

ЧИСЛОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ РОЗТАШУВАННЯ ТРАНСПОРТНОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА ЦЕМЕНТОБЕТОННЕ ПОКРИТТЯ АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ

Онищенко А.М., доктор технічних наук, Національний транспортний університет, Київ, Україна, artur_onish@bigmir.net, orcid.org/0000-0002-1040-4530

Худолій С.М., кандидат технічних наук, Національний транспортний університет, Київ, Україна, s_hoodoliy@i.ua, orcid.org/0000-0001-6054-6708

Чиженко Н.П., Національний транспортний університет, Київ, Україна, chyzhenko_np@ukr.net, orcid.org/0000-0002-9152-2474

NUMERICAL MODELLING OF INFLUENCE THE LOCATION OF THE TRANSPORT LOAD ON THE CEMENT-CONCRETE COVERING OF ROADS

Onyshchenko A.M., Doctor of Technical Science, National Transport University, Kyiv, Ukraine, professor, e-mail: artur_onish@bigmir.net, orcid.org/0000-0002-1040-4530

Khudolii S.N., Ph D, National Transport University, Kyiv, Ukraine, s_hoodoliy@i.ua, orcid.org/0000-0001-6054-6708

Chyzhenko N.P., National Transport University, Kyiv, Ukraine, chyzhenko_np@ukr.net, orcid.org/0000-0002-9152-2474

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАСПОЛОЖЕНИЕ ТРАНСПОРТНОЙ НАГРУЗКИ НА ЦЕМЕНТОБЕТОННОЕ ПОКРЫТИЕ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

Онищенко А.Н., доктор технических наук, Национальный транспортный университет, Киев, Украина, artur_onish@bigmir.net, orcid.org/0000-0002-1040-4530

Худолій С.Н., кандидат технических наук, Национальный транспортный университет, Киев, Украина, s_hoodoliy@i.ua, orcid.org/0000-0001-6054-6708

Чиженко Н.П., Национальный транспортный университет, Киев, Украина, chyzhenko_np@ukr.net, orcid.org/0000-0002-9152-2474

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 кромek 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, полосі 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).



Рисунок 1 – Пошкодження поверхні покриття автомобільної дороги після 25 років експлуатації

Figure 1 – Damage to the surface of the vehicle road after 25 years

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). Прийнемо 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.

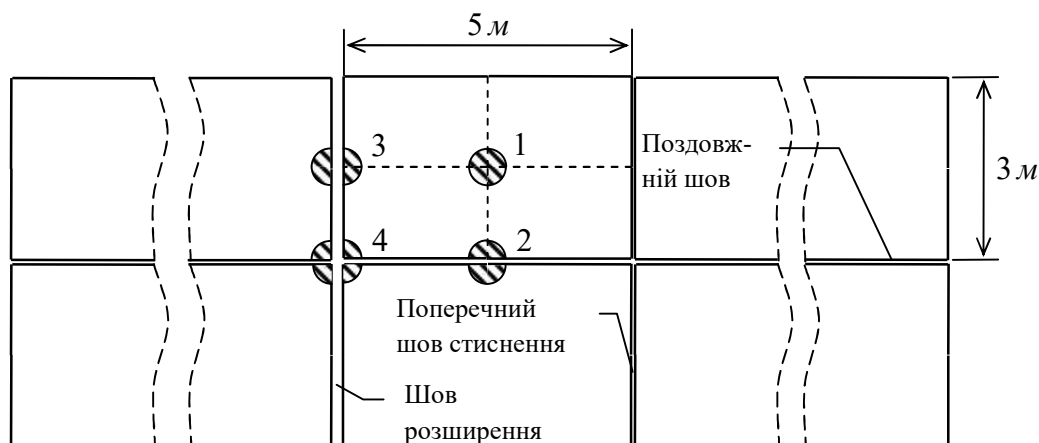


Рисунок 2 – Геометрична схема цементобетонного покриття
Figure 2 – The geometric scheme of cement-concrete covering

Таблиця 1 – Механічні властивості та товщини шарів конструкції жорсткого дорожнього одягу
Table 1 – Mechanical properties and thickness layers of hard road clothing

№	шар	h_i , см	Модуль пружності (МПа)	Коефіцієнт Пуасона	Щільність кг/м^3
1	Важкий бетон класу В35П11F200W8	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

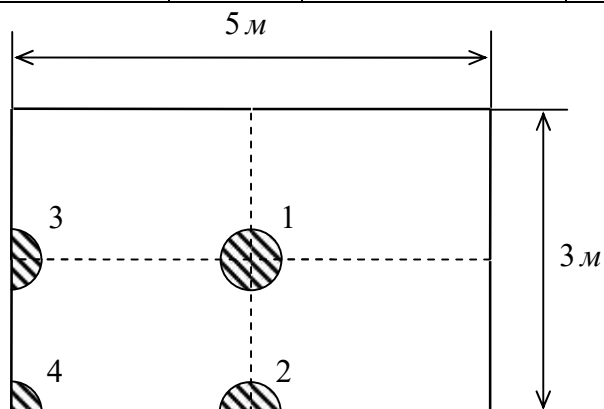


Рисунок 3 – Варіанти розташування транспортного навантаження на цементобетонній плиті
Figure 3 – Variants of transport load on cement concrete plate

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 поздовжнього шва;

Варіант №3 – відбиток колеса знаходиться посередині поперечного шва;

Варіант №4 – відбиток колеса знаходиться в куті плити на перетині поздовжнього та поперечного швів.

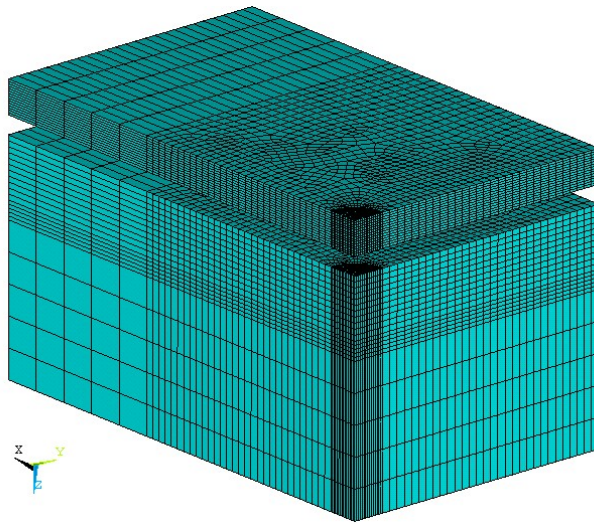


Рисунок 4 – Скінченно-елементна модель виділеного фрагменту конструкції жорсткого дорожнього одягу
Figure 4 – Finite element model of selected slice construction of hard road clothes

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 умови 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.

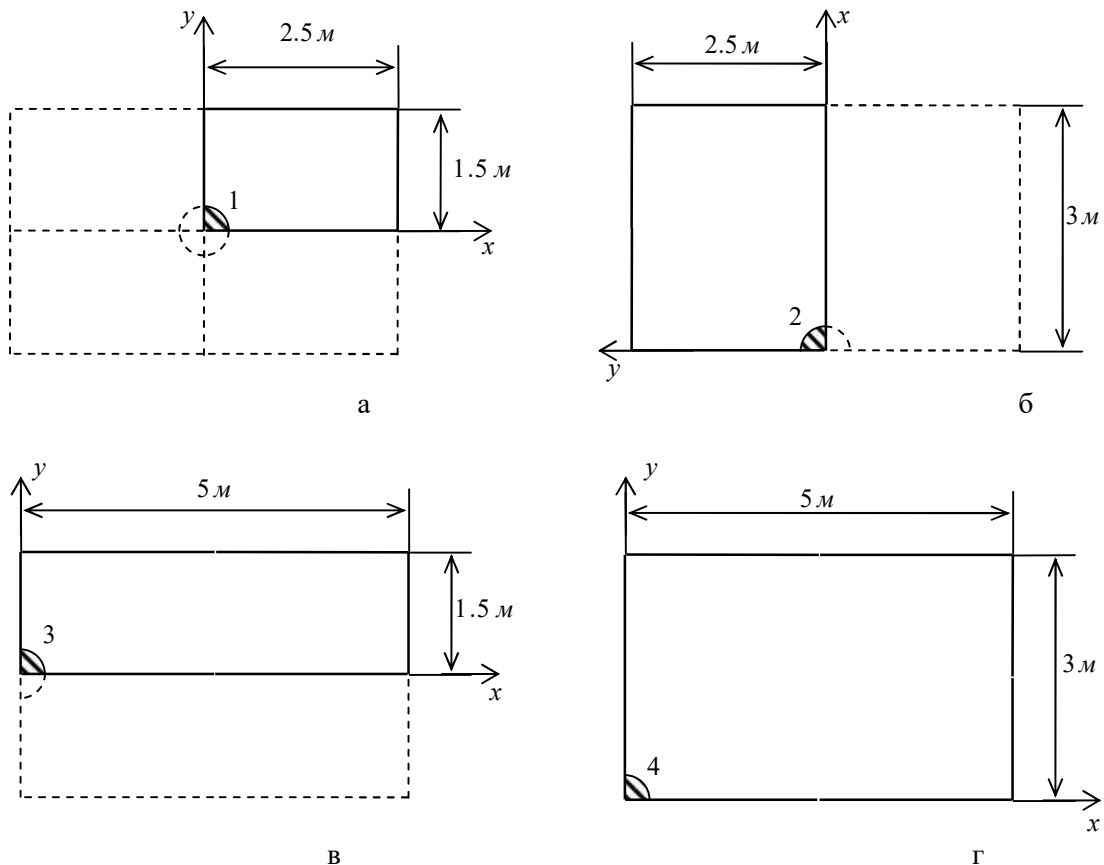


Рисунок 5 – Розрахункові схеми конструкції для різних варіантів транспортного навантаження
Figure 5 – Calculated design schemes for various options of transport load

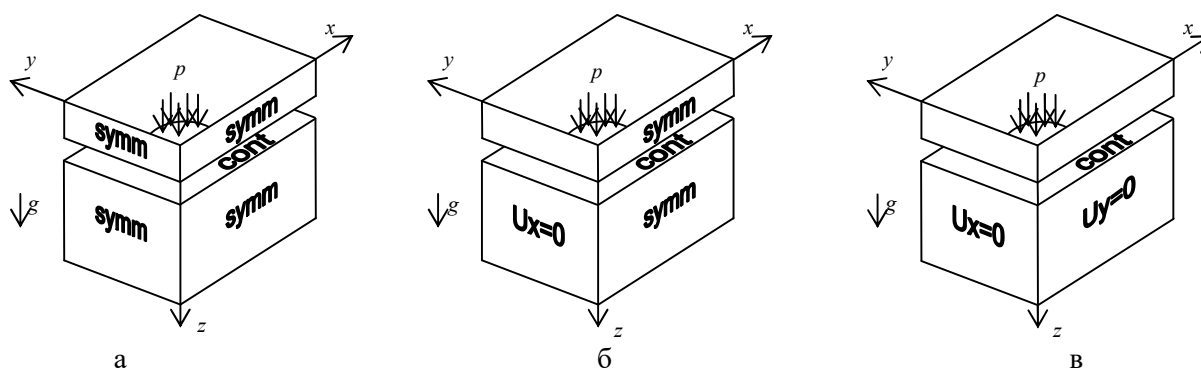


Рисунок 6 – Варіанти граничних умов
Figure 6 – Variants of limiting conditions

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 отримаємо 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 отримаємо 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 σ_x та σ_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

Table 2 – Maximal and minimum values of components of displacements nodes of finite element design model

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

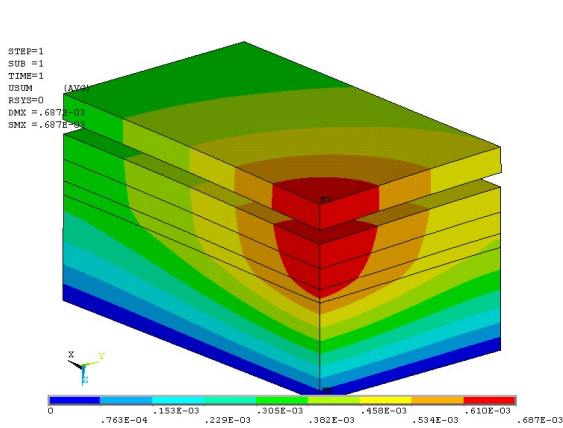
Варіант транспортного навантаження	Товщина бетонної плити, см	Переміщення вузлів моделі конструкції				
		u _x , мм		u _y , мм		u _z , мм
		min	max	min	max	max
№2	18	-0,0613	0,0626	-0,0237	0,0549	0,835
	20	-0,0595	0,0556	-0,0214	0,0481	0,794
	22	-0,058	0,0498	-0,0196	0,0424	0,763
	24	-0,0565	0,0454	-0,018	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

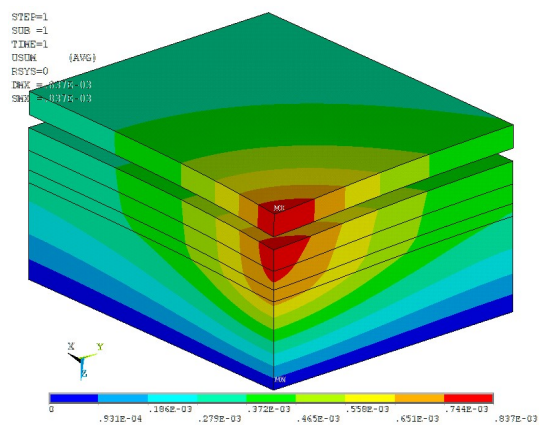
Table 3 – Maximum values of stress tensor components and maximum voltage equivalent by Mises elements in finite element design model of cement concrete covering

Варіант транспортного навантаження	Товщина бетонної плити, см	Максимальні значення складових тензора напружень в елементах скінченно-елементної моделі									Еквівалентні напруження за Мізесом
		σ _x , МПа		σ _y , МПа		σ _z , МПа		τ _{xy} , МПа	τ _{yz} , МПа	τ _{xz} , МПа	σ _{Miz} , 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
№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

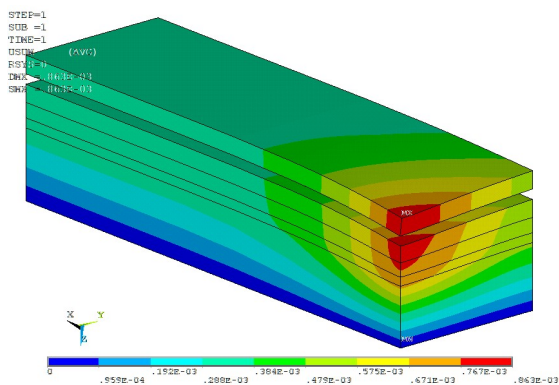
Варіант транспор- тного наванта- ження	Товщина бетонної плити, см	Максимальні значення складових тензора напружень в елементах скінченно- елементної моделі									Еквівалент- ні напружен- ня за Мізом
		σ_x , МПа		σ_y , МПа		σ_z , МПа		τ_{xy} , МПа	τ_{yz} , МПа	τ_{xz} , МПа	
		стиск.	розтяг.	стиск.	розтяг.	стиск.	розтяг.	max	max	max	max
№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



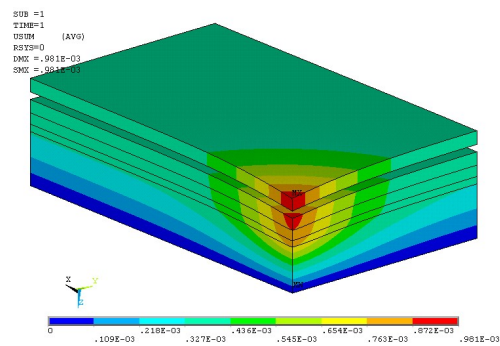
а



б



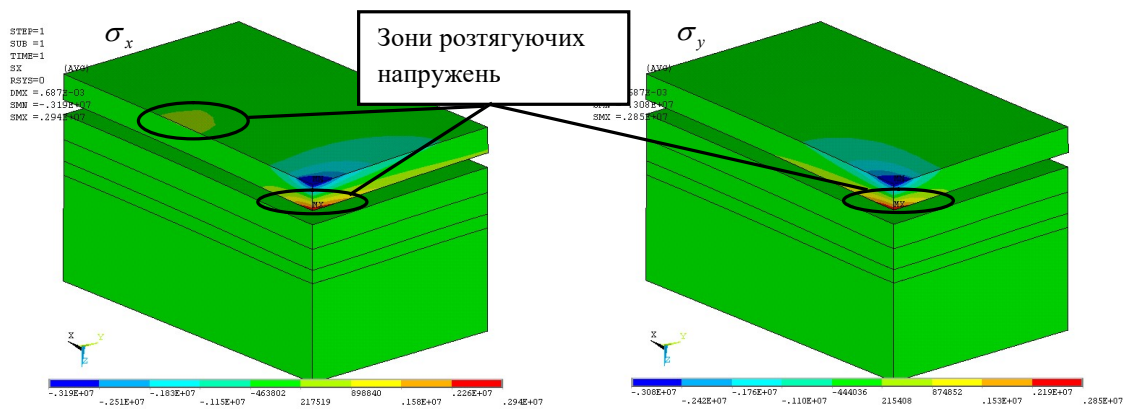
в



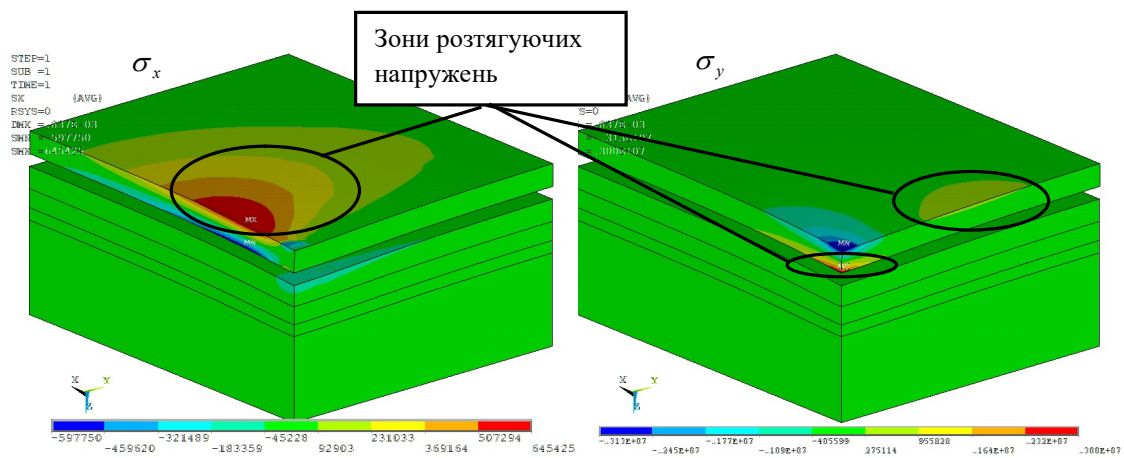
г

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

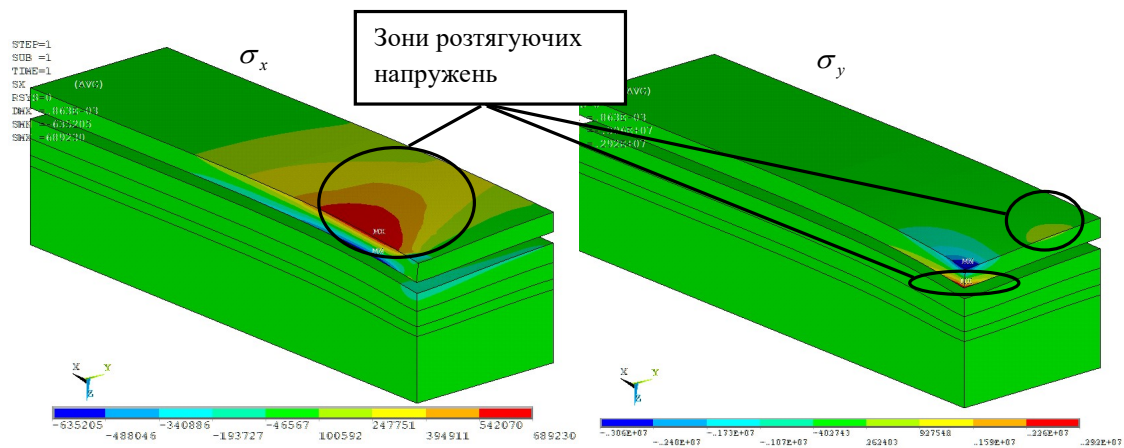
Figure 7 – The field of the complete displacements nodes model for various variants of placing the transport load (Variant 1 (a), Variant 2 (b), Variant 3 (v), Variant 4 (g))



а



б



в

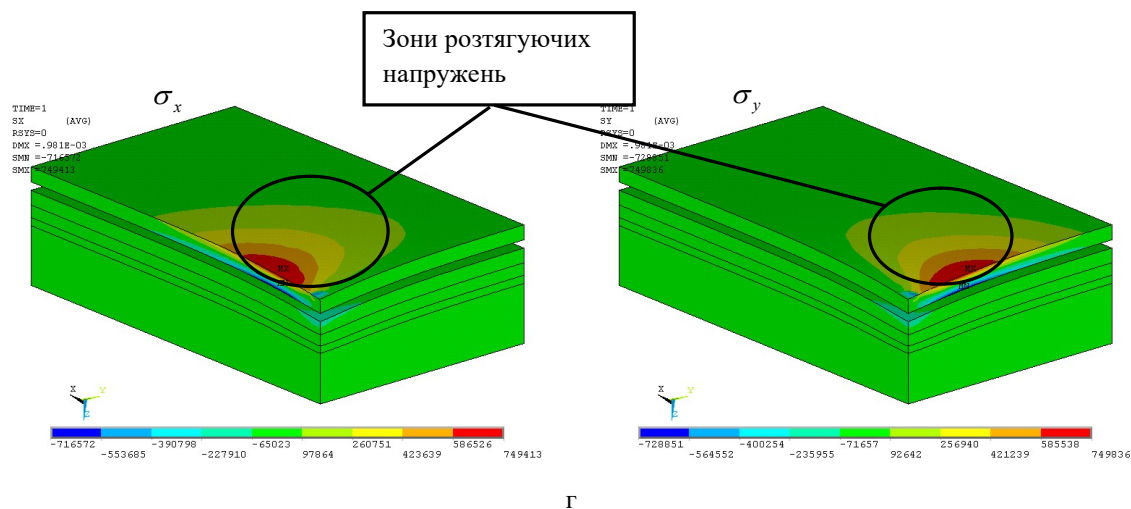


Рисунок 8 – Зони розтягуючих напружень σ_x та σ_y в елементах моделі для різних варіантів розміщення транспортного навантаження (Варіант №1 (а), варіант №2 (б), варіант №3 (в), варіант №4 (г))

Figure 8 – Zones of tensile stress σ_x and σ_y in model elements for various location transport load variants (Variant 1 (a), Variant 2 (b), Variant 3 (v), Variant 4 (g))

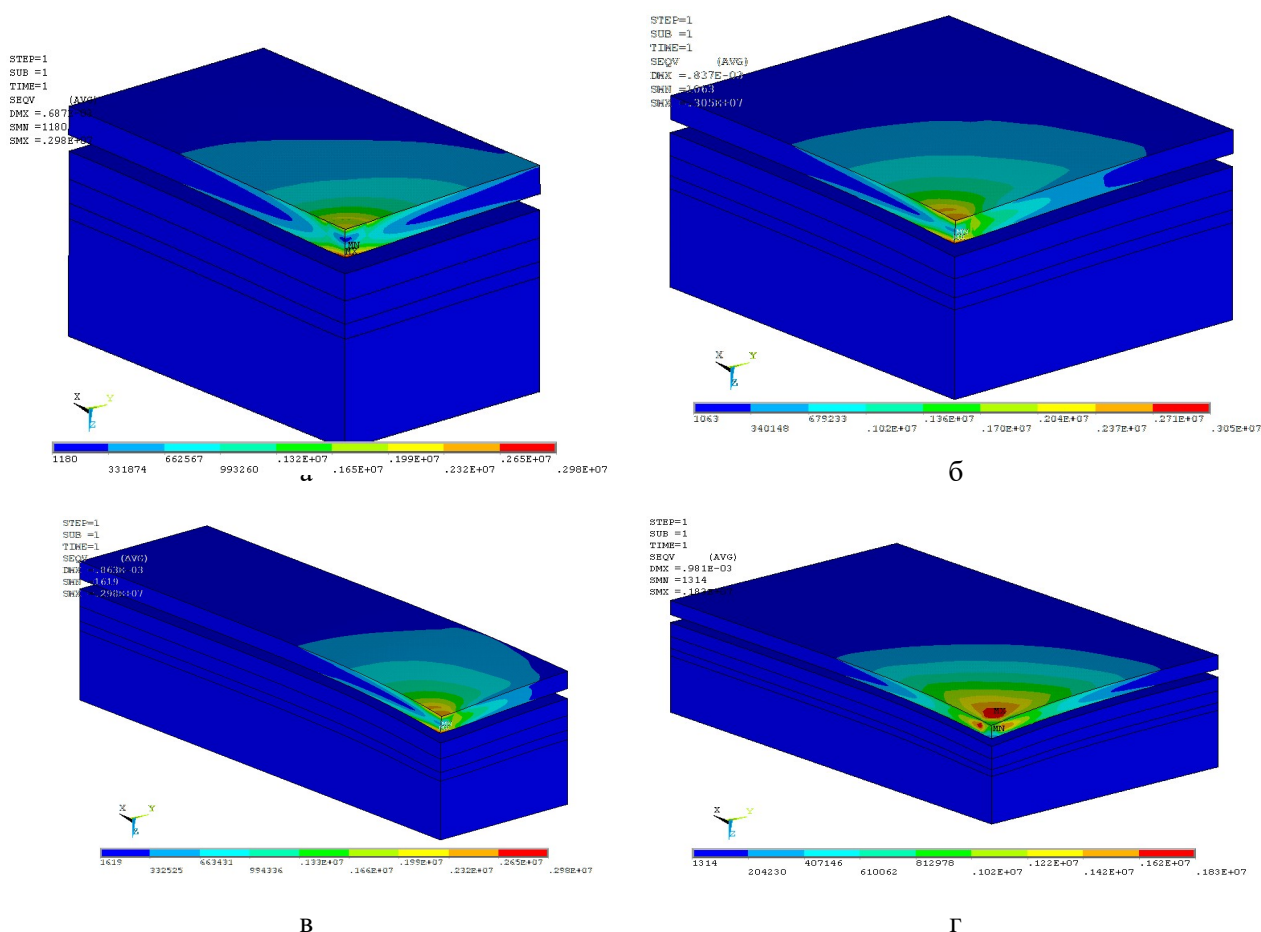


Рисунок 9 – Характер розподілу еквівалентних напружень за Місесом в елементах моделі для різних варіантів розміщення транспортного навантаження (Варіант №1 (а), варіант №2 (б), варіант №3 (в), варіант №4 (г))

Figure 9 – The nature of the distribution of equivalent stresses by Mises in model elements for different transport load variants (Variant 1 (a), Variant 2 (b), Variant 3 (a), Variant 4 (g))

В 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

Table 4 – Maximal and minimum values of components of displacements nodes of finite element model of design for variant of transport load No 1 at different values of elasticity module and thickness of cement concrete slab

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

В 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

Table 5 – The maximum values of stress tensor components and the maximum voltage equivalent in Mises in the elements of a finite element model of cement concrete coating for the option of transport load No 1 for different values elasticity module and plate thickness

Модуль пружності бетонної плити (МПа)	Товщина бетонної плити, см	Максимальні значення складових тензора напружень в елементах скінченно-елементної моделі									Еквівалентні напруження за Мізесом
		σ_x , МПа		σ_y , МПа		σ_z , МПа		τ_{xy} , МПа	τ_{yz} , МПа	τ_{xz} , МПа	σ_{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

Модуль пружності бетонної плити (МПа)	Товщина бетонної плити, см	Максимальні значення складових тензора напружень в елементах скінченно-елементної моделі									Еквівалентні напруження за Мізесом
		σ_x , МПа		σ_{Miz} , МПа		σ_z , МПа		τ_{xy} , МПа	τ_{yz} , МПа	τ_{xz} , МПа	
		стиск.	max	стиск.	max	max	max	max	max	max	max
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

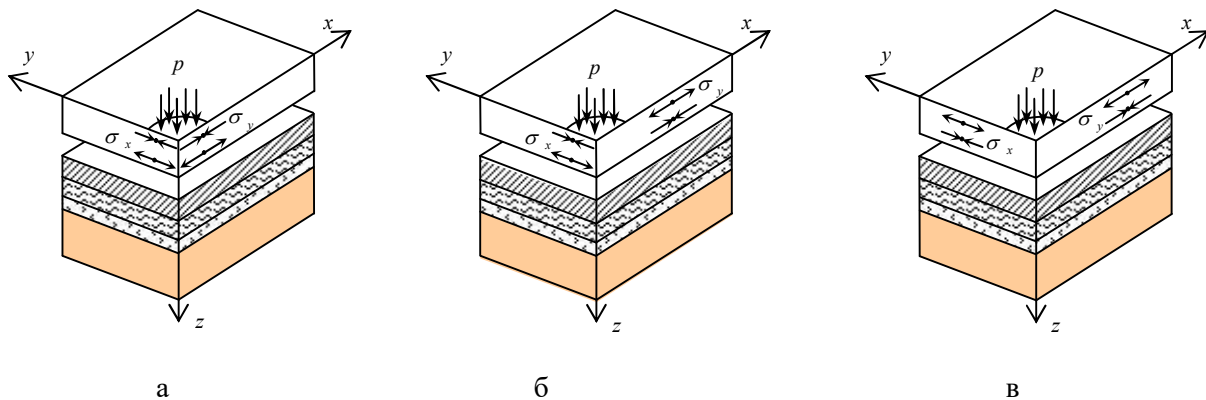


Рисунок 10 – Схема розташування розтягуючих напружень при різних положеннях транспортного навантаження
Figure 10 – The circuit location of tension at different positions of transport load

На рис. 10 зображено схематичне розташування максимальних розтягуючих напружень σ_x та σ_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. 10, а). При дії варіантів № 2 та № 3 характер розподілу напружень в цементобетонній плиті схожий. У верхніх шарах під штампом σ_x стискаючі, а в нижніх – розтягуючі, зовні штамп у верхніх шарах σ_y – розтягуючі, а в нижніх – стискаючі (рис. 10, б). При дії варіанту № 4 максимальні розтягуючі напруження розташовані зовні штамп у верхніх шарах цементобетонної плити (рис. 10, в).

На основі результатів чисельного моделювання отримано аналітичну залежність (1) та номограму для визначення розтягуючих напружень (рис. 11) $\sigma_{cy} = \sigma_{pt}$ при згині, що виникають в цементобетонному покритті автомобільних доріг від дії навантаження:

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

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 з'єднань на умови контакту плит з основою: при наявності поперечних швах штирів $K_{шт}=1$, при відсутності штирів $K_{шт}=1,05$;

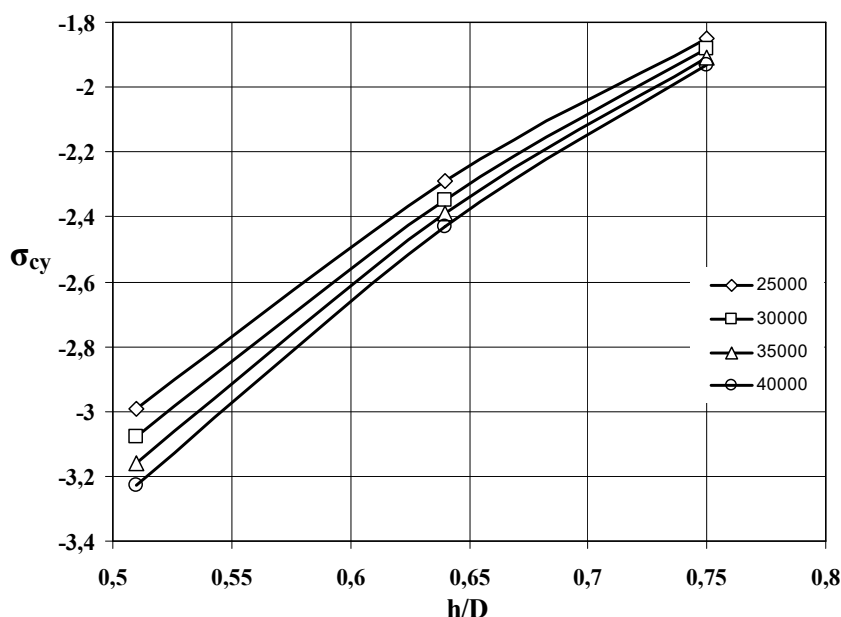


Рисунок 11 – Номограма для визначення розтягуючих напружень σ_{cy} при згині, що виникають в цементобетонному покритті автомобільних доріг від дії навантаження

Figure 11 – Nomogram for determination of stretching stresses of the concrete coating of highways from the action of loading

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_{tb}) із урахуванням двох емпіричних коефіцієнтів – втоми цементобетону (K_v) і умов набору міцності (K_M). Розрахунок монолітних цементобетонних покриттів проводять шляхом перевірки міцності покриття за формулою [4]:

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

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 σ_{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.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Радовский Б. С., Цементобетонные покрытия в США. «Дорожная Техника», 2009, с. 124 – 132.
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. Проектування.

5. Онищенко А.М. Метод визначення коефіцієнту температурної тріщиностійкості для уточнення розрахунку монолітного цементобетонного покриття автомобільних доріг / А.М. Онищенко, С.П. Возний // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. Київ. – 2016 – № 98. С. 179-181

REFERENCES

1. Radovskij, B. S. (2009) Cement concrete in the United States. «Expensive Tehnika», p. 124 –132 [in Ukrainian].
2. Radovskij, B. S. (2010) Cement concrete in the United States: Novoye Tendencii (Organizatsiya and directory on 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 trishnostyikosti to clarify calculation of monolithic cement-concrete covering of motor roads // Highways and road construction. -no 98, p. 179 – 181 [in Ukrainian].

РЕФЕРАТ

Онищенко А.М. Числове моделювання впливу розташування транспортного навантаження на цементобетонне покриття автомобільних доріг / А.М. Онищенко, С.М. Худолій, Н.П. Чиженко // Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науково-технічний збірник. – К. : НТУ, 2020. – Вип. 1 (46).

Стаття присвячена проблемі розробки більш точних математичних моделей деформування дорожніх одягів жорсткого типу в залежності від різного варіанту розташування навантаження та конструктивних особливостей плити.

Мета роботи – проведення моделювання методом скінчених елементів напружено-деформованого стану цементобетонного покриття автомобільних доріг в залежності від різного варіанту розташування навантаження та конструктивних особливостей плити.

Об'єкт дослідження – цементобетон для покриття автомобільних доріг.

Метод дослідження: статистичний аналіз наукових видань, технічної та нормативної літератури, метод скінчених елементів.

Враховуючи те, що на цементобетонне покриття автомобільної дороги діє складне просторове навантаження, тому для цього доцільно використати числовий метод визначення напружено-деформованого стану покриття, що базується на розв'язанні рівнянь теорії пружності – методу скінчених 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. Розглянуто чотири варіанти розташування транспортного навантаження. В результаті виконаного числового моделювання напружено-деформованого стану цементобетонного покриття вперше отримано аналітичну залежність для визначення розтягуючих напружень при згині, що виникають в цементобетонному покритті автомобільних доріг від дії навантаження з урахуванням різних розрахункових параметрів, 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.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ЦЕМЕНТОБЕТОННЕ ПОКРИТТЯ, НАПРУЖЕННЯ, МІЦНІСТЬ, МОРОЗОСТІЙКІСТЬ, ДОВГОВІЧНІСТЬ.

ABSTRACT

Onyshchenko A. M., Khudolii S. N., Chyzenko N.P. Numerical modelling of influence location of transport load on cementobetonno covering of highways. Visnyk National Transport University. Series «Technical sciences». Scientific and Technical Collection. – Kyiv: National Transport University, 2020. – Issue 1 (46).

The article is devoted to the problem of developing more precise mathematical models of deformation of road of hard type, depending on various options of loading location and design features of the plate.

The purpose of the work is to simulate the method of the finite elements of stressed-deformed state of cement concrete covering roads depending on various load location and design features of the plate.

Object of study – cement-concrete to cover roads.

Method of research: statistical analysis of scientific publications, technical and normative literature, finite element method.

Taking into account that cement concrete coating of the road operates complex spatial load so it is advisable to use numerical method for determination of stressed-strained state of coating based on solving the theory equations Elasticity – Finite element method as the most versatile and efficient.

Its peculiarity is a direct transition from the continuum to discrete analysis by dividing the area of an object that is investigated by a number of sub-areas and approximation of displacements fields, efforts, stresses, for example, using Engineering and settlement complex. Four variants of transport load are considered. As a result of the numerical modelling of the stressed-strained state of cement concrete covering for the first time obtained an analytical dependence for determination of tensile stresses at bending, arising of cement concrete coating of highways from Load actions taking into account the different settlement parameters, which allows to specify the general expression of the conditions of strength in calculating the cement-concrete coating taking into account the coefficient of frost resistance. This method allows assessing the strength of cement concrete covering of various categories with a given reliability and durability.

KEY WORDS: CEMENT CONCRETE COATING, TENSION, DURABILITY, FROST RESISTANCE, DURABILITY.

РЕФЕРАТ

Онищенко А.М. Численное моделирование влияния местонахождения транспортной нагрузки на цементобетонное покрытие автомобильных дорог / А.М. Онищенко, С.Н. Худолий, Н.П. Чиженко // Вестник Национального транспортного университета. Серия «Технические науки». Научно-технический сборник. – К.: НТУ, 2020. – Вып. 1 (46).

Статья посвящена проблеме разработки более точных математических моделей деформации дороги жесткого типа, в зависимости от различных вариантов расположения и конструктивных особенностей пластины.

Целью работ является имитация метода конечного состояния напряженно-деформированного состояния цементобетонного покрытия дорог в зависимости от различного расположения нагрузки и конструктивных особенностей плиты.

Объект исследования – цементобетон для покрытия дорог.

Метод исследования: статистический анализ научных публикаций, технической и нормативной литературы, метод конечных элементов.

Принимая во внимание, что цементобетонное покрытие дороги работает под сложной нагрузкой, поэтому целесообразно использовать численный метод для определения напряженно-деформированного состояния покрытия на основе решения уравнений теории упругости – методом конечных элементов как наиболее универсального и эффективного.

Его особенность заключается в прямом переходе от континуума к дискретному анализу путем деления области объекта, исследуемого рядом подобластей и приближения полей смещений, усилий, напряжений, например, с использованием инженерно-расчетного комплекса. Рассматриваются четыре варианта транспортной нагрузки. В результате численного моделирования напряженно-деформированного состояния цементобетонного покрытия впервые получена аналитическая зависимость для определения напряжений при изгибе, возникающих в цементобетонном покрытии от нагрузки с учетом различных параметров расчета, что позволяет определить общее выражение условий прочности при расчете цементобетонного покрытия с учетом коэффициента морозостойкости. Этот метод позволяет оценить прочность цементного бетонного покрытия автомобильных дорог различных категорий с заданной надежностью и долговечностью.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ЦЕМЕНТОБЕТОННОЕ ПОКРЫТИЕ, НАПРЯЖЕНИЕ, ПРОЧНОСТЬ, МОРОЗОСТОЙКОСТЬ, ДОЛГОВЕЧНОСТЬ.

АВТОРИ:

Онищенко Артур Миколайович, доктор технічних наук, доцент, Національний транспортний університет, завідувач кафедри мостів, тунелів та гідротехнічних споруд, e-mail: art.onish.1002@gmail.com, тел. +380687771899, Україна, 01010, м. Київ, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, к. 229, orcid.org/0000-0002-1040-4530.

Худолій Сергій Миколайович, кандидат технічних наук, доцент, Національний транспортний університет, доцент кафедри вищої математики, e-mail: s_hoodoliy@i.ua, тел. 0442847109, м. Київ, вул. Бойчука, 42, к. 510, orcid.org/0000-0001-6054-6708.

Чиженко Наталія Петрівна, Національний транспортний університет, старший викладач кафедри мостів, тунелів та гідротехнічних споруд, e-mail: chyzhenko_np@ukr.net, тел. +380507355080, Україна, 01010, м. Київ, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, к. 229, orcid.org/0000-0002-9152-2474.

AUTHOR:

Onyshchenko Artur Nikolaevich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, National Transport University, Professor, Head of Department of Bridges, Tunnels and waterworks, e-mail: artur_onish@bigmir.net, tel. +380687771899, Ukraine, 01010, Kyiv, M. Omylanovicha-Pavlenko Str., 1, K. 229, orcid.org/0000-0002-1040-4530.

Hudolij Serhii Mykolaiovych, Ph.D., associate Professor, National Transport University, assistant professor at Department of Higher Mathematics, e-mail: s_hoodoliy@i.ua, tel. 0442847109, Kyiv, Boychuk str., 42, K. 510, orcid.org/0000-0001-6054-6708.

Chyzhenko Natalia Petrivna, National Transport University, Senior lecturer of the Department of Bridges, tunnels and hydraulic structures, e-mail: chyzhenko_np@ukr.net, tel. +380507355080, Ukraine, 01103, Kyiv, M. Omylanovicha-Pavlenko Str., 1, K. 229, orcid.org/0000-0002-9152-2474.

АВТОРЫ:

Артур Онищенко, доктор технических наук, доцент Национального транспортного университета, заведующий кафедрой мостов, тоннелей и гидротехнических сооружений, artur_onish@bigmir.net, тел. +380687771899, Украина, 01010, Киев, ул. М. Омелянович-Павленко, 1, к. 229, orcid.org/0000-0002-1040-4530.

Худолій Сергей Николаевич, кандидат технических наук, доцент Национальный транспортный университет, доцент кафедры высшей математики, e-mail: s_hoodoliy@i.ua, тел. 0442803942, Украина, 01010, г. Киев, ул. Бойчука, 42, к. 510, orcid.org/0000-0001-6054-6708.

Чиженко Наталия Петровна, Национальный транспортный университет, старший преподаватель кафедры мостов, тоннелей и гидротехнических сооружений, e-mail: chyzhenko_np@ukr.net, тел. +380507355080, Украина, 01010, м. Київ, ул. М. Омеляновича-Павленка, 1, к. 229, orcid.org/0000-0002-9152-2474.

РЕЦЕНЗЕНТИ:

Славінська О.С., доктор технічних наук, професор, декан факультету транспортного будівництва Національного транспортного університету, Київ, Україна

Каськів В.І., кандидат технічних наук, доцент, заступник директора з наукової роботи ДП «ДерждорНД», Київ, Україна

REVIEWER:

Slavinska O. S, Doctor of Technical Science, Professor, dean of the Faculty of Transport Construction of national Transport University, Kyiv, Ukraine

Kaskiv V. I., Ph.D., Associate professor, deputy Director on Scientific work of State enterprise «DerzhdorNii», Kyiv, Ukraine