https://doi.org/10.36100/dorogimosti2022.26.124

УДК 625.825

Шлюнь Н. В., *канд. техн. наук, доц., https://orcid.org/0000-0003-1040-8870*

Національний транспортний університет, м. Київ, Україна

ОСОБЛИВОСТІ ТЕРМОНАПРУЖЕНОГО СТАНУ АСФАЛЬТОБЕТОННОГО ДОРОЖНЬОГО ПОКРИТТЯ З ГУМОВИМИ ВКЛЮЧЕННЯМИ

Анотація

Вступ. За міжнародними оцінками [18] щорічно у світі 1,5 мільярди зношених шин йдуть до відходів. Їхня значна частина зберігається на звалищах, закопується у землю або спалюється, забруднюючи при цьому повітря, стічні води та ґрунти шкідливими й отруйними газами, а також рідкими і твердими фракціями. У той же час гума має ряд корисних і цінних для індустрії речовин, рециркуляція яких дозволить значно зменшити забруднення навколишнього середовища та отримати матеріальні вигоди. До того ж матеріал зношених шин володіє рядом унікальних термомеханічних якостей, привабливих для промислового застосування, включаючи низьку густину, гарні термо- і електроізоляційні властивості, механічну пружність та міцність тощо. Одним із перспективних напрямків рециркуляції зношених шин є їх застосування в якості домішок в асфальтобетонні матеріали дорожніх покриттів. Однак, як показали натурні випробування, механічні властивості таких матеріалів в значній мірі залежать від домішок в матеріал і модифікації їхніх властивостей бітумною фракцією. Оскільки в науковому середовищі ці питання проаналізовані недостатньо, проблема їх вивчення є актуальною.

Проблематика. Проблема рециклінгу матеріалу зношених автомобільних шин у дорожньому будівництві здебільшого обмежується нестабільністю термомеханічних властивостей асфальтобетонних сумішей з домішками гумової крихти залежно від розміру її зерна, відсотка об'ємних включень і рівня модифікування бітумом. Встановлення раціональних параметрів, які характеризують ці фактори, може бути реалізовано шляхом математичного розв'язання задачі про термодеформований стан дорожнього покриття із застосуванням методів теорії термопружності.

Мета. Мета статті полягає у визначенні причин, що призводять до порушення міцності асфальтобетонних матеріалів з домішками гумових крихт. Із цією метою аналізується вплив несумісності термомеханічних характеристик (модулів пружності, коефіцієнтів Пуассона та коефіцієнтів температурного розширення) бітуму та гуми на концентрацію додаткових внутрішніх термонапружень у системі, що викликані сезонними та добовими змінами температури.

Матеріали та методи. Для проведення досліджень використовуються методи математичного моделювання із застосуванням основних положень теорії термопружності. Вважається, що бітум являє собою пружне середовище, в яке включена гумова крихта, що моделюється пружною кулею. Складені рівняння термопружної рівноваги системи при зміні її температури, сформульовані крайові рівняння та умови пружної взаємодії бітумного середовища та гумового включення на поверхні їхнього контакту. Методами аналітичних перетворень побудовано в замкнутій формі розв'язки цих рівнянь, які дозволяють визначати термонапруження в обох фракціях системи та їх залежності від значень параметрів термопружності. Сформульований принцип відповідності розв'язків задач теорії пружності та в'язкопружності, який дозволяє використовувати отримані розв'язки для аналізу термоміцності реальних асфальтобетонних дорожніх покриттів.

Результати. У роботі методами математичного моделювання розкриті причини низької термоміцності бітумних матеріалів із включеннями у вигляді гумових крихт. Показано, що вона пов'язана з термопружною несумісністю бітуму та гуми, що обумовлена практичною об'ємною

нестисливістю гуми та різницею значень коефіцієнтів температурного лінійного розширення цих матеріалів. Відмічена позитивна роль модифікування гуми бітумом, що дозволяє зменшити термопружну нестисливість цих матеріалів та обумовленою нею концентрацію термонапружень на поверхні контакту бітуму та гумового зерна.

Висновки. За допомогою теоретичного аналізу термопружного стану бітумного матеріалу з резиновими включеннями встановлена причина концентрації термонапружень на поверхні контакту цих фракцій, що обумовлена несумісністю їх параметрів термопружності. Отримані результати дають можливість встановлювати шляхи раціонального модифікування гуми бітумом, які дозволяють підвищувати термоміцність дорожніх покриттів в умовах сезонних і добових змін температури і, тим самим, збільшувати їх довговічність.

Ключові слова: автомобільна шина, асфальтобетонна суміш, бітум, гума, гумові включення, модифікування, рециркулювання, термонапруження, термопружність.

Вступ

Останнім часом у світі щорічно виготовляється біля трьох мільярдів автомобільних шин, які після їх зношування у вигляді відходів необхідно рециркулювати. Однак гума являє собою класичний приклад масового продукту, матеріал якого призначений для одноразового використання. У той же час, відкрите зберігання відходів виробництва гуми на звалищах або їх захоронення, що повсюди практикуються, супроводжуються забрудненням повітря, стічних вод і ґрунтів шкідливими та ядовитими фракціями їх розкладання [3, 6]. Тому проблема переробляння зношених автомобільних шин має велике екологічне та економічне значення для всіх розвинених країн світу. Огляди літератури за цією проблематикою подані в роботах [7, 23].

Один із способів утилізації шин пов'язаний із їх спалюванням у цементних печах. Гума має теплотворну здатність близько 8 600 ккал/кг, що перевищує здатність вугілля і дещо поступається нафтам. Відомі промислові установки для спалювання зношених павтомобільних шин, які працюють у США, Німеччині, Великобританії та Швейцарії. Разом з тим, ряд недоліків, які лежать в основі цього методу, пов'язані з неповним згоранням гуми, виділенням високотоксичних газів, зміщенням хімічно цінних речовин, які містяться в матеріалі шин, та пониженням якості цементу, призвели до того, що в багатьох країнах спостерігається тенденція з обмеженням спалювання шин на користь інших способів їх переробки.

Більш перспективний напрям утилізації шин пов'язаний з можливістю використання подрібненої гуми як добавки до асфальтобетонної суміші дорожніх покриттів [1, 4, 9]. Перші експерименти щодо створення таких матеріалів проводилися давно. У різних країнах і регіонах були побудовані експериментальні ділянки доріг та аеродромів із покриттям, що містить гумову крихту. Спочатку вони показували досить високі характеристики, відзначалася їх підвищена тріщиностійкість, водостійкість, зниження на них рівня вібрацій і шуму, зменшення гальмівного шляху тощо. Але потім цей матеріал почав зарекомендовувати себе з негативного боку, оскільки такий асфальтобетон виявився схильним до швидкого старіння, розущільнення і руйнування. При цьому гумова крихта, не пов'язана з бітумом міцними зв'язками, викришувалася з покриття і практично в незмінному вигляді розносилася вітром, забруднюючи околиці.

Щоб усунути зазначений недолік, крихту стали модифікувати перед введенням її в бітум для утворення розвиненого міжфазного шару на межі фаз «гумова крихта — бітум» і підвищення адгезії в'яжучого до мінеральних складових асфальтобетону. Модифіковані таким чином бітум і крихта є однорідною сумішшю окисленого дорожнього бітуму з досить дрібнодисперсною крихтою з гум загального призначення, підданої спеціальній хімічній обробці в процесі виготовлення. У цьому випадку частки гуми повністю не розкладаються і не розчиняються, а зв'язуються з міцними компонентами бітуму, але досить гнучкими хімічними зв'язками і виявляють свої якості навіть

у складі нового матеріалу. При цьому крупність зерен — не більше ніж 1 мм і за обсягом вони займають (5–7) % від загального обсягу суміші. У той же час, спроби збільшення розмірів зерен (до 1 см і більше) і об'ємного відсоткового складу суміші (до 20 % і більше) зазвичай призводили до негативного результату. Очевидно, це пов'язано з особливими термомеханічними властивостями, які має гума (як гіперпружний матеріал), і тією роллю, яку відіграє тонкий міжфазний шар на поверхнях малих і немалих зерен включень при зміні температури системи. Аналіз ефективності модифікування бітумної суміші гумовою крихтою викладений у статтях [5, 10, 17, 27] та в оглядових роботах [12, 21].

Зазначимо, що зазвичай гуми мають малий модуль пружності ($E = 1 \div 10$ МПа), проте дуже великий коефіцієнт Пуассона. Так, для більшості каучуків він дорівнює $\upsilon = 0{,}50$, для вулканізованої гуми він складає $\upsilon = 0{,}48 \div 0{,}50$. Тому при деформаціях гумового тіла, пов'язаних із зміною його форми, гумі властиві дуже мала жорсткість та висока еластичність. Ця властивість проявляється при одновісних та двовісних силових навантаженнях гумових тіл, а також при їх зсувних деформаціях.

При спробах деформування гуми зі зміною її об'єму, але із збереженням форми, для неї характерна велика жорсткість, оскільки $\upsilon = 0{,}50$. У зв'язку з цим об'ємний коефіцієнт пружності резини

$$K = \frac{E}{3(1-2\upsilon)} = \infty$$

і цей матеріал стає об'ємно абсолютно твердим. Тому з інженерної точки зору гума вважається нестисливим матеріалом [8, 14, 15]. Ця властивість характерна для її тривимірного термонапруженого деформування при змінах температури в обмеженому об'ємі та тривісних силових впливах, що призводять до всебічного обтискання. Як показано нижче, стискання гуми не дозволяє їй пружно компенсувати термічні деформації бітуму, через що в ньому виникають додаткові термічні напруження. Завдяки тому, що на поверхні крихти при контакті з бітумом утворюється міжфазний шар малої товщини, що стискається, він при малих розмірах крихти в деякій мірі знімає термонапруження за рахунок власної податливості. На великих включеннях тонкий м'який шар не може компенсувати їх жорсткість і на їх поверхнях генеруються великі термонапруження, які призводять до локальних пластичних деформацій, дефектів і тріщин в бітумі.

До цих характеристик гуми необхідно додати ще одну її особливість. Справа в тому, що і при помірних значеннях температури її коефіцієнт температурного розширення змінюється в широких межах, набуваючи нульових і навіть від'ємних значень. У той самий час при високих температурах (150 °C і вище) її коефіцієнт температурного розширення за рахунок утворення в ній пор, заповнених парою, на порядок більше значень цього коефіцієнта інших матеріалів [19, 26]. Така несумісність термомеханічних параметрів бітуму та гуми є додатковим фактором, що є причиною концентрації термонапружень на поверхнях контакту бітуму з великими гумовими включеннями та їх відшарування. Для дослідження цього ефекту на основі теорії термопружності розроблено математичну модель термонапруженого стану асфальтобетонного середовища зі сферичними гумовими включеннями під дією температурних збурень, сформульовано розв'язувальні диференціальні рівняння, знайдено їх розв'язки в замкнутій формі. Аналіз побудованих полів термонапружень дозволив встановити основні особливості зародження вихідних мікродефектів у композитному матеріалі, армованому гумовими крихтами.

Оцінюючи побудовані розв'язки, необхідно враховувати, що вони отримані шляхом використання методів теорії пружності, тоді як бітум і гума є вязкопружними матеріалами. Тому ці розв'язки, хоч і відображають отримані закономірності деформування їхньої комбінації, при розрахунку реальних дорожніх покриттів мають бути уточнені. Таке узгодження розв'язків може бути виконано на основі принципу відповідності розв'язків задач теорії пружності та в'язкопружності, встановленого в роботах W.T. Read [24], R. Sips [25] та E.H. Lee [13]. Питання

уточнення цього принципу застосовно до розв'язання різних задач розглядалась в публікаціях G.H. Paulino і Z.-H.Jin [22] та L.Khazanovich [11].

Суть принципу відповідності полягає у тому, що вихідні рівняння задачі для в'язкопружного тіла після виконання інтегрального перетворення (Фур'є або Лапласа) за часом стають аналогічними вихідним рівнянням відповідної задачі теорії пружності, якщо в них параметри пружності замінити відповідними функціями релаксації або повзучості. Тому з відомого розв'язку задачі теорії пружності можна відразу отримати розв'язок вихідної задачі для в'язко-пружного тіла у вигляді зображення Фур'є або Лапласа і залишається тільки виконати зворотне перетворення Фур'є або Лапласа. Питання про застосування цього методу до задач деформування в'язко-пружних асфальтобетонних матеріалів розглядали Boris Radovskiy та Bagdat Teltayev [28].

Термонапружений стан асфальтобетону зі сферичним гумовим включенням

Для встановлення загальних закономірностей розподілу полів термонапружень у бітумному середовищі з гумовими включеннями будемо використовувати модель кулеподібного пружного тіла 1 радіуса r_1, пов'язаного на своїй поверхні $r = r_1$ з пружним середовищем 2 (**рис. 1**), для якого радіус r_2 на зовнішній граничній сферичній поверхні може набувати нескінченно великі значення.

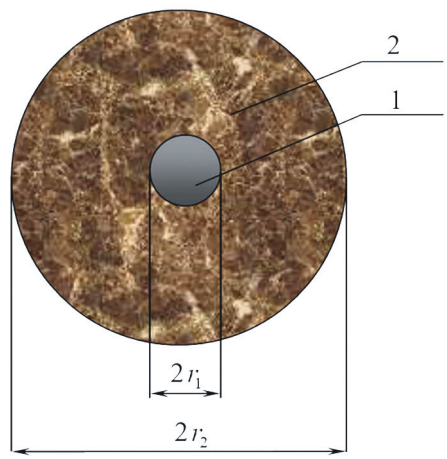

Рисунок 1 — Схема сферичного пружного включення 1 у пружному середовищі 2

Розглянемо термопружну рівновагу системи, коли її температура у всіх точках стаціонарно змінюється від 0 до T. Нехай термомеханічні властивості тіла 1 і 2 середовища характеризуються значеннями їх модулів пружності E_1 і E_2, коефіцієнтів Пуассона υ_1 і υ_2 та їхніх коефіцієнтів лінійного температурного розширення α_1 і α_2. Описуватимемо термопружне деформування системи у сферичній системі координат $Or\varphi\theta$, початок O якої збігається з центром тіла 1, r, φ, θ — відповідно, радіальна, полярна та азимутальна координати.

Деформований стан пружної системи в цих координатах має властивість центральної симетрії, тому її рівновага описується двома рівняннями [2, 16, 20]:

$$\frac{d\sigma_r^{(i)}}{dr} + \frac{2\sigma_r^{(i)} - \sigma_\varphi^{(i)} - \sigma_\theta^{(i)}}{r} = 0 \quad \left(i = 1,2\right), \tag{1}$$

де $\sigma_r^{(i)}, \sigma_\varphi^{(i)}, \sigma_\theta^{(i)}$ — нормальні напруження на відповідних елементарних майданчиках $r = const$, $\varphi = const$, $\theta = const$ у тілі 1 при $i = 1$ та в середовищі 2 при $i = 2$. Вони виражаються через

компоненти тензора відносних деформацій $\varepsilon_r^{(i)}, \varepsilon_\varphi^{(i)} = \varepsilon_\theta^{(i)}$:

$$\sigma_r^{(i)} = \frac{E_i(1-\upsilon_i)}{(1+\upsilon_i)(1-2\upsilon_i)}\varepsilon_r^{(i)} + \frac{2E_i\upsilon_i}{(1+\upsilon_i)(1-2\upsilon_i)}\varepsilon_\varphi^{(i)} - \frac{E_i}{(1-2\upsilon_i)}\alpha_i T,$$
$$\sigma_\varphi^{(i)} = \sigma_\theta^{(i)} = \frac{E_i\upsilon_i}{(1+\upsilon_i)(1-2\upsilon_i)}\varepsilon_r^{(i)} + \frac{E_i}{(1+\upsilon_i)(1-2\upsilon_i)}\varepsilon_\varphi^{(i)} - \frac{E_i}{(1-2\upsilon_i)}\alpha_i T \quad (i=1,2). \tag{2}$$

Тут необхідно підкреслити, що у правих частинах цих виразів усі доданки у знаменниках містять множник $(1 - 2\upsilon_i)$. Оскільки для гуми $\upsilon \approx 0{,}5$, всі ці доданки діляться на малу величину, що на цьому рівні вносить особливу специфіку термомеханічної поведінки гуми.

Деформації, що використовуються в (2), визначаються через радіальне переміщення $u^{(i)}$:

$$\varepsilon_r^{(i)} = \frac{du^{(i)}}{dr}, \qquad \varepsilon_\varphi^{(i)} = \frac{u^{(i)}}{r}, \qquad (i=1,2). \tag{3}$$

За допомогою цих рівностей зведемо вирази (2) до вигляду:

$$\sigma_r^{(i)}(r) = \frac{E_i(1-\upsilon_i)}{(1+\upsilon_i)(1-2\upsilon_i)}\frac{du^{(i)}}{dr} + \frac{2E_i\upsilon_i}{(1+\upsilon_i)(1-2\upsilon_i)}\frac{u^{(i)}}{r} - \frac{E_i}{(1-2\upsilon_i)}\alpha_i T,$$
$$\sigma_\varphi^{(i)} = \sigma_\theta^{(i)} = \frac{E_i\upsilon_i}{(1+\upsilon_i)(1-2\upsilon_i)}\frac{du^{(i)}}{dr} + \frac{E_i}{(1+\upsilon_i)(1-2\upsilon_i)}\frac{u^{(i)}}{r} - \frac{E_i}{(1-2\upsilon_i)}\alpha_i T \quad (i=1,2). \tag{4}$$

Після підстановки (4) у (1) отримуємо рівняння:

$$\frac{d^2u^{(i)}}{dr^2} + \frac{2}{r}\frac{du^{(i)}}{dr} - \frac{2}{r^2}u^{(i)} \quad (i=1,2). \tag{5}$$

Зведемо їх до форми, зручної для інтегрування:

$$\frac{d}{dr}\left[\frac{1}{r}\frac{d}{dr}\left(r^2u^{(i)}\right)\right] = 0 \quad (i=1,2). \tag{6}$$

Система (6) має розв'язок:

$$u^{(1)}(r) = rC_1^{(1)} + \frac{1}{r^2}C_1^{(2)} \quad (r \le r_1),$$
$$u^{(2)}(r) = rC_1^{(2)} + \frac{1}{r^2}C_2^{(2)} \quad (r \ge r_1), \tag{7}$$

де $C_1^{(1)}, C_2^{(1)}, C_1^{(2)}, C_2^{(2)}$ — константи, які визначаються з граничних умов при $r = 0$ і $r_2 \to \infty$ та умов поєднання розв'язів (7) на поверхні $r = r_1$. Ці умови мають вигляд:

$$u^{(1)}(0) = 0, \tag{8}$$
$$u^{(1)}(r_1) = u^{(2)}(r_1), \tag{9}$$
$$\sigma_r^{(1)}(r_1) = \sigma_r^{(2)}(r_1), \tag{10}$$
$$\sigma_r^{(2)}(r) \to 0 \quad \text{при} \quad r_2 \to \infty. \tag{11}$$

З рівності (8) випливає, що існування функції $u^{(1)}(r)$ у (7) можливо тільки при

$$C_2^{(1)} = 0. \tag{12}$$

За допомогою співвідношень (4) і (7) представимо функції $\sigma_r^{(i)}(r), \sigma_\varphi^{(i)}(r), \sigma_\theta^{(i)}(r)$, що використовуються в (10) та (11), у формі:

$$\begin{aligned} \sigma_r^{(i)}(r) &= \frac{E_i}{(1-2\upsilon_i)} C_1^{(i)} - \frac{2E_i}{r^3(1+\upsilon_i)} C_2^{(i)} - \frac{E_i}{(1-2\upsilon_i)} \alpha_i T, \\ \sigma_\varphi^{(i)} = \sigma_\theta^{(i)} &= \frac{E_i}{(1-2\upsilon_i)} C_1^{(i)} + \frac{E_i}{r^3(1+\upsilon_i)} C_2^{(i)} - \frac{E_i}{(1-2\upsilon_i)} \alpha_i T \quad (i=1,2). \end{aligned} \tag{13}$$

Тоді для виконання умов (11) необхідно, щоб сума першого та третього доданків у правій частині $\sigma_r^{(i)}(r)$ при $i = 2$ дорівнювала нулю. Це можливо при

$$C_1^{(2)} = \alpha_2 T. \tag{14}$$

Константи $C_1^{(1)}$, $C_2^{(2)}$ знаходяться з умов (9) та (10). Перепишемо їх у вигляді:

$$\begin{aligned} r_1 C_1^{(1)} &= \frac{1}{r_1^{(2)}} C_2^{(2)} + r_1 \alpha_2 T, \\ \frac{E_1}{(1-2\upsilon_1)} C_1^{(1)} - \frac{E_1}{(1-2\upsilon_1)} \alpha_1 T &= -\frac{2E_2}{r_1^3(1+\upsilon_2)} C_2^{(2)} - \frac{E_2}{(1-2\upsilon_2)} \alpha_2 T. \end{aligned} \tag{15}$$

З цієї системи випливає

$$\begin{aligned} C_1^{(1)} &= \frac{E_1(1+\upsilon_2)\alpha_1 T + 2E_2(1-2\upsilon_1)\alpha_2 T}{E_1(1+\upsilon_2) + 2E_2(1-2\upsilon_1)}, \\ C_2^{(2)} &= \frac{r_1^3 E_1(1+\upsilon_2)(\alpha_1 - \alpha_2) T}{E_1(1+\upsilon_2) + 2E_2(1-2\upsilon_1)}. \end{aligned} \tag{16}$$

За допомогою рівностей (12), (13), (16) при $i = 1$ знаходимо термонапруження $\sigma_r^{(1)}(r)$, $\sigma_\varphi^{(1)}(r)$, $\sigma_\theta^{(1)}(r)$ у включенні 1:

$$\sigma_r^{(1)}(r) = \sigma_\varphi^{(1)}(r) = \sigma_\theta^{(1)}(r) = \frac{2E_1E_2(\alpha_2 - \alpha_1)T}{E_1(1+\upsilon_2) + 2E_2(1-2\upsilon_1)} \quad (r \le r_1). \tag{17}$$

Радіальні термонапруження $\sigma_r^{(2)}(r)$ у середовищі 2 обчислюються з використанням рівностей (13), (14), (16) при $i = 2$

$$\sigma_r^{(2)}(r) = \frac{2r_1^3}{r^3} \frac{E_1E_2(\alpha_2 - \alpha_1)T}{E_1(1+\upsilon_2) + 2E_2(1-2\upsilon_1)} \quad (r \ge r_1). \tag{18}$$

Термонапруження $\sigma_\varphi^{(2)}(r)$, $\sigma_\theta^{(2)}(r)$ у середовищі 2 обчислюються з урахуванням співвідношень (4), (14), (16) при $i = 2$:

$$\sigma_{\varphi}^{(2)}(r)=\sigma_{\theta}^{(2)}(r)=-\frac{r_1^3}{r^3}\frac{E_1E_2(\alpha_2-\alpha_1)T}{E_1(1+\upsilon_2)+2E_2(1-2\upsilon_1)}\quad (r\ge r_1). \tag{19}$$

Із рівностей (17), (18) випливає, що відповідно до умови (10) радіальні напруження $\sigma_r^{(1)}(r)$ в тілі 1 і $\sigma_r^{(2)}(r)$ в середовищі 2 на поверхні контакту $r = r_1$ однакові. Крім того в середовищі 2 напруження $\sigma_r^{(2)}(r)$ вдвічі більші напружень $\sigma_{\varphi}^{(2)}(r),\sigma_{\theta}^{(2)}(r)$ і всі вони зменшуються вздовж радіальної координати пропорційно кубу відстані від центра тіла 1 до точки, що розглядається. Зазначимо також, що всі напруження в системі пропорційні різниці $(\alpha_2 - \alpha_1)$ та добутку E_1E_2.

Вирази (17)-(19) суттєво спрощуються, якщо $\upsilon = 0{,}5$. Тоді маємо:

$$\begin{aligned}
&\sigma_r^{(1)}(r)=\sigma_{\varphi}^{(1)}(r)=\sigma_{\theta}^{(1)}(r)=\frac{2E_2(\alpha_2-\alpha_1)T}{1+\upsilon_2}\quad (r\le r_1),\\
&\sigma_r^{(2)}(r)=\frac{2r_1^3}{r^3}\frac{E_2(\alpha_2-\alpha_1)T}{1+\upsilon_2}\quad (r\ge r_1),\\
&\sigma_{\varphi}^{(2)}(r)=\sigma_{\theta}^{(2)}(r)=-\frac{r_1^3}{r^3}\frac{E_2(\alpha_2-\alpha_1)T}{1+\upsilon_2}\quad (r\ge r_1).
\end{aligned} \tag{20}$$

У цьому випадку гумове включення поводиться як абсолютно тверде тіло і тому термонапруження (20) не залежать від його модуля пружності E_1.

Отримані вирази (17)-(19) та (20) дозволяють встановити основні особливості впливу вихідних термонапружень у бітумному середовищі з гумовими включеннями на його термостійкість. При цьому ще раз звернемо увагу на суттєву термомеханічну несумісність гуми та бітуму. Загалом їх властивості можуть змінюватися в широких межах залежно від їх фізико-механічних структур і бітумного модифікування гуми. Нижче при проведенні аналізу для гуми використовуємо значення $E = 1 \div 10$ МПа, $\upsilon_1 = 0{,}48$, 0,49 та 0,50, $\alpha_1 = 0$, хоча навіть за помірних температур α_1 може бути від'ємним. Для бітуму приймемо $E_2 = 3\,000$ МПа, $\upsilon_2 = 0{,}25$, $\alpha_2 = 2{,}3\cdot10^{-4}$ 1/°C.

При таких значеннях вихідних параметрів та $T = 30$ °C, використовуючи формули (17)-(19), отримуємо:

$$\sigma_r^{(1)}(r)=\sigma_{\varphi}^{(1)}(r)=\sigma_{\theta}^{(1)}(r)=(0{,}3414\div3{,}1245)\text{ МПа}\ \ (r\le r_1),$$

$$\sigma_r^{(2)}(r)=\frac{r_1^3}{r^3}(0{,}3414\div3{,}1245)\text{ МПа},$$

$$\sigma_{\varphi}^{(2)}(r)=\sigma_{\theta}^{(2)}(r)=-\frac{r_1^3}{r^3}(0{,}1707\div1{,}562)\text{ МПа}\ \ (r\le r_1).$$

Тут перші значення в дужках відповідають випадку $E_1 = 1$ МПа, другі — випадку $E_1 = 10$ МПа.

Графіки цих функцій при $E_1 = 10$ МПа наведені на **рис. 2**.

Як видно, у бітумному середовищі функції $\sigma_r^{(2)}(r),\sigma_{\varphi}^{(2)}(r),\sigma_{\theta}^{(2)}(r)$ концентруються на контактній поверхні $r = r_1$ і зменшуються обернено пропорційно кубу координати r. При цьому в зоні своєї концентрації навіть за невисокого значення T та нульовому α_1 ці функції знаходяться в зоні граничних значень для бітуму, які становлять $[\sigma_{гр}] = 3\div8$ МПа за тривалості дії 0,1 с та температурі $T = 5\div10$ °C. Насправді при тривалій дії температурних збурень і великих інтервалах зміни температури, значення $[\sigma_{гр}]$ можуть бути набагато нижчими.

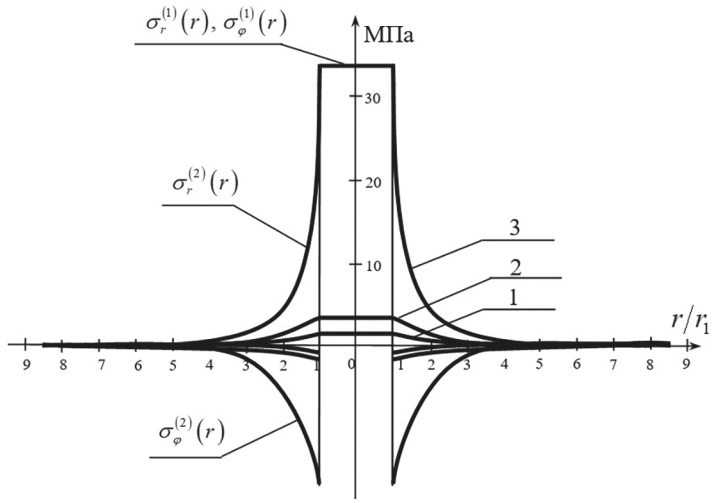

Рисунок 2 — Графіки розподілення функцій $\sigma_r^{(i)}(r)$ и $\sigma_\varphi^{(i)}(r)(i=1,2)$ в системі гума-бітум для випадків E = 10 МПа при υ_1 = 0,48 (крива 1), υ_1 = 0,49 (крива 2), υ_1 = 0,50 (крива 3)

Важливим є питання про дослідження впливу надтвердості гуми, що визначається коефіцієнтами υ_1, на концентрацію додаткових термонапружень у бітумі. У **табл. 1** наведено значення термонапружень $\sigma_r^{(1)} = \sigma_\varphi^{(1)}$, $\sigma_r^{(2)}(r_1)$ и $\sigma_\varphi^{(2)}(r_1)$ при υ_1 = 0,48, 0,49 та 0,50.

Таблиця 1

Значення максимальних термонапружень при E_1 = 10 МПа та різних значеннях коефіцієнта υ_1

E_1, МПа	υ_1	$10^4\alpha_1$, 1/°C	E_2, МПа	υ_2	$10^4\alpha_2$, 1/°C	$\sigma_r^{(1)} = \sigma_\varphi^{(1)}$, МПа	$\sigma_r^{(2)}(r_1)$, МПа	$\sigma_\varphi^{(2)}(r_1)$, МПа
10	0,48	0	3000	0,25	2,3	1,6396	1,6396	– 0,8189
10	0,49	0	3000	0,25	2,3	3,1245	3,1245	– 1,5623
10	0,50	0	3000	0,25	2,3	33,120	33,120	– 16,560

Із цих результатів випливає, що зі збільшенням υ_1 додаткові термонапруження в бітумі швидко зростають, і при υ_1 = 0,5, коли гума стає абсолютно твердим тілом, вони значно перевищують її [$\sigma_{гр}$].

Відмітимо також, додаткові термонапруження в системі залежать від модуля пружності E_1 гуми та падають з його зменшенням. У **табл. 2** подані значення характерних термонапружень при E_1 = 1 МПа.

Таблиця 2

Значення максимальних термонапружень при E_1 = 1 МПа та різних значеннях коефіцієнта υ_1

E_1, МПа	υ_1	$10^4\alpha_1$, 1/°C	E_2, МПа	υ_2	$10^4\alpha_2$, 1/°C	$\sigma_r^{(1)} = \sigma_\varphi^{(1)}$, МПа	$\sigma_r^{(2)}(r_1)$, МПа	$\sigma_\varphi^{(2)}(r_1)$, МПа
1	0,48	0	3000	0,25	2,3	0,17161	0,17161	– 0,08189
1	0,49	0	3000	0,25	2,3	0,34144	0,34144	– 0,17072
1	0,50	0	3000	0,25	2,3	33,120	33,120	– 16,560

Як видно в цьому випадку залежність термонапружень від υ_1 стає ще більш помітною.

Розглянемо випадок, коли матеріал гумової крихти модифікований і його термомеханічні характеристики набули значень E_1 = 50 МПа, υ_1 = 0,37, α_1 = 1,15·10^{-4} 1/°C. Для бітуму вони залишилися незмінними: E_2 = 3 000 МПа, υ_2 = 0,25, α_2= 2,3·10^{-4} 1/°C. При таких параметрах максимальні значення термонапружень склали $\sigma_r^{(1)}(r_1)=\sigma_\varphi^{(1)}(r_1)=\sigma_r^{(2)}(r_1)=0,637904$ МПа, $\sigma_\varphi^{(2)}(r_1)=-0,318952$ МПа, що значно менше порівняно з випадком немодифікованої гуми, який розглядався вище.

У результаті виконаних розрахунків можна вважати, що в малому околі гумового включення бітум (або асфальтобетон) постійно знаходиться в граничному або позаграничному стані, що призводить до зниження його термостійкості, утворення в ньому прихованих локальних дефектів, а при дії транспортних навантажень до провокування відшарування та викришування гумових включень. У зв'язку з цим, позитивну роль відіграє процедура модифікації бітуму, що використовується на практиці, дрібними гумовими частками, на поверхні яких в результаті додаткової хімічної обробки формується проміжний прошарок з підвищеними механічними властивостями. Очевидно, що на більших гумових включеннях цей позитивний ефект може не проявитися.

Висновки

1. На основі методів термопружності поставлено завдання про термонапружений стан асфальтобетонного дорожнього покриття з гумовими включеннями. Для сферичної моделі гумового зерна та включення з модифікованої гуми сформовано розв'язувальні рівняння термопружного деформування системи, побудовано їх аналітичні розв'язки.

2. У результаті аналізу отриманих розв'язків дано пояснення особливості термонапруженої поведінки комбінованої системи, що полягає у можливості збереження цілісності системи з дрібнодисперсними гумовими зернами та викришуванням відносно великих гумових включень.

3. При аналізі особливостей термомеханічної поведінки асфальтобетону з гумовими включеннями звернено увагу на специфіку термомеханічних властивостей гуми, пов'язаних з малим значенням її модуля пружності, великим значенням коефіцієнта Пуассона (що робить гуму практично нестисливим матеріалом) і малим значенням коефіцієнта лінійного температурного розширення (нульовим або навіть від'ємним за нормальних температур). Показано, що у зв'язку з цими властивостями гум у бітумі в зоні його контакту з включеннями можуть виникати додаткові концентрації термонапружень, які викликані термомеханічною несумісністю фаз композиту і призводять до зародження в бітумі на контактній поверхні додаткових пластичних деформацій та деструкцій, що викликають викришування включень.

4. За допомогою аналітичних розрахунків продемонстровано, що пом'якшення додаткових термомеханічних дефектів та їх усунення можна досягти за рахунок зниження термомеханічної несумісності властивостей фаз композиту шляхом бітумного модифікування гуми. При цьому ефективність цього способу підвищується зі збільшенням глибини проникнення модифікованого шару в гумове зерно.

Список літератури

1. Жданюк В.К., Костін Д.Ю., Петров В.І. Дослідження впливу гумової крихти як стабілізувальної домішки на властивості щебенево-мастикового асфальтобетону. *Вісник ХНАДУ*. 2019. Вип. 86. Т.ІІ. С. 19–23.

2. Коваленко А.Д. Основы термоупругости: Киев: Наукова Думка, 1970. 239 с.

3. Лунева Г.И. Старые шины – и опасный, и полезный вид отходов. *Рециклинг отходов.* 2008. №1(13). С. 2–10.

4. Оксак С.В. Влияние резиновой крошки на свойства битума и асфальтобетона. *Вестник ХНАДУ*. 2017. Вып. 79. С. 133–137.

5. Хлібишин Ю.Я., Почапська І.Я., Гринишин О.Б., Нагурський А.О. Дослідження модифікації дорожніх бітумів гумовою крихтою. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка» Хімія, технологія речовин та їх застосування*. 2014. № 787. С. 144–148.

6. Юнусова Г.Б. Анализ цикла обращений отходов автомобильных шин. *Вестник ИГУ*. 2013. № 35. С. 48–53.

7. Abbas Mohajerani, Lucas Buznett, John V. Smith, Stefan Markovski, Glen Rodwell, Md Tareq Rahman, Halenur Kurmus, Mehdi Mirzbabaei, Arul Arulrajan, Suksun Horpibulsuk, Farsid Maghool. Recycling waste rubber tyres in construction materials and associated environmental considerations: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, April 2020. Vol. 155. 104679, P.1–17. DOI: https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104679.

8. Christensen R.M. Mechanics of Composite Materials; Wiley: New York, NY, USA, 1979, 348 p.

9. Delatte N. Concrete Pavement Design, Construction, and Perfomance. Taylor & Francis, London and New York, 2008, 1-372.

10. Gao W. Study on properties of recycled tyre rubber modified asphalt mixture using dry process. *Construction and Building Materials*. 2007. Vol. 21, P. 1011–1015. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.02.004.

11. Khazanovich L. The elastic-viscoelastic correspondence principle for non-homogeneous materials with time translation non-variant properties. *Intern. Journ. Solids and Structures*. 2008. Vol. 45(15). P. 1–9. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2008.04.011.

12. Krishnan J.M., Rajagopal K.R. Review of the uses and modeling of bitumen from ancient to modern times. American society of mechanical engineers. *Appl Mech Rev*. 2003. 56(2). P. 149–214. DOI: https://doi.org/10.1115/1.1529658.

13. Lee E.H. Stress analysis in viscoelastic bodies. *Quarterly of Aplied Mathematics*. 1955. Vol. 13. P. 183–190.

14. Leslie R.G. Treloar. The mechanics of rubber elasticity. *Journal of Polymer Science Polymer Symposia*. March 2007. 48(1). P. 107–123. DOI: https://doi.org/10.1002/polc.5070480110.

15. Lyon R.E., Farris R. J. Thermomechanics of rubber at small strains. Polymer. 1987. Vol. 28(7). P. 1127–1132.

16. Marcela Fiedlerova, Petr Jisa, Kamil Stepanek. Using various thermal analytical methods for bitumen characterization. *International Journal of Pavement Research and Technology*. 2021. Vol. 14. Issue 4. P. 459–465. DOI: http://dx.doi.org/10.1007/s42947-020-0157-2.

17. Mashaan N.S., Ali A.H., Karim M.R., Abdelaziz M. Effects of crumb rubber concentration on physical and rheological properties of rubberised bitumen binders. *International Journal of Physical Sciences*. 2011. Vol.6, 4. P. 684–690.

18. Mashiri Soledad, Vinod J.S., Sheikh MD Neaz, Tsang Hing-Ho. Shear strength and dilatancy behavior of sand-tyre chip mixtures. *Soils and Foundations.* Tokyo. May 2015. Vol. 55(3). P. 517–528. DOI:10.1016/j.sandf.2015.04.004.

19. Miller W., Smith S.W., Mackenzie D.S., Ewans K.E., Negative Thermal Expansion: a Review. *Journal of Material Science*. 2009. Vol. 44. P. 5441–5451. DOI: http://dx.doi.org/10.1007/s10853-009-3692-4.

20. Noda N., Hetnarski R.B., Tanigawa Y., Thermal Stresses: 2nd edition, New York: Taylor and Francis, 2003.

21. Nuha Salim Mashaan, Asim Hasan Ali, Mohamed Reham Karim, Mahrez Abdelaziz. An overview of crumb rubber modified asphalt. Intern. *Journ. of Physical Sciences*. 2011. Vol. 7(2). P. 166–170. DOI: 105897/IJPSX11.007.

22. Paulino G.H., Jin Z.-H. Correspondence principle in viscoelastic functionally graded materials. *ASME J. Appl. Mech.* 2001. Vol. 68. P. 129–132. DOI: https://doi.org/10.1115/1.1331286.

23. Presti D.L. Recycled tyre rubber modified bitumens for road asphalt mixture: a literature review. *Construction and Building Materials*. 2013. 49. P. 863–881. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.007.

24. Read W.T. Stress analysis for compressional viscoelastic materials. *Journal of Aplied Physics*, 1950. Vol. 21. P. 671–674.

25. Sips R. General Theory of deformation of viscoelastic substaince. *Journal of Polymer Science*. 1951. Vol. 7. P. 191–205. DOI: https://doi.org/10.1002/pol.1951.120070208.

26. Takenaka K., Negative Thermal Expansion Materials: Technological Key for Control of Thermal Expansion. *Science and Technology of Advanced Materials*. 2012. Vol. 13. P. 1–11. DOI: 10.1088/1468-6996/13/1/013001.

27. Tao Ma, Yongqiang Zhong, Tao Tang, Xiaoming Huang. Design and evalution of heat-resistant asphalt mixture for permafrost regions. *Internationl Journal of Civil Engineering*. 2016. Vol.14(5). P. 339–346. DOI: 10.1007/s40999-16-0039-9.

28. Teltaev B., Amirbaev E., Radovsiy B. Evaluating the effect of polymer modification on the low-temperature rheological properties of asphalt binder. *Polymers*. 2022. 14. 2548. DOI: https://doi.org/10.3390/polym14132548.

References

1. Zhdaniuk V.K., Kostin D.Yu., Petrov V.I. Doslidzhennia vplyvu humovoi krykhty yak stabilizuvalnoi domishky na vlastyvosti shchebenevo-mastykovoho asfaltobetonu [Study of the effect of rubber crumb as a stabilizing admixture on the properties of crushed-mastic asphalt concrete]. *Visnyk KhNADU*. 2019. Vol.86. T.II. P. 19–23 [in Ukrainian].

2. Kovalenko, A.D. Osnovy termopruzhnosti [Thermoelasticity fundamentals]. Kyiv: Naukova Dumka, 1970. 239 p. [in Russian].

3. Luneva H.Y. Starye shiny – i opasnyi, i poleznyi vid otkhodov [Old tires are both dangerous and useful waste]. *Retsyklynh otkhodov*. 2008. №1(13). P. 2–10 [in Russian].

4. Oksak S.V. Vliyanie rezinovoj kroshki na svojstva bituma i asfal`tobetona [Influence of crumb rubber on the properties of bitumen and asphalt concrete]. *Vestnik KhNADU*. 2017. Vol. 79. P. 133–137 [in Russian].

5. Khlibyshyn Yu.Ya., Pochapska I.Ya., Hrynyshyn O.B., Nahurskyi A.O. Doslidzhennia modyfikatsii dorozhnikh bitumiv humovoiu krykhtoiu [Study of modification of road bitumen with rubber crumb]. *Visnyk Natsionalnoho universytetu «Lvivska politekhnika» Khimiia, tekhnolohiia rechovyn ta yikh zastosuvannia*. 2014. № 787. P. 144-148 [in Ukrainian].

6. Yunusova G.B. Analiz czikla obrashhenij otkhodov avtomobilnykh shin [Analysis of the circulation cycle of car tire waste]. *Vestnik IGU*. 2013. № 35. P. 48–53 [in Russian].

7. Abbas Mohajerani, Lucas Buznett, John V. Smith, Stefan Markovski, Glen Rodwell, Md Tareq Rahman, Halenur Kurmus, Mehdi Mirzbabaei, Arul Arulrajan, Suksun Horpibulsuk, Farsid Maghool. Recycling waste rubber tyres in construction materials and associated environmental considerations: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, April 2020. Vol. 155. 104679, P.1–17. DOI: https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104679 [in English].

8. Christensen R.M. Mechanics of Composite Materials; Wiley: New York, NY, USA, 1979, 348 p. [in English].

9. Delatte N. Concrete Pavement Design, Construction, and Perfomance. Taylor & Francis, London and New York, 2008, 1-372 [in English].

10. Gao W. Study on properties of recycled tyre rubber modified asphalt mixture using dry process. *Construction and Building Materials*. 2007. Vol. 21, P. 1011–1015. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.02.004 [in English].

11. Khazanovich L. The elastic-viscoelastic correspondence principle for non-homogeneous materials with time translation non-variant properties. *Intern. Journ. Solids and Structures*. 2008. Vol. 45(15). P. 1–9. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2008.04.011 [in English].

12. Krishnan J.M., Rajagopal K.R. Review of the uses and modeling of bitumen from ancient to modern times. American society of mechanical engineers. *Appl Mech Rev*. 2003. 56(2). P. 149–214. DOI: https://doi.org/10.1115/1.1529658 [in English].

13. Lee E.H. Stress analysis in viscoelastic bodies. *Quarterly of Aplied Mathematics*. 1955. Vol. 13. P. 183–190 [in English].

14. Leslie R.G. Treloar. The mechanics of rubber elasticity. *Journal of Polymer Science Polymer Symposia*. March 2007. 48(1). P. 107–123. DOI: https://doi.org/10.1002/polc.5070480110 [in English].

15. Lyon R.E., Farris R. J. Thermomechanics of rubber at small strains. Polymer. 1987. Vol. 28(7). P. 1127–1132 [in English].

16. Marcela Fiedlerova, Petr Jisa, Kamil Stepanek. Using various thermal analytical methods for bitumen characterization. *International Journal of Pavement Research and Technology*. 2021. Vol. 14. Issue 4. P. 459–465. DOI: http://dx.doi.org/10.1007/s42947-020-0157-2 [in English].

17. Mashaan N.S., Ali A.H., Karim M.R., Abdelaziz M. Effects of crumb rubber concentration on physical and rheological properties of rubberised bitumen binders. *International Journal of Physical Sciences*. 2011. Vol.6,4. P. 684–690 [in English].

18. Mashiri Soledad, Vinod J.S., Sheikh MD Neaz, Tsang Hing-Ho. Shear strength and dilatancy behavior of sand-tyre chip mixtures. *Soils and Foundations.* Tokyo. May 2015. Vol. 55(3). P. 517–528. DOI:10.1016/j.sandf.2015.04.004 [in English].

19. Miller W., Smith S.W., Mackenzie D.S., Ewans K.E., Negative Thermal Expansion: a Review. *Journal of Material Science*. 2009. Vol. 44. P. 5441–5451. DOI: http://dx.doi.org/10.1007/s10853-009-3692-4 [in English].

20. Noda N., Hetnarski R.B., Tanigawa Y., Thermal Stresses: 2nd edition, New York: Taylor and Francis, 2003 [in English].

21. Nuha Salim Mashaan, Asim Hasan Ali, Mohamed Reham Karim, Mahrez Abdelaziz. An overview of crumb rubber modified asphalt. Intern. *Journ. of Physical Sciences*. 2011. Vol. 7(2). P. 166–170. DOI: 105897/IJPSX11.007 [in English].

22. Paulino G.H., Jin Z.-H. Correspondence principle in viscoelastic functionally graded materials. *ASME J. Appl. Mech.* 2001. Vol.68. P. 129–132. DOI: https://doi.org/10.1115/1.1331286 [in English].

23. Presti D.L. Recycled tyre rubber modified bitumens for road asphalt mixture: a literature review. *Construction and Building Materials*. 2013. 49. P. 863–881. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.007 [in English].

24. Read W.T. Stress analysis for compressional viscoelastic materials. *Journal of Aplied Physics*, 1950. Vol. 21. P. 671–674 [in English].

25. Sips R. General Theory of deformation of viscoelastic substaince. *Journal of Polymer Science*. 1951. Vol. 7. P. 191–205. DOI: https://doi.org/10.1002/pol.1951.120070208 [in English].

26. Takenaka K., Negative Thermal Expansion Materials: Technological Key for Control of Thermal Expansion. *Science and Technology of Advanced Materials*. 2012. Vol. 13. P. 1–11. DOI: 10.1088/1468-6996/13/1/013001 [in English].

27. Tao Ma, Yongqiang Zhong, Tao Tang, Xiaoming Huang. Design and evalution of heat-resistant asphalt mixture for permafrost regions. *Internationl Journal of Civil Engineering*. 2016. Vol.14(5). P. 339–346. DOI: 10.1007/s40999-16-0039-9 [in English].

28. Teltaev B., Amirbaev E., Radovsiy B. Evaluating the effect of polymer modification on the low-temperature rheological properties of asphalt binder. *Polymers*. 2022. 14. 2548. DOI: https://doi.org/10.3390/polym14132548 [in English].

Nataliia Shliun, *Ph.D., Associate Prof., https://orcid.org/0000-0003-1040-8870*

National Transport University (NTU), Kyiv, Ukraine

FEATURES OF THE THERMAL STRESSED STATE OF ASPHALT PAVEMENT WITH RUBBER INCLUSIONS

Abstract

Introduction. According to international estimates [18], 1.5 billion worn tires go to waste every year in the world. A significant part of them is stored in landfills, buried in the ground or burned, thus polluting the air, wastewater and soil with harmful and poisonous gases, as well as liquid and solid fractions. At the same time, rubber has a number of useful and valuable substances for the industry, the recycling of which will allow to significantly reduce environmental pollution and obtain material benefits. In addition, worn tire material has a number of unique thermomechanical properties attractive for industrial applications, including low density, good thermal and electrical insulating properties, mechanical elasticity and strength, etc. One of the promising directions of recycling worn tires is their use as admixtures in asphalt concrete materials for road surfaces. However, as field tests have shown, the mechanical properties of such materials largely depend on impurities in the material and modification of their properties by the bitumen fraction. Since these issues have not been sufficiently analyzed in the scientific environment, the problem of their study is urgent.

Problems. The problem of recycling the material of worn car tires in road construction is largely limited by the instability of the thermomechanical properties of asphalt concrete mixtures with rubber crumb admixtures depending on its grain size, the percentage of its volume inclusions and the level of bitumen modification. Establishing rational parameters that characterize these factors can be implemented by mathematically solving the problem of the thermally deformed state of the road surface using methods of the theory of thermoelasticity.

Purpose. The purpose of the article is to determine the reasons leading to a violation of the strength of asphalt concrete materials with admixtures of rubber crumb. For this purpose, the influence of the incompatibility of thermomechanical characteristics (moduli of elasticity, Poisson's ratios and coefficients of thermal expansion) of bitumen and rubber on the concentration of additional internal thermal stresses in the system caused by seasonal and daily temperature changes is analyzed.

Materials and methods. Mathematical modeling methods are used to conduct research using the main provisions of the theory of thermoelasticity. It is believed that bitumen is an elastic medium, which includes a rubber crumb modeled by an elastic ball. Equations of thermoelastic equilibrium of the system when its temperature changes are formulated, boundary equations and conditions of elastic interaction of the bituminous medium and rubber inclusion on their contact surface are formulated. Using the methods of analytical transformations, the solutions of these equations were built in a closed form, which allow

determining the thermal stress in both fractions of the system and their dependence on the values of the parameters of thermoelasticity. The principle of correspondence of the solutions of problems of the theory of elasticity and viscoelasticity is formulated, which allows to use the obtained solutions for the analysis of the thermal strength of real asphalt concrete road surfaces.

The results. In the work, the reasons for the low thermal strength of bituminous materials with inclusions in the form of rubber crumbs were revealed using mathematical modeling methods. It is shown that it is related to the thermoelastic incompatibility of bitumen and rubber, which is due to the practical volumetric incompressibility of rubber and the difference in the values of the thermal linear expansion coefficients of these materials. The positive role of modifying rubber with bitumen is noted, which allows to reduce the thermoelastic incompressibility of these materials and the resulting concentration of thermal stresses on the contact surface of bitumen and rubber grain.

Conclusions. With the help of a theoretical analysis of the thermoelastic state of bituminous material with rubber inclusions, the reason for the concentration of thermal stresses on the contact surface of these fractions, which is caused by the incompatibility of their thermoelasticity parameters, has been established. The obtained results allow establishing ways of rational modification of rubber with bitumen, which make it possible to increase the thermal strength of road surfaces in conditions of seasonal and daily temperature changes and thereby increase their durability.

***Keywords*:** automobile tire, asphalt concrete mixture, bitumen, rubber, rubber inclusions, modification, recycling, thermal stress, thermal elasticity.