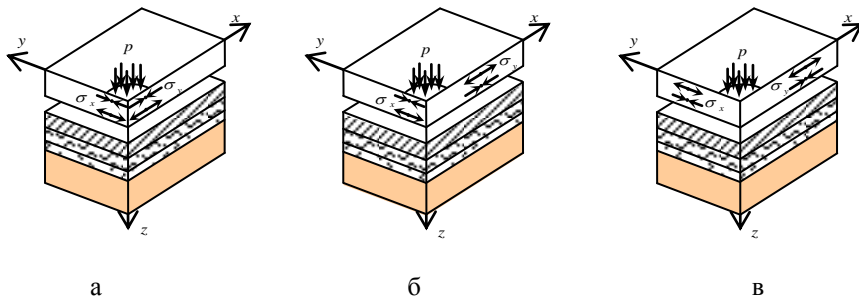


Рис. 9. Схема розташування розтягувальних напружень при різних положеннях транспортного навантаження

На рис. 9 зображено схематичне розташування максимальних розтягуючих напружень  $\sigma_x$  та  $\sigma_y$  при різних варіантах транспортного навантаження. При дії варіанту транспортного навантаження № 1 напруження в цементобетонній плиті під штампом розподіляються наступним чином – верхні шари стиснуті, а нижні розтягнуті (рис. 9, а). При дії варіантів № 2 та № 3 характер розподілу напружень в цементобетонній плиті схожий. У верхніх шарах під штампом  $\sigma_x$  стискаючі, а в нижніх – розтягуючі, зовні штампа у верхніх шарах  $\sigma_y$  – розтягуючі, а в нижніх – стискаючі (рис. 9, б). При дії варіанту № 4 максимальні розтягуючі напруження розташовані зовні штампу у верхніх шарах цементобетонної плити (рис. 9, в).

На основі результатів чисельного моделювання отримано аналітичну залежність (1) та номограму для визначення розтягуючих напружень (рис. 9)  $\sigma_{cy} = \sigma_{pt}$  при згині, що виникають в цементобетонному покритті автомобільних доріг від дії навантаження:

$$\sigma_{cy} = \frac{p}{p_0} \cdot (a_{cy} \cdot E + 2,2804) \cdot K_M \cdot K_{y_{\text{мв}}} \cdot K_{\text{шт}} \cdot \ln\left(\frac{h \cdot K_t}{D}\right) - (b_{cy} \cdot E + 1,0563), \quad (1)$$

де:  $p$  – розрахунковий тиск, що приймається згідно з табл. Б ДБН В.2.3-4, МПа;

$E$  – модуль пружності цементобетону, МПа;

$h$  – товщина цементобетонної плити, см;  $D$  – діаметр кола, рівновеликого за площею відбитку колеса, см;

$a_{cy}, b_{cy}, p_0$  – параметри рівняння ( $a_{cy}=0,00003$ ;  $b_{cy}=0,000003$ ;  $p_0=1,0$  МПа).



$K_M$  – коефіцієнт, що враховує вплив місця розташування навантаження: для неармованих покриттів  $K_M=1,5$  для покриттів із крайовим армуванням або майданчиків з розташуванням смуг накату не ближче ніж 0,8 м зовнішнього поздовжнього краю покриття –  $K_M=1,0$  для поздовжнього напрямку і  $K_M=1,5$  для поперечного;

$K_{умв}$  – коефіцієнт, що враховує умови роботи, рівний 0,6;

$K_{шт}$  – коефіцієнт, що враховує вплив штирьових зеднань на умови контакту плит з основою: при наявності поперечних швах штирів  $K_{шт} = 1$ , при відсутності штирів  $K_{шт}=1,05$  ;

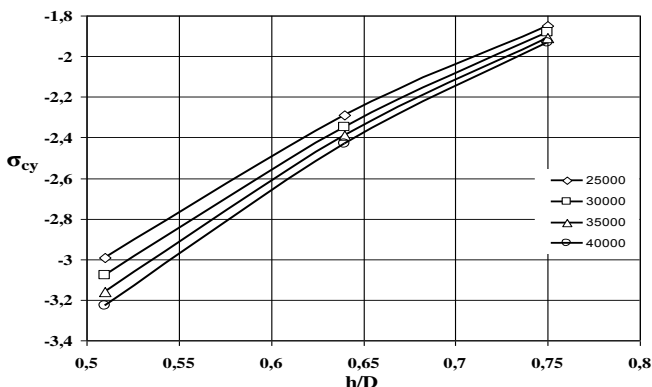


Рис. 10. Номограма для визначення розтягуючих напружень  $\sigma_{су}$  при згині, що виникають в цементобетонному покритті автомобільних доріг від дії навантаження

Оцінку міцності цементобетонного покриття автомобільної дороги пропонується оцінювати з урахуванням отриманої аналітичної залежності (1), яка буде використана для визначення коефіцієнта міцності  $K_{мц}$  в залежності від категорій. З урахуванням відомих будівельних норм [3,4], який полягає у порівнянні розрахункової міцності цементобетону на розтяг при згині з максимальним напруженням, що виникає в цементобетонній плиті на пружній основі від дії навантаження і перепаду температур по товщині плити.

Розрахункова міцність цементобетонного покриття дорівнює значенню класу міцності цементобетону на розтяг при згині ( $B_{тб}$ ) із урахуванням двох емпіричних коефіцієнтів – втоми цементобетону ( $K_y$ ) і умов набору міцності ( $K_M$ ). Розрахунок монолітних цементобетонних покриттів проводять шляхом перевірки міцності покриття за формулою [4]:

$$K_{МЦ} \leq \frac{R_i^p}{\sigma_{cy}}, \quad (2)$$

де  $R_i^p$  – розрахункова міцність цементобетону на розтяг при згині, МПа;

$\sigma_{cy} = \sigma_{pt}$  – напруження розтягу при згині, що виникають у цементобетонному покритті від дії навантаження, з урахуванням перепаду температури по товщині плити приймається за залежністю (1)

Розрахункову міцність на розтяг при згині цементобетонного покриття з урахуванням коефіцієнту морозостійкості пропонується визначати за формулою [3]:

$$R_i^p = B_{tb} \cdot K_M \cdot K_y \cdot K_{морз}, \quad (3)$$

де  $K_y$  – коефіцієнт втоми цементобетону при повторному навантаженні, який визначається за формулою [4];

$K_M$  – коефіцієнт набору міцності [3];

$K_{морз}$  – коефіцієнт морозостійкості.

Коефіцієнт морозостійкості цементобетону визначається за формулою [4]:

$$K_{морз} = \frac{R_p^n}{R_p}, \quad (4)$$

де:  $R_p^n$  – середнє значення границі міцності цементобетону на розтяг при згині після відповідної кількості циклів поперемінного заморожування і відтавання у 5 % водяному розчині хлористого натрію згідно ДСТУ Б В.2.7-47 Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення морозостійкості. Загальні вимоги.

$R_p$  – середнє значення границі міцності цементобетону на розтяг при згині до впливу відповідної кількості циклів поперемінного заморожування і відтавання у 5 % водяному розчині хлористого натрію.

Границю міцності на розтяг при згині цементобетонних зразків визначають при швидкості навантаження 0,04 МПа/с і обчислюють в МПа за формулою [5]:

$$R_p = \frac{3 \cdot F \cdot l}{2 \cdot b \cdot h^2} \cdot 10^{-2}, \quad (5)$$

де  $F$  – руйнівне навантаження, Н;  $l$  – відстань між опорами, см;  $b$  – ширина зразка, см;  $h$  – висота зразка, см;  $10^{-2}$  – коефіцієнт перерахунку у МПа.

**Висновок.** В результаті виконаного числового моделювання напружено – деформованого стану цементобетонного покриття отримано номограму для визначення розтягуючих напружень  $\sigma_{cy}$  при згині, що виникають у цементобетонному покритті автомобільних доріг від дії навантаження.

Уточнена формула (3) з розрахунку міцності на розтяг при згині цементобетону за рахунок введення коефіцієнту морозостійкості (4).

Вперше отримано на основі чисельного моделювання аналітичну залежність для визначення розтягуючих напружень при згині, що виникають в цементобетонному покритті автомобільних доріг від дії навантаження з урахуванням різних розрахункових параметрів, а саме: модуля пружності ( $E$ ), товщини плити ( $h$ ), розрахункового тиску ( $p$ ), діаметру кола, рівновеликого за площею відбитку колеса ( $D$ ), що дозволяє уточнити загальний вираз умови міцності при розрахунку цементобетонного покриття [4] з урахуванням коефіцієнту морозостійкості. Даний метод дозволяє оцінювати міцність цементобетонного покриття автомобільних доріг різних категорій із заданою надійністю та довговічністю.

#### **References**

- 1.Radovsky, B.S. (2015) Cement concrete coverings in the USA - constructions, highways, 2015, № 2, p. 48-60. [in Ukrainian].
- 2.Radovskij, B. S. (2010) Cement concrete in the United States: Novoye Tendencii (Organizatsija and directorytion mining in the areas of cement concrete potyatnyh). «Expensive Tehnika», p. 62 – 70 [in Ukrainian].
- 3.Guidelines for the design of hard road pavement (instead of VSN 197 – 91) / Ministry of Transport of Russia, State service dor. households (Rosavtodor). M.: FGPU "Informavtodor", 2004. 135 p. [in Russia].
- 4.GBN V. 2.3-37641918-557:2016 Motorways. Hard road clothes. Design [in Ukrainian].
- 5.Onyshchenko A. M. (2016) Method of determination of coefficient of temperature trіshnostіkosti to clarify calculation of monolithic cement-concrete covering of motor roads // Highways and road construction. -no 98, p. 179 – 181 [in Ukrainian].

#### **Список використаної літератури**

- 1.Радовский Б.С. Цементобетонные покрытия в США - конструкции, автомобильные дороги, 2015, № 2, с. 48-60.
- 2.Радовский Б. С., Строительство дорог с цементобетонными покрытиями в США: новые тенденции (Организация и направления исследований в области цементобетонных покрытий). «Дорожная Техника», 2010, с. 62 – 70.
- 3.Методические рекомендации по проектированию жестких дорожных одежд (взамен ВСН 197-91)/Минтранс России, Гос. служба дор. хоз-ва (Росавтодор).- М.: ФГПУ «Информавтодор», 2004. – 135 с.
- 4.ГБН В.2.3-37641918-557:2016 Автомобільні дороги. Дорожній одяг жорсткий.
- 5.Онищенко А.М. Метод визначення коефіцієнту температурної тріщиностікості для уточнення розрахунку монолітного цементобетонного покриття автомобільних доріг / А.М. Онищенко, С.П. Возний // *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. Київ: 2016. Вип. 98. С. 179-181.