

УДК 539.3
UDC 539.3

DOI: 10.33744/0365-8171-2023-113.1-069-082

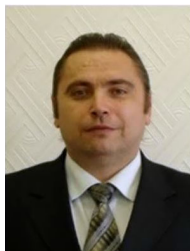
ПРОГНОЗУВАННЯ МАКСИМАЛЬНОГО РІВНЯ ДОТИЧНИХ НАПРУЖЕНЬ В АСФАЛЬТОБЕТОННОМУ ПОКРИТТІ ЯКЕ ВЛАШТОВАНЕ НА БЕТОННІЙ ОСНОВІ АВТОМОБІЛЬНОЇ ДОРОГИ

PREDICTION OF THE MAXIMUM LEVEL OF TANGENT STRESSES IN THE ASPHALT CONCRETE SURFACE LAYING ON THE CONCRETE BASE OF A MOTOR ROAD



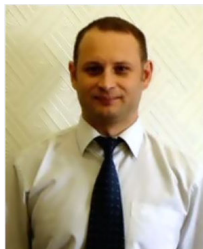
Онищенко Артур Миколайович, доктор технічних наук, професор, Національний транспортний університет, завідувач кафедри мостів, тунелів та гідротехнічних споруд. Київ, Україна, e-mail: onyshchenko.a.m.ntu@gmail.com,

<https://orcid.org/0000-0002-1040-4530>



Соловійов Ігор Леонідович, кандидат технічних наук, доцент, Національний транспортний університет, кафедра вищої математики. Київ, Україна, e-mail: i.soloviov@ntu.edu.ua

<https://orcid.org/0000-0001-5203-4139>



Худолій Сергій Миколайович, кандидат технічних наук, доцент, Національний транспортний університет, кафедра вищої математики. Київ, Україна, e-mail: s_hoodoliy@i.ua

<https://orcid.org/0000-0001-6054-6708>



Федоренко Олег Володимирович, Начальник управління експлуатації доріг Укравтодору, Київ, Україна e-mail: 50281@ukr.net,

<https://orcid.org/0000-0003-4288-5508>

Анотація. У даній статті для оцінки рівня дотичних напружень в асфальтобетонному покритті яке влаштовано на бетонній основі було проведено моделювання методом скінчених елементів різних конструкцій дорожнього одягу які відрізняються різними значеннями товщини шару асфальту та його модулем пружності. Товщина шару варіювалась в межах від 5 см до 30 см з кроком в 5 см. Модуль пружності асфальту від 3000 МПа до 9000 МПа. Крім того для різних варіантів конструкцій

варіювалось положення транспортного навантаження по відношенню до деформаційного шва між плитами бетонної основи. Розрахунки методом скінчених елементів показали що τ_{xz} в даному випадку найбільша дотична складова тензору напружень. Серед різних положень навантаження обирався варіант при якому дотичні напруження τ_{xz} в асфальті приймали максимальне за модулем значення. За отриманими таким чином значеннями максимальних дотичних напружень в асфальті побудовано графік поверхні функції τ_{max} що залежить від двох змінних h та E . З вигляду цієї поверхні видно що τ_{max} зростають зі зменшенням товщини асфальтного покриття та майже лінійно залежать від модуля пружності. Для цієї поверхні запропоновано апроксимуючу функцію за допомогою якої можна наближено оцінити рівень максимальних дотичних напружень в асфальтному шарі над деформаційним швом для конструкцій які мають проміжні значення h (см) та E (МПа).

За графіком рівнів цієї поверхні можна підібрати параметри конструкції дорожнього одягу так щоб в ній рівень максимальних дотичних напружень був нижче допустимого.

Ключові слова: автомобільна дорога, асфальтобетонне покриття, транспортні навантаження, поле напружень, напружено-деформований стан.

Вступ. Незважаючи на широке застосування асфальтобетонних покриттів на жорсткій блочній основі автомобільних доріг і великий накопичений досвід підвищення їх якості, руйнування у вигляді поперечних тріщин в зоні стику блоків все ще залишається найпоширенішим при різному впливі транспортних навантажень і температур. Поява тріщин є джерелом подальшого руйнування як самого асфальтобетонного покриття так і всього дорожнього одягу.

Забезпечення тріщиностійкості асфальтобетонного покриття є важливою задачею при будівництві автомобільних доріг. Особливу актуальність це питання набуває у зв'язку із збільшеною потребою в реконструкції або ремонті існуючого старого покриття, що вже має поперечні тріщини на блочній цементобетонній основі дорожнього одягу. В такому випадку швидко з'являються копіюючі дотичні зрізаючі тріщини в асфальтобетонному покритті над існуючими цементобетонними блочними швами дорожнього одягу.

Традиційні рішення покращують якість асфальтобетонної суміші за рахунок поліпшення підбору інгредієнтів, введення різноманітних модифікуючих домішок, удосконалення процесу приготування тощо, але не можуть повністю вирішити проблему підвищення тріщиностійкості асфальтобетонного покриття на жорсткій основі автомобільних доріг для забезпечення їх необхідної довговічності.

Наукові дослідження та практичний досвід останніх років показали, що довговічність асфальтобетону можна підвищити шляхом макроскопічного армування його синтетичними сітками. Це забезпечує підвищення його міцності на розтяг і покращує здатність сприймати розтягуючі і зрізаючі напруження. Завдяки цьому збільшується опір асфальтобетонного покриття на блочній жорсткій основі розтягуючим і зрізаючим напруженням, що сприяє підвищенню його тріщиностійкості. Механізм роботи армуючих сіток в асфальтобетонному покритті пояснюють наступною схемою – з появою розтягуючих та зрізаючих напружень в асфальтобетоні їх починає сприймати, включаючись у роботу, армуюча сітка. Армуюча сітка в асфальтобетонному покритті на блочній жорсткій основі підвищує опір розтягуючим і зрізаючим зусиллям при дії навантаження транспортного засобу і сприяє підвищенню довговічності.

Однак до цього часу відсутній науково обґрунтований метод розрахунку на тріщиностійкість асфальтобетонного покриття на жорсткій основі автомобільної дороги, що не дозволяє цілеспрямовано та ефективно регулювати тріщиностійкість асфальтобетонного покриття на жорсткому дорожньому одязі від дії навантаження пневматичних коліс транспортних засобів .

Тому актуальність даної роботи зумовлена необхідністю вирішення важливої проблеми – підвищення тріщиностійкості від дотичних зрізаючих напружень в асфальтобетонному покритті , що влаштоване на блочній жорсткій основі дорожнього одягу автомобільної дороги .

Об'єкт дослідження – асфальтобетонне покриття на блочній основі жорсткого дорожнього одягу.

Предмет дослідження – тріщиностійкість від дотичних зрізаючих напружень в асфальтобетонному покритті від дії навантаження пневматичних коліс транспортних засобів .

Літературний аналіз. В Україні досвід застосування асфальтобетонного покриття на блочній цементобетонній основі не значний. Вже більше 30 років на зарубіжних автомагістралях широко використовуються армуючі матеріали. Літературні дані свідчать, що тільки в штаті Нью-Йорк (США) використання армуючих матеріалів у дорожніх конструкціях економить приблизно 4 мільйони доларів на рік. Бельгійські дослідження (Rido J. M.) також показали, що введення армуючих матеріалів між шарами асфальтобетону значно зменшує розтягуючі та дотичні напруження, що виникають в асфальтобетоні, і запобігає поширенню тріщин від нижнього шару покриття до верхнього. В італійських дослідженнях виявлено доцільність полімерного армування асфальтобетонного покриття за наявності тріщин в основі. У Данії було запропоновано створювати шар зносу з армованого асфальтобетону під час реставрації асфальтобетонного покриття автомобільних доріг. Компанія «Тое спан бонді» (Японія) розробила армуючий матеріал для укладання під асфальтобетонні покриття на тріщинисті основи, завдяки чому зменшується деформація асфальтобетону. У м. Ясси (Румунія) було проведено дослідження щодо армування асфальтобетону поліамідною сіткою для підвищення його міцності на розрив.

Завдяки дослідженням цих учених встановлено, що тріщини виникають від діючих в матеріалі розтягуючих та дотичних напружень, обумовлених дією навантаження транспортних засобів та температури. Ці напруження сприяють розриву зв'язків в асфальтобетоні аж до утворення макротріщин.

Аналіз робіт [1-9], присвячених вивченню тріщиностійкості дорожнього одягу, показав, що за різних навантажень транспортних засобів на утворення поверхневих тріщин більш суттєвий вплив мають: розтягування та зрізання матеріалу покриття над швами або тріщинами тріщинувато-блочної основи; нерівномірні температурні зміни розмірів складових компонентів асфальтобетону через різницю їх термомеханічних властивостей.

Це вказує на необхідність розробки способу забезпечення стійкості до розтріскування асфальтобетонного покриття дорожнього одягу на жорсткій блочній основі від напружень зсуву і на основі цього підвищення довговічності всієї конструкції дорожнього одягу.

Виклад основного тексту. Для оцінки рівня дотичних напружень в асфальтобетонному покритті яке влаштовано на бетонній основі було проведено моделювання методом скінчених елементів різних конструкцій дорожнього одягу які відрізняються різними значеннями товщини шару асфальту та його модулем пружності. Товщина шару варіювалась в межах від 5 см до 30 см з кроком в 5 см. Модуль пружності асфальту від 3000 МПа до 9000 МПа.

Було розглянуто чотиришарову конструкцію жорсткого дорожнього одягу, що складається з асфальтного покриття, цементобетонних плит, шару піску, які влаштовані на ґрунтовій основі. Види матеріалів фрагментів конструкції, їхні товщини h_1, h_2, h_3, h_4 і значення механічних параметрів наведені у таблиці 1. В ній позначено: E – модуль пружності; ν – коефіцієнт Пуассона; ρ – густина.

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

| Номер i шару | Матеріал | h_i (м) | E_i (Па) | ρ кг/м ³ | Коефіцієнт Пуассона ν |
|----------------|--|-----------|---|--------------------------|---------------------------|
| 1 | Асфальтобетон пористий на основі бітуму модифікованого полімером | 0,05 -0,3 | $3,0 \cdot 10^9$ - $9,0 \cdot 10^9$ | 2390 | 0,23 |
| 2 | Цементобетон класу В25 ПЗ F200 W6 | 0,2 | $3,5 \cdot 10^{10}$ | 2800 | 0,18 |
| 3 | Пісок | 0,2 | $0,1 \cdot 10^9$ | 2050 | 0,3 |
| 4 | Ґрунт | 2,5 | $0,1 \cdot 10^9$ | 1960 | 0,35 |

Розмір плит вздовж напрямку руху транспорту складає $L = 5$ м та в поперечному напрямку 3 м. Між плитами влаштовані шви розширення, шви стиснення та повздовжні шви. Прийmemo припущення, що шви влаштовані на всю товщину плити та не укріплені штирями. Товщина деформаційного шва прийнята 3 см.

Крім того для різних варіантів конструкцій варіювалось положення транспортного навантаження по відношенню до деформаційного шва між плитами бетонної основи. Розташування транспортного навантаження відносно деформаційного шва має 18 положень (Рис. 1.)

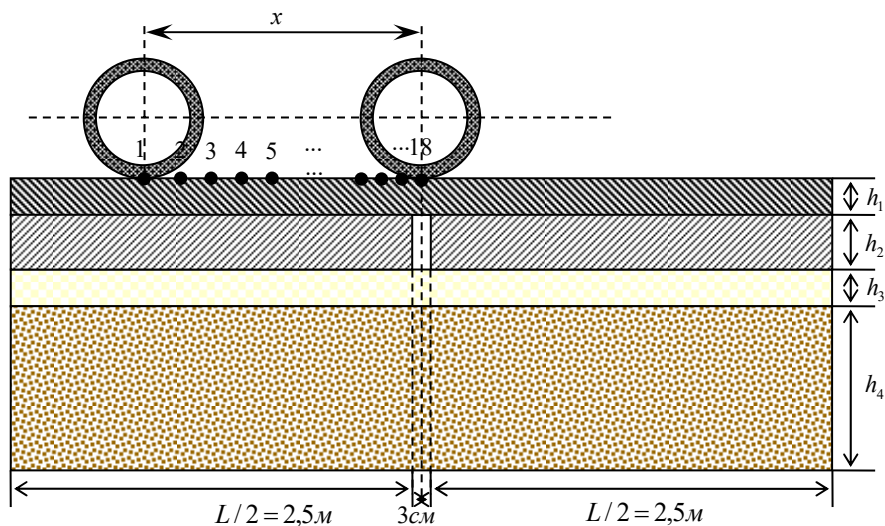


Рисунок 1 – Розрахункова схема виникнення розтягуючих (σ) та зрізаючих (дотичних) (τ) напружень в асфальтобетонному покритті, яке влаштоване на цементобетонній основі дорожнього одягу від прокочування пневматичного колеса транспортного засобу для різних варіантів навантаження (1, 2, 3, ..., 18) які відрізняються положенням центру колеса по відношенню до центру шва x .

Figure 1 – Calculation diagram of the occurrence of tensile (σ) and shear (tangential) (τ) stresses in the asphalt concrete coating, which is arranged on a cement concrete base of the road surface from the rolling of the pneumatic wheel of the vehicle for different load options (1, 2, 3, ..., 18) which differ in the position of the center of the wheel in relation to the center of the seam x .

Розглянемо скінчено-елементну модель даної конструкції (Рис. 2.). Осі Ox та Oy розташовані в горизонтальній площині (верхня грань асфальтобетонного покриття), Ox направлена в напрямку руху транспортного навантаження, початок координат знаходиться в центрі шва, вісь Oz направлена вертикально вниз.

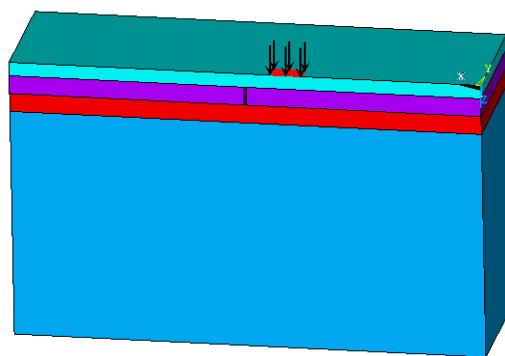


Рисунок 2 – Модель половини виділеного фрагменту конструкції.
Figure 2 – Model of half of the selected fragment of the structure.

Розрахунки методом скінчених елементів показали що τ_{xz} в даному випадку найбільша дотична складова тензору напружень. Серед різних положень навантаження обирався варіант при якому дотичні напруження τ_{xz} в асфальті приймали максимальне за модулем значення (положення 8-12 для різних конструкцій). Отримані таким чином значення максимальних дотичних напружень в асфальті представлено в таблиці 2.

Таблиця 2 – Значення максимальних дотичних напружень в асфальті, МПа для різних варіантів конструкцій дорожнього одягу.

Table 2 – The value of the maximum tangential stresses in asphalt, МPa, for various options of road wear structures.

| Максимальні дотичні напруження, МПа | | Модуль пружності асфальту E , Мпа | | | |
|-------------------------------------|----|-------------------------------------|------|------|------|
| | | 3000 | 5300 | 7000 | 9000 |
| Товщина асфальтного шару h , см | 5 | 2,03 | 2,2 | 2,25 | 2,26 |
| | 10 | 1,27 | 1,29 | 1,27 | 1,32 |
| | 15 | 0,94 | 0,93 | 0,92 | 0,97 |
| | 20 | 0,77 | 0,75 | 0,78 | 0,81 |
| | 25 | 0,6 | 0,61 | 0,63 | 0,65 |
| | 30 | 0,47 | 0,5 | 0,51 | 0,52 |

За даними таблиці 2 побудовано графік поверхні функції τ_{max} що залежить від двох змінних h та E , який представлено на рис. 3. З вигляду цієї поверхні видно що τ_{max} зростають зі зменшенням товщини h асфальтного покриття та майже лінійно залежать від модуля пружності E .

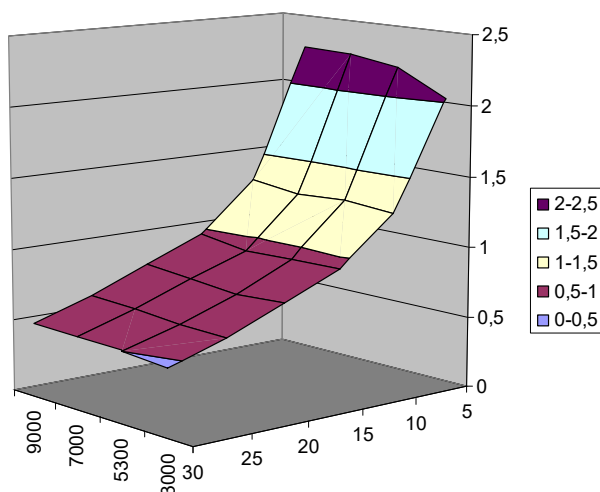


Рисунок 3 – Максимальні значення дотичних напружень в асфальті (МПа) як функція двох змінних h (см) та E (МПа).

Figure 3 – Maximum values of tangential stresses in asphalt (MPa) as a function of two variables h (cm) and E (MPa).

На рис. 4 представлені рівні максимальних значень дотичних напружень в асфальті над деформаційним швом (МПа) в залежності від змінних h (см) та E (МПа). За цим графіком можна підібрати параметри конструкції дорожнього одягу так щоб в ній рівень максимальних дотичних напружень був нижче допустимого.

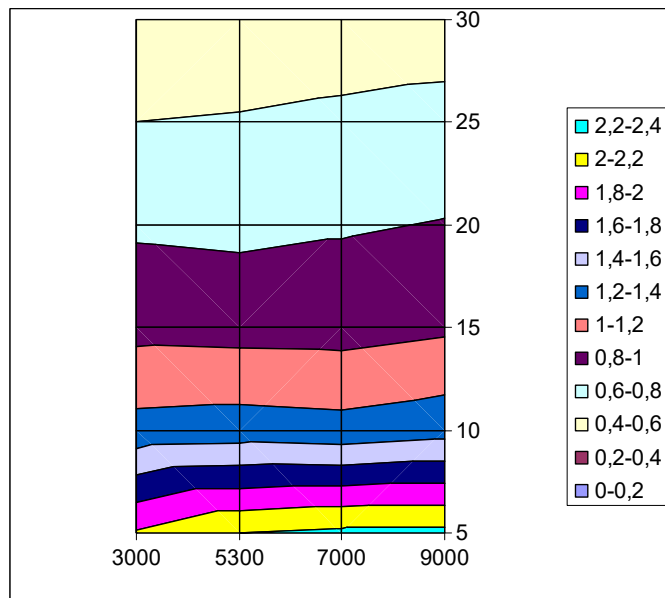


Рисунок 4 – Рівні максимальних значень дотичних напружень в асфальті (МПа) в залежності від змінних h (см) та E (МПа).

Figure 4 – Levels of maximum values of tangential stresses in asphalt (MPa) depending on the variables h (cm) and E (MPa).

Для поверхні зображеної на рис. 3 запропоновано апроксимуючу функцію за допомогою якої можна наближено оцінити рівень максимальних дотичних напружень в асфальтному шарі над деформаційним швом для конструкцій які мають проміжні значення товщини шару h та модуля пружності E .

$$\tau_{\max} = \frac{(-a \cdot h + b) \cdot E}{c} + 7.15 \cdot h^{-a} \quad (1)$$

де h – товщина покриття; E – модуль пружності асфальтобетонного покриття; a, b, c – експериментальні параметри ($a = 0,76$; $b = 23,8$; $c = 1000000$).

На рис. 5 суцільними лініями зображено значення τ_{\max} обчислені за допомогою апроксимуючої функції, точками наведено результати чисельного моделювання

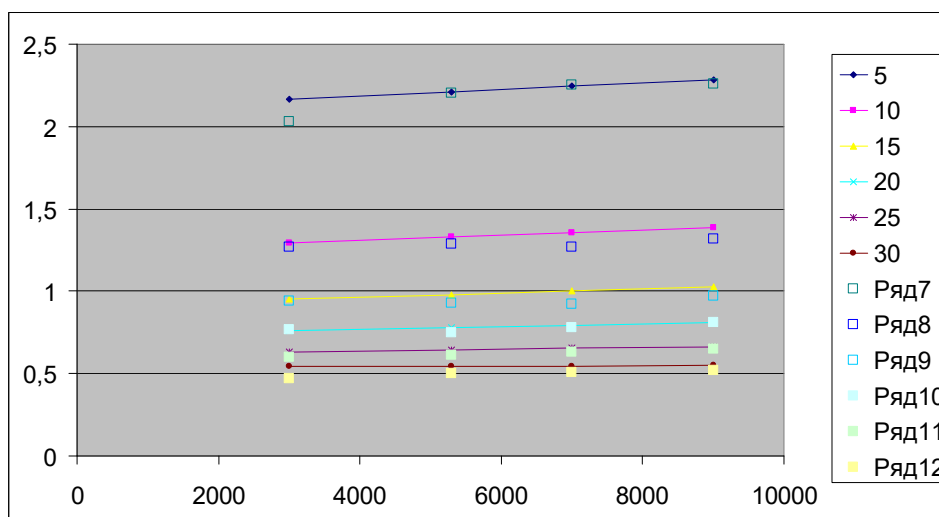


Рисунок 5 – Максимальні значення дотичних напружень в асфальті (МПа) для різних товщин h (см) в залежності від E (МПа).

Figure 5 – Maximum values of tangential stresses in asphalt (MPa) for different thicknesses h (cm) depending on E (MPa).

Таким чином, отримано залежність (1) для визначення максимальних дотичних зрізаючих напружень в асфальтобетонному покритті на блочній цементобетонній основі, в умовах, коли матеріал асфальтобетонного покриття володіє пружними властивостями і його напружено-деформований стан можна описати законом Гука. У зв'язку з тим, що асфальтобетонне покриття володіє в'язкопружними властивостями, тобто його реологічні властивості залежать від температури та часу дії навантаження. Базуючись даними [4-8 та ін.], можна скористатися інтегральними рівняннями лінійної в'язкопружності. У даному випадку рівняння (1) можна переписати з урахуванням в'язкопружних властивостей покриття при визначенні дотичних максимальних напружень, що виникають в асфальтобетонному покритті від дії навантаження пневматичних коліс транспортних засобів за наступним рівнянням:

$$\tau_{\max}(t) = \frac{(-a \cdot h + b) \cdot R(t)}{c} + 7.15 \cdot h^{-a} \quad (2)$$

де $R(t)$ – функція релаксації асфальтобетонного покриття;
 t – час, який передує моменту спостереження

При вирішенні рівняння (2), за результатами дослідників [4-8], можна використовувати функції релаксації у вигляді модифікованого степеневого закону, який дає достатньо точні результати обчислень:

$$R(t) = E_{\partial z} + (E_{\text{mm}} - E_{\partial z}) \cdot \left(1 + \frac{t}{\eta}\right)^{-\lambda}, \quad (3)$$

де λ і η – постійні, що визначаються в результаті експерименту;
 $E_{\partial z}$ і E_{mm} – відповідно довготривалий і миттєвий модулі пружності асфальтобетонного покриття.

Також, можна використовувати функції релаксації у вигляді суми експонентів:

$$R(t) = H + \sum_{i=1}^n a_i \exp(-t/b_i), \quad (4)$$

де H , a_i , b_i – постійні. Але для достатньої точності апроксимації доводиться в виразі (4) використовувати суму з 10-15 членів.

Високої точності опису експериментально встановленої функції релаксації $R(t)$, як показує досвід, дозволяє добитися її уявлення у вигляді суми експонент.

Тому, в нашому випадку використовується функція релаксації за залежністю (3). Для визначення функції релаксації матеріалу, для будь-якої температури $R(t, T)$, достатньо знати функцію релаксації при будь-якій температурі $R(t, T)$ та коефіцієнт температурно-часового зміщення $a(T)$. Тоді можна записати:

$$R(t, T) = R(\mu, T_1), \quad (5)$$

$$\text{де } \mu = \int_0^t \frac{dt}{a(T)}, \quad (6)$$

де μ – приведений час;

$a(T)$ – коефіцієнт температурно-часового зміщення, який залежить від температури;

T_1 – поточна температура.

Залежність $a(T)$ від температури T встановлюється експериментально для кожного конкретного матеріалу.

Отже, коефіцієнт $a(T)$ являє собою зсув за шкалою $\lg t$ функції релаксації, якщо $\lg a = 0$, то властивості матеріалу не залежать від температури. Тобто, чим більше значення $\lg a$, тим сильніше змінюються властивості матеріалу зі зміною його температури.

Температурно-часовий зсув a в загальному випадку для асфальтобетону є нелінійною функцією від температури, що отримано з результатів експериментальних досліджень [4-8].

Функцію температурно-часової аналогії описували виразом [4-8]:

$$a_T(T, Q) = e^{-p(T-Q)}, \quad (7)$$

де p – постійна, що визначається експериментально;

T, Q – температура відповідно поточна та приведена.

Залежність $\theta(T)$ (коефіцієнт температурно-часової аналогії) від температури T встановлюється експериментально для кожного конкретного матеріалу.

Дану залежність можна встановити в координатах:

$$\lg \theta(T) - (T(t) - T_s), \quad (8)$$

де $T(t)$ – поточна температура;

T_s – температура приведення.

Встановлені вимоги задовольняє залежність:

$$a(T) = \frac{1}{e^{p[T(t)-T_s]}}, \quad (9)$$

де p – деякий експериментальний параметр з розмірністю $[1/^\circ\text{C}]$;

$T(t)$ – поточна температура;

T_s – температура приведення.

Отже, визначивши даний параметр, можна з більшою точністю визначати максимальні дотичні зрізаючі напруження в асфальтобетонному покритті від дії навантаження транспортних засобів та температури.

Окрім цього, необхідна залежність функції релаксації від кількості полімеру типу СБС, що в свою чергу дозволить не тільки спростити самий розрахунок та підбір необхідного складу асфальтобетону, а також дозволить в короткий строк оптимізувати кількість полімеру типу СБС, для оцінки дотичних максимальних напружень в асфальтобетонному покритті.

У роботі [4, 5], в результаті лабораторних досліджень було виявлено особливість зміни функції релаксації в залежності від кількості полімеру типу СБС $\lg \delta(q) - (q(t) - q_n)$, однак не враховано час модифікації бітумного в'язучого полімером, що вагомо впливає на функцію релаксації. Отже, загальна схема зміни функції релаксації від часу модифікації бітумного в'язучого полімером має такий вигляд (рис. 6).

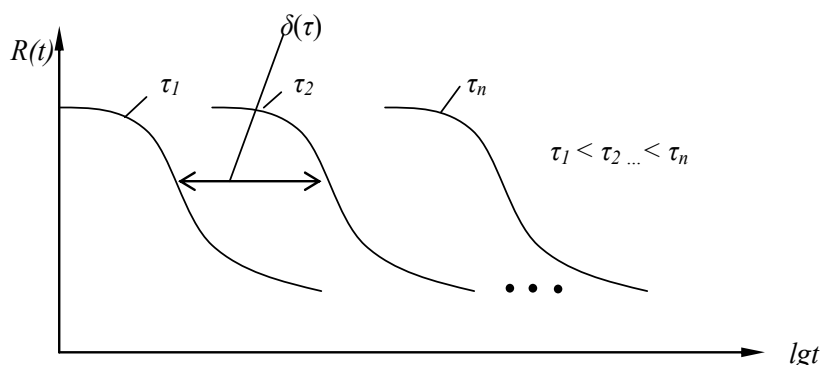


Рисунок 6 – Типовий графік функції релаксації від часу модифікації бітумного в'язучого полімером, $\delta(\tau)$ – коефіцієнт концентраційно-часової аналогії, який залежить від часу перемішування бітумного в'язучого та полімерного латексу

Figure 6 – A typical graph of the relaxation function versus the time of bituminous binder polymer modification, $\delta(\tau)$ - is the coefficient of concentration-time analogy, which depends on the time of mixing bituminous binder and polymer latex

У результаті, можна застосувати так звану концентраційно-часову суперпозицію, що є подібною до функції релаксації, завдяки якій можна описати зміну функції релаксації від часу перемішування бітумного в'язучого та полімеру типу СБС. Функція концентраційно-часового зсуву представляє собою зсув за шкалою $\lg t$ функції релаксації.

Експериментально для кожного конкретного матеріалу встановлюється залежність $\delta(\tau)$ від температури T .

Дана залежність встановлюється в координатах:

$$\lg \delta(\tau) - (\tau(t) - \tau_n), \quad (10)$$

де $\tau(t)$ – поточний час перемішування;

τ_n – приведений час перемішування.

При підборі аналітичного виразу, за умови відомих властивостей експериментальної залежності $\lg \delta(\tau) = f(\tau(t) - \tau_n)$, використовували залежність:

$$\delta(\tau) = \frac{1}{e^{\beta[\tau(t) - \tau_n]}}, \quad (11)$$

де β – експериментальний параметр з розмірністю $[1/T]$;

$\tau(t)$ – поточний час перемішування;

τ_n – приведений час перемішування.

Отже, знаючи параметри функції $\delta(\tau)$ можна прогнозувати зміну функції релаксації в залежності від часу перемішування бітумного в'язучого та полімеру типу СБС, що в свою чергу покращить якість і точність розрахунків при проектуванні асфальтобетонного покриття на цементобетонній блочній основі, з метою оцінки зрізаючих максимальних дотичних напружень в покритті.

У тому випадку, коли реологічні властивості асфальтобетону залежать від температури, можна скористатися температурно-часовою суперпозицією для визначення температурних напружень, яка застосовується для термо-реологічно простих матеріалів [4-8].

Для визначення температурних напружень для змінних властивостей від змінної температури необхідно у функції релаксації час t та t_1 замінити на відповідні приведення:

$$\mu = \int_0^t \frac{dt}{a [T(t)]}, \quad (12)$$

$$\mu' = \int_0^{t_1} \frac{dt}{a [T(\tau)]}, \quad (13)$$

або

$$t - t_1 \quad \text{на} \quad \mu - \mu' = \int_{t_1}^t \frac{dt}{a [T(t)]}. \quad (14)$$

Таким вимогам задовольняє залежність:

$$a(T) = e^{-P(T_0 + k \cdot t - T_s)}, \quad (15)$$

де p – деякий експериментальний параметр з розмірністю $[1/^\circ\text{C}]$.

Підставимо знайдену залежність (14) в рівняння (6) та проведемо інтегрування:

$$\mu = \int_0^t \frac{dt}{\frac{1}{e^{-P(T_0 + k \cdot t - T_s)}}}, \quad \text{або} \quad \mu = \int_0^t e^{P(T_0 + k \cdot t - T_s)} dt. \quad (16)$$

Тоді (12) перепишемо:

$$\mu - \mu' = \int_{t_1}^t e^{P(T_0 + k \cdot t - T_s)} \cdot dt, \quad (17)$$

або

$$\mu - \mu' = \int_{t_1}^t e^{P(T_0 - T_s)} \cdot e^{P \cdot k \cdot t} \cdot dt, \quad (18)$$

або

$$\mu - \mu' = e^{P(T_0 - T_s)} \int_{t_1}^t e^{P \cdot k \cdot t} \cdot dt. \quad (19)$$

Виконаємо заміну перемінної. Нехай $u = P \cdot k \cdot t$, тоді $du = P \cdot k \cdot dt$;

$$dt = \frac{1}{Pk} \cdot du; \quad \text{при } t = t_1, \quad u = P \cdot k \cdot t_1; \quad \text{при } t = t, \quad u = P \cdot k \cdot t.$$

Тоді

$$\mu - \mu' = \frac{1}{P \cdot k} e^{P(T_0 - T_S)} \int_{P \cdot k \cdot t_1}^{P \cdot k \cdot t} e^u \cdot du, \quad (20)$$

або

$$\mu - \mu' = \frac{e^{P(T_0 + k \cdot t - T_S)}}{P \cdot k} \left(1 - e^{+P \cdot k(t_1 - t)} \right), \quad (21)$$

або

$$\mu - \mu' = -\frac{e^{P(T_0 + k \cdot t - T_S)}}{P \cdot k} \left(e^{-P \cdot k \cdot (t - t_1)} - 1 \right). \quad (22)$$

З урахуванням (21) остаточно отримаємо функцію релаксації у такому вигляді:

$$R(\mu - \mu') = E_{\sigma z} + (E_{\mu m} - E_{\sigma z}) \cdot \left(1 + \frac{\frac{e^{P(T_0 + k \cdot t - T_S)} \left(e^{-P \cdot k \cdot (t - t_1)} - 1 \right)^{-\lambda}}{P \cdot k}}{\eta} \right). \quad (23)$$

Знаючи приведенний час та застосовуючи функцію релаксації у вигляді (23) для рівняння (2), а також інтегральне рівняння лінійної в'язкопружності, знайдемо дотичні зрізаючі максимальні напруження (2) в асфальтобетонному покритті з використанням полімеру типу СБС на цементобетонній блочній основі автомобільної дороги для розробленої розрахункової схеми (рис. 1), а також з урахуванням армування асфальтобетонного покриття:

$$\tau_{\max}(t, T(t)) = \left(\frac{(-a \cdot h + b) \cdot E_{\sigma z} + (E_{\mu m} - E_{\sigma z}) \cdot \left(1 + \frac{\frac{e^{P(T_0 + k \cdot t - T_S)} \left(e^{-P \cdot k \cdot (t - t_1)} - 1 \right)^{-\lambda}}{P \cdot k}}{\eta} \right)}{c} + 7.15 \cdot h^{-a} \right) \cdot K_{арм} \quad (24)$$

Де $K_{арм}$ - коефіцієнт армування асфальтобетонного покриття

Для оцінки тріщиностійкості пропонується умова граничного стану асфальтобетонних шарів на жорсткій основі дорожнього одягу автомобільних доріг, а саме напруження, що виникають при їх зрізанні під дією повторних короткочасних навантажень не повинні викликати порушення структури матеріалу й призводити до утворення зрізаючих тріщин, тобто повинна бути забезпечена умова:

$$K_{мц} \geq \frac{\tau_{заг}}{\tau_{\max}(t, T(t))} \quad (25)$$

де $K_{мц}$ – необхідний коефіцієнт міцності з урахуванням заданого рівня надійності;
 $\tau_{заг}$ – гранично допустиме дотичне напруження зрізу матеріалу, шару з урахуванням втоми;
 $\tau_{\max}(t, T(t))$ – найбільше напруження розтягу у розглянутому шарі.

Обчислюють допустимі зрізаючі дотичні напруження за формулою:

$$\tau_{zag\ don} = \tau_p, \quad (26)$$

де τ_p – розрахунковий опір зрізу з урахуванням повторної дії навантажень знаходять за формулою:

$$\tau_p = \tau_{lab} k_m k_{kn} k_T \quad (27)$$

- де τ_{lab} – лабораторне значення границі міцності на зріз за одноразового прикладання навантаження;
 k_m – коефіцієнт, що враховує зниження міцності в часі від дії погод-но-кліматичних умов;
 k_T – коефіцієнт, що враховує зниження міцності матеріалу в конструкції в результаті температуро-усадкових впливів;
 k_{kn} – коефіцієнт, що враховує повторність навантажень на дорозі знаходять за формулою:

$$k_{kn} = k_{np} \times \sum N^{-\left(\frac{1}{m}\right)}, \quad (28)$$

- де k_{np} – коефіцієнт, що враховує вплив повторних навантажень у нерозрахунковий період;
 m – показник втоми;
 $\sum N$ – сумарна інтенсивність руху.

Висновки

1. Запропоновано розрахункову схему роботи асфальтобетонного покриття яке влаштоване на цементобетонній основі дорожнього одягу автомобільної дороги від дії навантаження пневматичних коліс транспортних засобів для різних варіантів навантаження (1, 2, 3, ... , 18) які відрізняються положенням центру колеса по відношенню до центру шва x для визначення розтягуючих (σ) та зрізаючих (дотичних) (τ) напружень в покритті. Дана розрахункова схема дозволила розробити скінчено-елементну модель даної конструкції для моделювання і визначення розтягуючих (σ) та зрізаючих (дотичних) (τ) напружень в асфальтобетонному покритті від дії навантаження транспортного засобу.

2. Визначено наближену аналітичну залежність максимальних дотичних напружень в асфальтобетонному покритті яке влаштоване на цементобетонній основі дорожнього одягу автомобільної дороги від дії навантаження пневматичних коліс транспортних засобів.

3. Отримано аналітичні залежності для розрахунку максимальних дотичних напружень, що виникають в асфальтобетонному покритті та його шарах від коливання температур, а також дії навантаження транспортних засобів. Ці аналітичні залежності отримані з урахуванням термореологічних властивостей асфальтобетону, що описуються наступними функціями та параметрами: релаксації, концентраційно-часового зміщення.

4. Розроблена умова граничного стану для оцінки міцності при дії дотичних зрізаючих напружень в асфальтобетонному покритті на цементобетонній основі жорсткого дорожнього одягу автомобільної дороги від дії навантаження пневматичних коліс транспортних засобів на тріщиностійкість з урахуванням заданого рівня надійності.

Перелік посилань

1. Мозговий В.В., Бесараб О.М., Іщенко О.М., Ладиженський І.С. Обґрунтування вибору умови граничного стану для оцінки тріщиностійкості асфальтобетонних шарів при дії транспортного навантаження// Автомобільні дороги і дорожнє будівництво, 2003, випуск №67. – Київ, Національний транспортний університет. – С.59-68.
2. І.С. Ладиженський, дослідження впливу армуючих сіток на температурну тріщиностійкість асфальтобетонних шарів// Автомобільні дороги і дорожнє будівництво, 2004, випуск № 70. – Київ, Національний транспортний університет. – С. 17-21.
3. В.В. Мозговий, В.В. Смолянець, І.С. Ладиженський, О.В. Прудкий. Уточнення розрахункових температур та інтенсивності руху при розрахунках дорожнього одягу міських вулиць і доріг// Безпека дорожнього руху України. Науково-технічний збірник, №4 (19), 2004.– С.- 55-59.
4. Онищенко А. М. Прогнозування та оцінка залишкових деформацій асфальтобетонного покриття з використанням методу скінченних елементів / А. М. Онищенко, С.М. Худолій, М.В. Гаркуша, О.М. Лещук / Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науково-технічний збірник. – К. : НТУ, 2017. – Вип. 1 (37).
5. 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).
6. 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.
7. Онищенко А. М., Кузьмінець М. П., Редченко В. П., Тарнопольський Д. Й., Аксьонов С. Ю. Теоретичні та експериментальні дослідження Південного мосту через р. Дніпро в Києві: монографія К.: НТУ, 2014. 341 с.
8. Онищенко А. М., Кузьмінець М. П., Невінгловський В. Ф., Гаркуша М. В. Теоретичні та практичні дослідження ресурсу асфальтобетонного покриття на залізобетонних транспортних конструкціях: монографія К.: НТУ, 2015. 323. с.
9. Онищенко А. М. Підвищення довговічності асфальтобетонних шарів за рахунок використання полімерного латексу Дис.к.т.н.: 22.05.11 – К., 2008. –157 с.

PREDICTION OF THE MAXIMUM LEVEL OF TANGENT STRESSES IN THE ASPHALT CONCRETE SURFACE LAYING ON THE CONCRETE BASE OF A MOTOR ROAD

Onyshchenko Artur M., Doctor of Technical Science, Professor, National Transportation University, Head of bridges, tunnels and hydraulic structures Department, e-mail: onyshchenko.a.m.ntu@gmail.com, +380687771899, <https://orcid.org/0000-0002-1040-4530>

Soloviov Ihor L., Ph.D., associate Professor, National Transport University, assistant professor of the Department of Higher Mathematics, e-mail: i.soloviov@ntu.edu.ua, tel. 0442847109, Kyiv, Boychuk str., 42, K. 510, <https://orcid.org/0000-0001-5203-4139>.

Khudolii Serhiy.M., Ph D, associate Professor, National Transport University, assistant professor of the Department of Higher Mathematics, Kyiv, Ukraine, s_hoodolii@i.ua, <https://orcid.org/0000-0001-6054-6708>

Fedorenko Oleh V., Head of the Ukravtodor road operation department, Kyiv, Ukraine, e-mail: 50281@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-4288-5508>

Abstract. In this paper, in order to evaluate the tangential stress levels in the asphalt concrete coating arranged on concrete foundation, finite element modeling of various constructions of road clothing with different values of the thickness of the asphalt layer and its modulus of elasticity, was carried out. The thickness of the asphalt layer varied from 5 cm to 30 cm with a step of 5 cm. The modulus of elasticity of asphalt ranges from 3000 MPa to 9000 MPa. In addition, the position of the transport load in relation to the

deformation joint between the slabs of the concrete base varied for different versions of the structures. Calculations using the finite element method show that in this case τ_{xz} is the largest tangent component of the stress tensor. Among the different load positions, the option was chosen in which the tangential stress τ_{xz} in asphalt reaches a maximum in terms of modulus. Based on the maximum tangential stress values in the asphalt calculated in this way, a surface plot of the function τ_{\max} is obtained, which depends on two variables h and E . From the appearance of this surface, it can be seen that τ_{\max} increases with decreasing asphalt coating thickness and depends almost linearly on its elastic modulus. For this surface, an approximating function is proposed, with the help of which the level of maximum tangential stresses in the asphalt layer above the expansion joint can be approximately estimated for structures with intermediate values of h (cm) and E (MPa).

Based on this surface level diagram, the design parameters of road clothing can be chosen such that the maximum tangential stress level in it is lower than the allowable value.

Key words: highway, asphalt concrete coating, transport loads, stress field, stress-strain state.

References

1. Mozgoviy V.V., Besarab O.M., Ishchenko O.M., Ladyzhenskyi I.S. Justification of the selection of the limit state condition for evaluating the crack resistance of asphalt concrete layers under the action of traffic load// Automobile roads and road construction, 2003, issue No. 67. – Kyiv, National Transport University. - P.59-68.
2. I.S. Ladyzhenskyi, study of the influence of reinforcing meshes on the thermal crack resistance of asphalt concrete layers// Automobile roads and road construction, 2004, issue No. 70. - Kyiv, National Transport University. - P. 17-21.
3. V.V. Mozgoviy, V.V. Smolyanets, I.S. Ladyzhenskyi, O.V. Quick. Clarification of calculated temperatures and traffic intensity when calculating road wear of city streets and roads// Road safety of Ukraine. Scientific and technical collection, No. 4 (19), 2004. - pp. 55-59.
4. Onishchenko A.M., Khudolii S.M., Harkusha M.V. Leshchuk A.N. Prediction and assessment of residual strain of asphalt pavement using finite element method. Visnyk National Transport University. Series «Technical sciences». Scientific and Technical Collection. – Kyiv: National Transport University, 2017. – Issue 1 (37).
5. 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).
6. 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].
7. Onyshchenko A. M., Kuzminets M. P., Redchenko V. P., Tarnopolskyi D. Y., Aksyonov S. Yu. Theoretical and experimental studies of the Southern bridge over the Dnipro River in Kyiv: monograph. K.: NTU, 2014. 341 p.
8. Onyshchenko A. M., Kuzminets M. P., Nevinglovskyi V. F., Harkusha M. V. Theoretical and practical studies of the resource of asphalt concrete pavement on reinforced concrete transport structures: monograph. K.: NTU, 2015. 323. p.
9. Onyshchenko A M. Increasing the durability of asphalt concrete layers due to the use of polymer latex Dis. Ph.D. technical Sciences: 05.22.11. - K., 2008. - P. 157.

Надійшла до редакції 19.04.2023.