

УДК 539.3

## АНАЛІЗ ДЕФОРМУВАННЯ ДОРОЖНЬОГО ПОКРИТТЯ НА МЕТАЛЕВІЙ ПЛИТІ ПІВДЕННОГО МОСТА

Виходячи з положень будівельної механіки, виконано аналіз можливих причин відшарування асфальтобетонного покриття від металевієї плити вантажної частини Південного моста в м. Києві. Методами скінченно-елементного моделювання знайдені зони найбільших нормальних і дотичних напружень. Проаналізовано конструктивні особливості системи.

On the basis of structural mechanics methods, the analysis of possible causes of dividing into layers of asphalt concrete road overlay from the steel plate of the South Bridge is performed. Through the use of the finite element method, the zones of the largest normal and shear stresses are found. The structural features of the system are analysed.

**Ключові слова:** конструкція мостового полотна, металева ортотропна плита моста, напружено-деформований стан, термопружні деформації, моделювання.

**З**а своєю механічною особливістю дорожнє покриття на металевій ортотропній плиті мостів можна розглядати як двошарову складну композиційну конструкцію. Важливою перевагою композиційних конструкцій є їх висока міцність на одиницю маси. При цьому більшість композиційних структур за показниками міцності і термофізичними якостями перевищують будь-який зі своїх компонентів або значно відрізняються від них. Однак необхідно зазначити, що разом із тим композиційні структури мають і суттєвий недолік, який пов'язаний з тим, що фізико-термомеханічні властивості таких структур найчастіше виявляються зовсім неузгодженими, що призводить інколи до специфічних видів руйнувань (розшарування, локальні розриви, порушення адгезії тощо). Тому при проектуванні таких структур ці особливості створюють суттєві ускладнення під час визначення напружено-деформованого стану залежно від геометричних параметрів елементів, виду зв'язку між ними та їх фізико-механічних властивостей. Такі задачі можуть бути вирішені методами теоретичного моделювання [1, 2]. Ці особливості деформування композиційних структур в повній мірі притаманні і багатошаровим системам дорожнього одягу мостових конструкцій, математичне моделювання яких має певні особливості. Вони пов'язані з тим, що розривні функції полів напружень у них генеруються також під впливом високоградієнтних полів температури, які викликають концентрацією як нормальних, так і дотичних (зсувних) напружень, що обумовлені відмінними значеннями термомеханічних параметрів асфальтобетону та ортотропної плити.

До однієї з позаштатних ситуацій під час експлуатації мостів можна віднести також стан



**В.В. Гайдайчук**

завідувач кафедри теоретичної механіки Київського національного університету будівництва і архітектури, д.т.н., професор



**В.В. Мозговий**

завідувач кафедри дорожньо-будівельних матеріалів та хімії Національного транспортного університету, д.т.н., професор



**О.О. Густел'єв**

генеральний директор комунальної корпорації «Київавтодор»



**Л.В. Шевчук**

асистентка кафедри вищої математики Національного транспортного університету

Південного моста через р. Дніпро в місті Києві, що характеризується інтенсивним розтріскуванням та відшаруванням асфальтобетонного покриття від металевого полотна мостової конструкції в зимовий і весняний періоди року. Для виявлення причин цього явища за протокольним рішенням наради КП «Київавтодор» у травні 2018 року в Національному транспортному університеті було проведено нараду спеціалістів

з проектування та експлуатації мостових та дорожніх конструкцій. На цій нараді було висловлено багато думок щодо причини цього явища, яке обумовлене, в основному, конструкційними особливостями моста, збільшеною вантажопідйомністю транспортних засобів і реологічними та термомеханічними ефектами, що проявляються в матеріалах двошарової конструкції дорожнього одягу в результаті сезонних та добових змін температури. Нижче, виходячи з положень будівельної механіки, запропоновані висновки попереднього аналізу можливих причин руйнування асфальтобетонного покриття на ортотропній металевій плиті Південного моста, а також наведений оцінювальний аналіз розподілу полів напружень у двошаровій структурі за методами термопружності.

**Попередні висновки щодо причин руйнування асфальтобетонного покриття.** Загальна схема конструкції моста представлена на рис. 1. Чисельний аналіз виконували для прогону моста між опорами № 11 і № 12 (рис. 2). Він складається з асфальтобетонного шару завтовшки 0,07 м, що покладений на полотно проїзної частини моста, який є ортотропною плитою (рис. 3).

Привертає увагу невелика база тросової системи 10,8 м при загальній ширині моста 41,5 м та порівняно малому моменті інерції на кручення, оскільки його переріз наближається до пластини. Це дає підстави припустити, що прогонова будова проявляє підвищену деформованість при скручуванні. Сталевий лист завтовшки 0,014 м підкріплений ребрами заввишки 0,25 м із кроком 0,3 м. Причому, як відомо, при кру-



Рис. 1. Загальна схема конструкції Південного моста

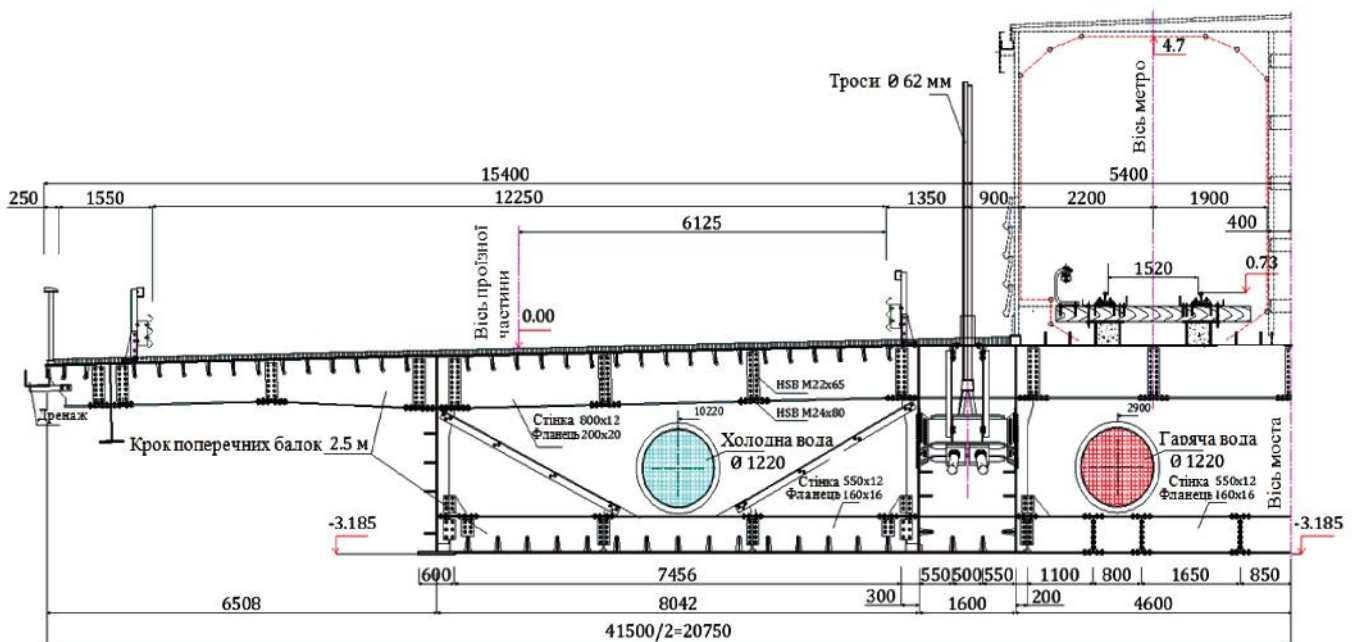


Рис. 2. Поперечний переріз моста в прогонах 11–12

ченні стрижневої конструкції найбільші деформації і напруження мають місце в периферійних зонах поперечного перерізу, найвіддаленіших від його центра. Оскільки рух основного автомобільного транспортного потоку, в т.ч. великовантажного, здійснюється на крайових ділянках його поперечного перерізу, то при дії на них сил ваги в конструкції мостового прогону виникають великі крутні моменти через малу базу тросів і малі полярні моменти інерції перерізу, що і призводить до суттєвих деформацій у крайових зонах моста. Цей факт може бути однією з причин підвищеного руйнування асфальтобетонного покриття в таких зонах. Для перевірки цього висновку необхідно було б у перспективі провести додаткове дослідження деформативності системи на основі глобального моделювання.

Можна відзначити також ще одну конструктивну особливість моста, що може бути, на думку авторів, причиною існуючих проблем. Вона пов'язана з використанням прийнятої конструкції ортотропної плити. Справа в тому, що в одному напрямі її згинальна жорсткість взагалі дорівнює жорсткості верхньої пластини, а в іншому напрямі плита має відкритий переріз у вигляді системи таврів, що слабо опираються згинанню і крученню (порівняно з двотаврами чи іншими закритими перерізами). Для перевірки несучої здатності цієї конструкції необхідно виконати глобальне моделювання всієї системи прогону.

Ще одним фактором, що викликає розширення двохшарової конструкції в цій зоні, є її термонапружений стан. Для перевірки можливості впливу термічних деформацій на руйнування асфальтобетонного покриття в зимовий період авторами було виконано скінченно-елементне моделювання температурних переміщень та напружень асфальтобетонного шару, що приєднаний до металевого полотна проїзної частини моста. Результати цих досліджень наведено нижче.

**Скінченно-елементна модель конструкції моста.** Скінченно-елементна схема виділеного елемента конструкції показана на рис. 3. При дискретизації вона розбивалась у площині  $Oxy$  на прямокутні скінченні елементи розміром  $0,001875 \times 0,001444 \text{ м}^2$ . За такої дискретизації число всіх скінченних елементів виявилось таким, що дорівнює 201344, число всіх вузлів – 311787, усіх шуканих змінних – 726941. Розміри конст-

руктивних елементів системи показані на рис. 4. Для більшої наочності скінченно-елементної дискретизації на рис. 5 приведена розрахункова скінченно-елементна сітка.

Дослідження термонапруженого стану системи виконане з урахуванням того, що конструкція є видовженою та має порівняно малу товщину, яка складає  $h = 0,084 \text{ м}$ , що дало змогу застосувати ряд спрощень і допущень. Оскільки конструкція вільно обдувається повітрям і в зимовий час ефектом радіаційного сонячного нагріву системи можна знехтувати, то можна вважати, що при добових змінах навколишньої

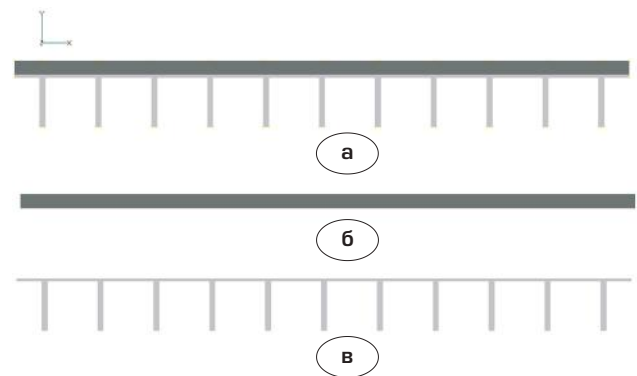


Рис. 3. Скінченно-елементна схема конструкції, виділеної для розрахунку:

а – загальний вигляд конструкції; б – фрагмент асфальтобетонного покриття; в – фрагмент ортотропної сталевій плити

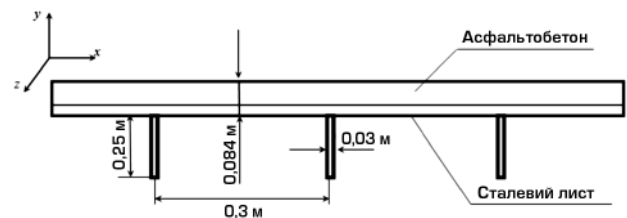


Рис. 4. Розміри конструктивних елементів

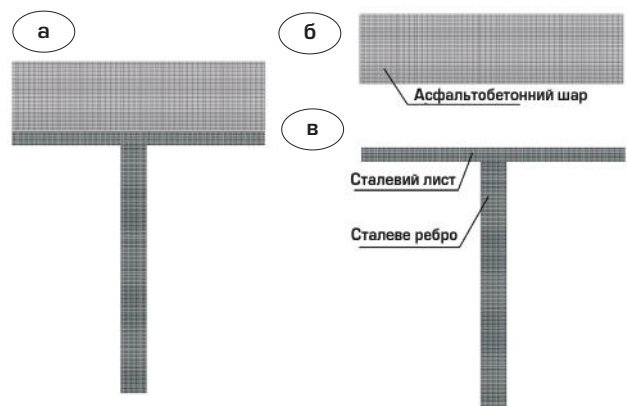


Рис. 5. Скінченно-елементна сітка розрахункової моделі: а – фрагмент проїзної частини в зібраному вигляді; б – асфальтобетонний шар; в – частина ортотропної плити

температури температура верхнього (асфальтобетонного) та нижнього (металевого) шарів встигає вирівнюватись і по всій товщині пакета набуває однакових значень  $T$ . Завдяки цьому в даному випадку для покриття немає необхідності розв'язувати задачу теплопровідності та можна відразу використовувати скінченно-елементну модель для рівнянь термопружності кожного із шарів, в яких початкова температура дорівнює нулю, а її поточне значення  $T(t)$ , з певним наближенням, дорівнює температурі повітря. Модель представлена векторним співвідношенням [3 – 6]

$$\mu \nabla^2 \mathbf{u} + (\lambda + \mu) \text{grad div } \mathbf{u} - (3\lambda + 2\mu) \alpha_T \text{grad}(T - T_0) = 0, \quad (1)$$

де  $\lambda$  і  $\mu$  – ізотермічні параметри Ламе окремо для асфальтобетону і сталі;  $\mathbf{u}(x, y, z)$  – вектор пружних переміщень;  $T$  – поточне значення температури;  $T_0$  – початкова температура.

При цьому рівняння теплопровідності

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial x_3^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

не враховуються зовсім.

Тоді доданок  $(3\lambda + 2\mu) \alpha_T \text{grad}(T - T_0)$  у рівнянні (1) також не враховується, хоча при цьому для системи, вільної від в'язей, його роль проявляється тільки за рахунок різниці значень коефіцієнтів теплового лінійного розширення  $\alpha_T$  асфальтобетону та сталі.

Розв'язання рівнянь (1) здійснюється шляхом переходу до скінченно-елементних моделей [7]

$$[K_u] \{u\} = [L] \{T - T_0\}. \quad (3)$$

Тут  $[K_u]$  – матриця жорсткості;  $[L]$  – матриця, яка відображає вплив температури на переміщення елементів масиву;  $\{u\}$  – вектор значень переміщень у вузлових точках моделі;  $\{T - T_0\}$  – вектор значень різниць температури у вузлових точках масиву.

На всіх горизонтальних граничних площинах конструкцій задавались крайові умови рівності нулю нормальних ( $\sigma_{yy}$ ) та дотичних ( $\sigma_{xy}$ ) напружень, на крайніх вертикальних площинах шарового полотна підкріплювальних ребер умови  $\sigma_{yy} = 0$ ,  $\sigma_{xy} = 0$ . Початкові та поточні значення температур усього масиву задавались такими:  $T_0 = 0$ ,  $T = -25$  °C.

Значення термомеханічних характеристик для дрібнозернистого асфальтобетону склали  $E = 5 \cdot 10^9$  Па,  $\nu = 0,2$ ,  $\alpha_T = 2,46 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ ; для сталі  $E = 2,1 \cdot 10^{11}$  Па,  $\nu = 0,3$ ,  $\alpha_T = 1,3 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ .

Простий логічний аналіз показує, щоскільки коефіцієнт матеріалу верхнього шару  $\alpha_T = 2,46 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$  більший ніж коефіцієнт  $\alpha_T = 1,3 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$  сталі, верхній шар при охолодженні намагається скоротитися на більшу величину порівняно з нижнім шаром, то двошарова конструкція прагне набути форми дуги з опуклістю, спрямованою донизу.

**Аналіз результатів скінченно-елементного моделювання.** Розрахунки показали, що ділянки найбільш неоднорідних полів деформацій і напружень виникають на краях конструкції. Величина вертикального переміщення у центральній зоні конструкції порівняно невелика і має найбільші значення в крайових зонах. На рис. 6 у збільшеному масштабі показано поперечний переріз моста в деформованому стані. Можна відзначити, що функція прогинів має вигляд крайового ефекту, який є причиною концентрації напружень у цій зоні. На рис. 7 у кольоровому зображенні показані поля функцій напружень  $\sigma_x$  (а),  $\sigma_y$  (б),  $\sigma_z$  (в),  $\sigma_{xy}$  (г) у перерізі  $z = \text{const}$  на лівій ділянці конструкції, яка виділена для ілюстрації. Праворуч від кожного поля наведена кольорова шкала значень напружень, що відповідають кожному кольоровому відтінку значення напружень, в Па. Як видно з рисунка, напруження  $\sigma_x$  дорівнюють нулю у вертикальній площині  $x = \text{const}$  лівого краю, потім вони швидко зростають вздовж координати  $x$  до стаціонарних значень. На рисунку максимальні додатні значення цих напружень відмічені незалитим кружечком (розтяг), максимальні по модулю від'ємні значення – залитим кружечком (стиснення).

Заслугує на увагу графік розподілення функції  $\tau_{xy}(x)$  на поверхні контакту верхнього та нижнього шарів в околі лівого краю системи (рис. 8). Як видно, концентрація цієї функції має місце на краях конструкції, а потім вона швидко падає до нуля при наближенні до центральної частини.

Вигляд даної функції пояснює локальне викривлення конструкції в прикраєвих зонах (рис. 6). Все це також може бути однією із причин розшарування конструкції в цих зонах.



Рис. 6. Геометрія конструкції в деформованому стані (в збільшеному масштабі)

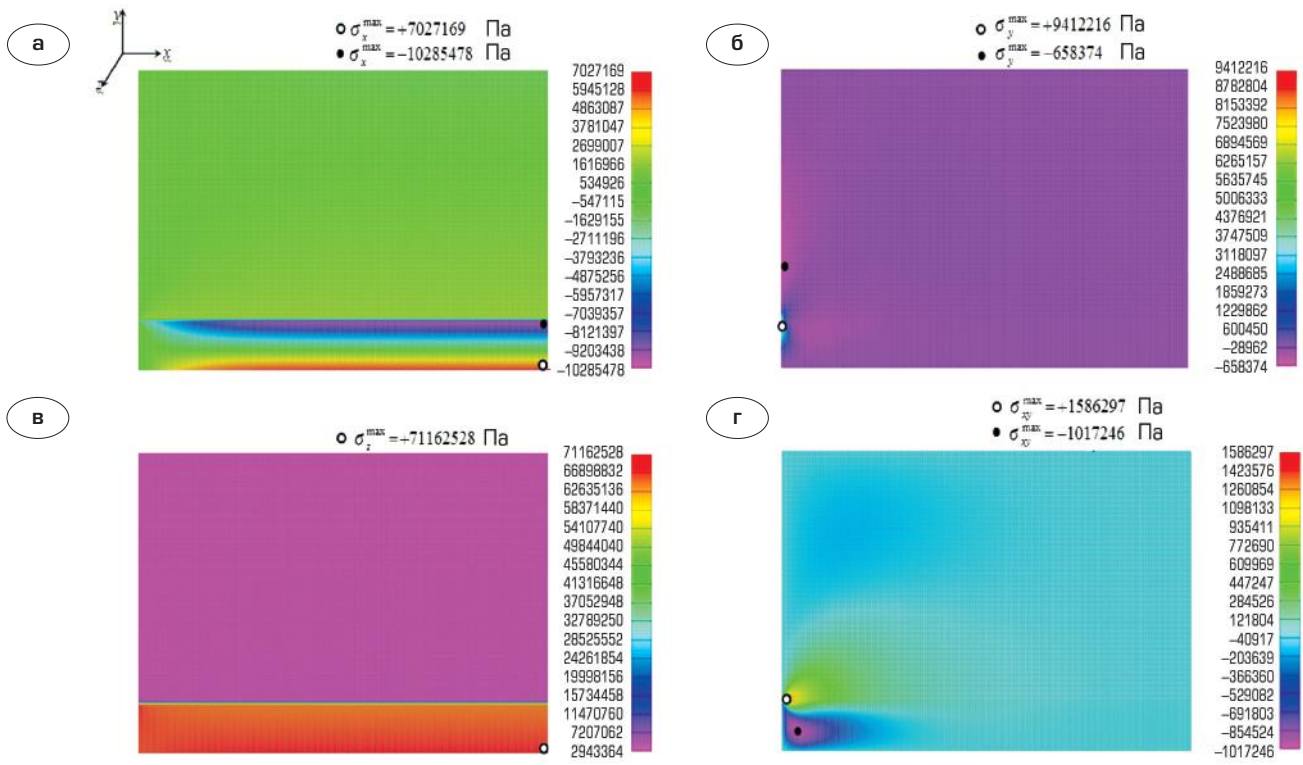


Рис. 7. Поля напружень  $\sigma_x$  (а),  $\sigma_y$  (б),  $\sigma_z$  (в),  $\sigma_{xy}$  (г) на ділянці конструкції, в околі її лівого краю

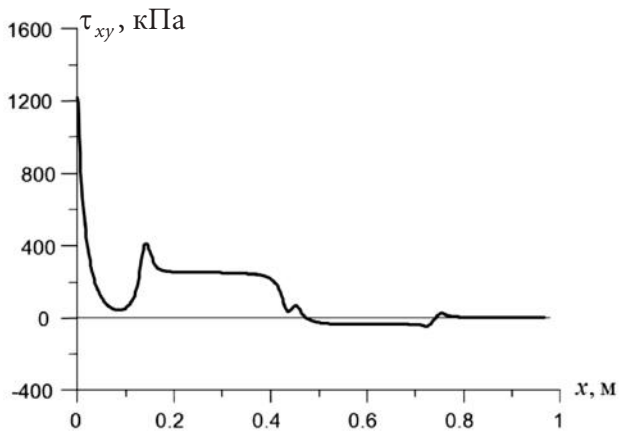


Рис. 8. Графік розподілення функції  $\tau_{xy}(x)$  за координатою  $x$  на межі контакту асфальтобетону та сталі в околі лівого краю системи

Графік функції  $\sigma_x(y)$  вздовж вертикалі в центральному перерізі конструкції, показаний на рис. 3, представлений на рис. 9, а. З нього випливає, що обидва шари конструкції полотна проїзної частини моста від даного температурного збурення знаходяться в стані майже чистого згину, оскільки функція  $\sigma_x(y)$  є розривною в точці спряження шарів, і в межах кожного шару вона змінюється лінійно, причому інтеграл від цієї функції за змінною дорівнює нулю, тобто:

$$\int_{(H)} \sigma_x(y) dy = 0,$$

де  $H$  – повна товщина полотна.

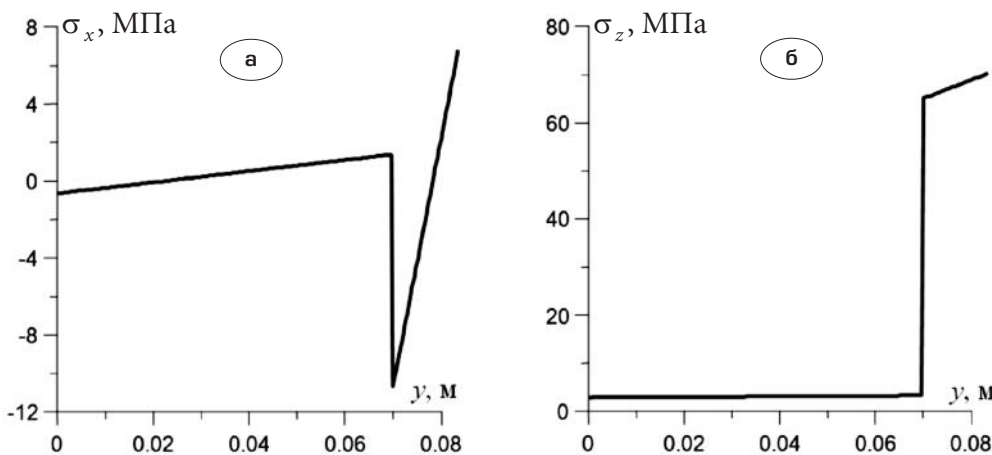


Рис. 9. Графік функцій  $\sigma_x(y)$  (а) та  $\sigma_z(y)$  (б) по вертикалі, що розташована в центральному перерізі конструкції

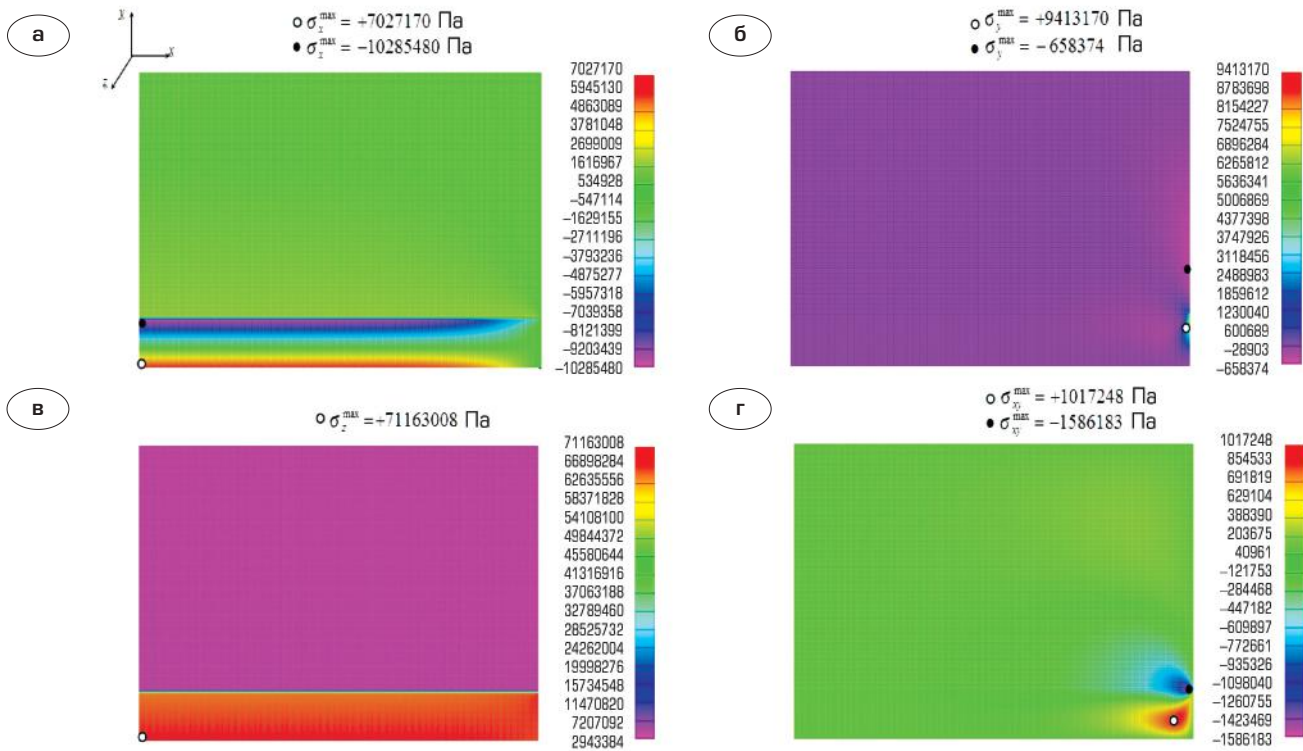


Рис. 10. Поля напружень  $\sigma_x$  (а),  $\sigma_y$  (б),  $\sigma_z$  (в),  $\sigma_{xy}$  (г) на ділянці конструкції, в околі її правого краю

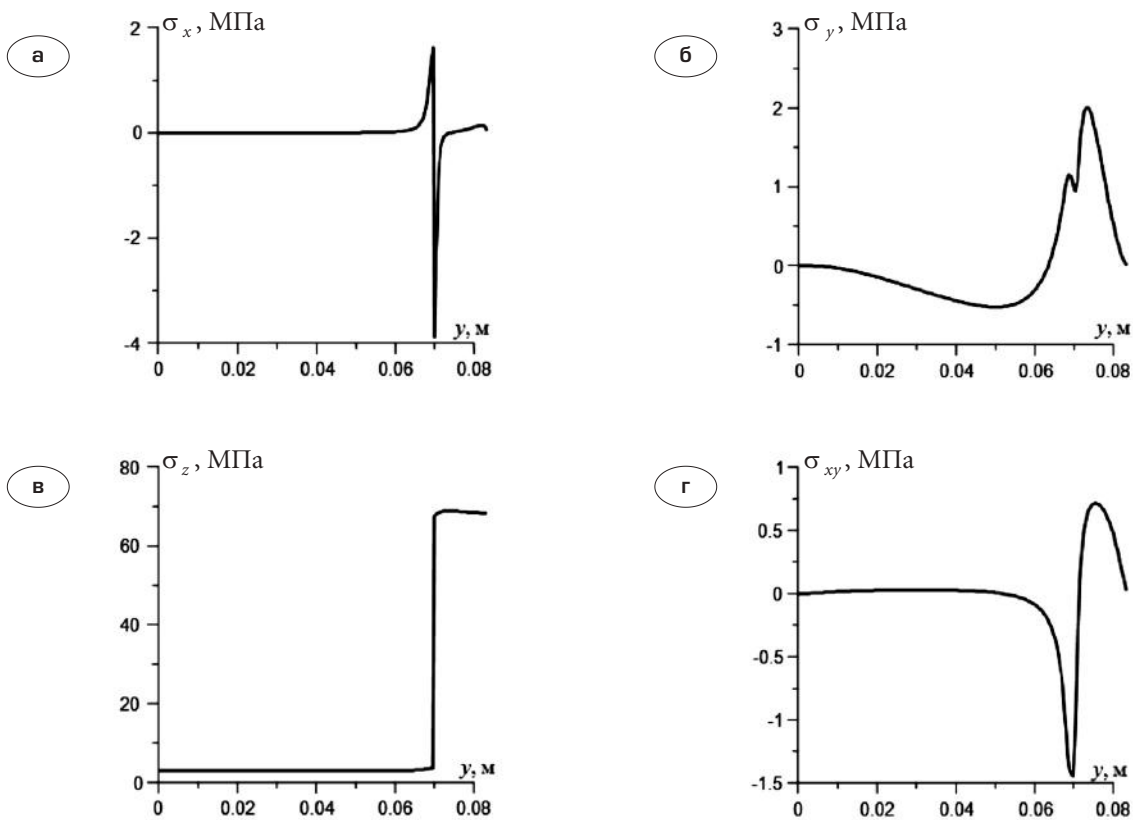


Рис. 11. Графіки функцій  $\sigma_x(y)$  (а),  $\sigma_y(y)$  (б),  $\sigma_z(y)$  (в),  $\sigma_{xy}(y)$  (г) вздовж вертикалі, віддалений на відстань 1 м від правого краю

У всій області покриття функція  $\sigma_y(x, y)$  має порівняно малі значення, хоча на вільному краю (рис. 7, б) в точці спряження асфальтобетонного та сталевго шарів вона має концентрацію, яка сприяє розшаруванню конструкції в цій зоні. Враховуючи малість цієї функції в усій іншій зоні, на рис. 9 вона не наведена.

Напруження  $\sigma_z(x, y)$  має найбільші значення (рис. 7, в), оскільки переміщення  $u_z$  вздовж осі  $z$  дорівнюють нулю та при охолодженні вся мостова конструкція зазнає граничних напружень, що розтягуються, якщо в ній не передбачена можливість вільної компенсації поздовжніх зусиль. Графік  $\sigma_z(y)$  змін цієї функції за товщиною полотна в його центральному перерізі показаний на рис. 9, б. Такі поля відповідають також явищам розподілу розв'язувальних функцій в сингулярно збурених системах [1, 8, 9], коли вони мають вигляд крайових ефектів і локальних нерегулярностей.

Ця функція також зазнає розриву на площині з'єднання шарів, тому що розривна на цій площині також функція модуля пружності  $E$  й значення напружень у сталевому листі набагато переважають їх величини в асфальтобетонному шарі, так як модуль пружності сталі набагато більший ніж модуль пружності верхнього шару.

Необхідно зазначити, однак, що ці напруження можуть бути суттєво знижені за рахунок введення розвантажувальних зазорів або забезпечення поздовжньої рухомості мостової конструкції на опорах.

На рис. 10 представлені поля напружень  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$ ,  $\sigma_{xy}$  на ділянці конструкції в околі її правого краю на розрахунковій схемі (рис. 3). Очевидно, що поля напружень на рис. 10 симетричні відповідним полям на рис. 7, що свідчить про достатню точність проведених обчислень.

На рис. 11 подані графіки функцій  $\sigma_x(y)$ ,  $\sigma_y(y)$ ,  $\sigma_z(y)$ ,  $\sigma_{xy}(y)$  вздовж вертикалі, віддаленій на відстань одного метра від правого краю. Тут суттєвий інтерес має функція  $\sigma_{xy}(y)$ . На верхній і нижній вільних поверхнях ( $y = 0$  та  $y = 0,084$  м) ця функція дорівнює нулю, в той час як на площині поділу шарів ( $y = 0,07$  м) вона має максимальне значення, що сприяє розшаруванню конструкції в цій площині.

Наведені результати дають змогу оцінити рівні температурних напружень і виділити найбільш небезпечні місця в асфальтобетонних фрагментах конструкції, в яких можуть статися

руйнування. В загальному випадку задача щодо міцності має розв'язуватися з використанням методів теорії термов'язкопружності (термов'язкопластичності). Розв'язок цієї задачі має значні теоретичні та практичні труднощі. Можна лише сприйняти загальні припущення, що стосуються даного питання та пов'язані з виділенням в'язкого та крихкого руйнування матеріалів [6]. Для одного й того ж матеріалу руйнування може бути крихким – для високих напружень та нетривалого часу, та в'язким – для малих напружень та тривалого часу. Існують діапазони напружень і часу, для яких руйнування є змішаним: поєднуються особливості й в'язкого та крихкого руйнування.

Типова схема випробувань на довготривалу міцність така: декілька зразків піддають впливу навантажень різного значення та фіксують час руйнування для кожного значення напруження. Таким чином виходить діаграма довготривалої міцності. Залежність деформації  $\varepsilon$  в момент руйнування від часу  $t_*$  схематично показана на рис. 12.

Отже, якщо покласти, що температура навколишнього середовища фіксована та залишається постійною, то і температурні деформації в асфальтобетоні залишаються постійними. Тоді час руйнування асфальтобетону визначається рівнем термонапружень. По-перше, ці напруження  $\sigma_z$  розтягувальні та орієнтовані в напрямку осьової лінії моста. Вони призводять до появи поперечних тріщин.

По-друге, це нормальні напруження  $\sigma_x$  у поперечному напрямі, які працюють в комбінації з дотичними напруженнями  $\tau_{xy}$  та мають найбільші значення на площині контакту асфальтобетонного та сталевго шарів у зонах, що примикають до лівого та правого країв моста.

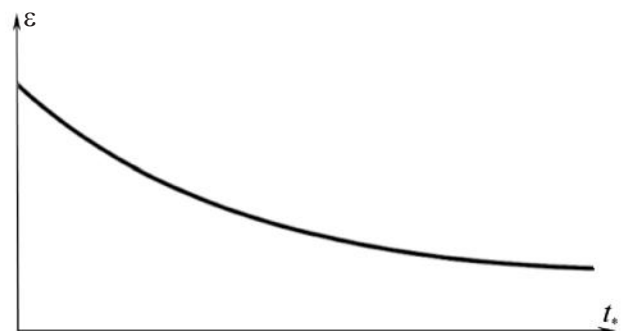


Рис. 12. Залежність деформації  $\varepsilon$  в момент розриву від часу  $t_*$  руйнування

Така комбінація напружень призводить до розшарування конструкції в цій зоні та появи в ній поздовжніх тріщин. Вона ж є причиною найбільшого загального викривлення конструкції в цих зонах (рис. 6). Як уже зазначено, такі ефекти проявляються тим більш помітно, чим вищий рівень напружень (тобто  $T - T_0$ ) і чим довше цей рівень зберігається. Оскільки несприятливі зони переважно знаходяться на краях моста (рис. 7, 8), можна очікувати, що в них в першу чергу ініціюються і руйнування асфальтобетонного покриття. Причому найбільш інтенсивно вони відбуваються в зимовий період під час сильних та тривалих морозів.

### Висновки.

Аналіз конструктивної схеми моста та термонапруженого стану асфальтобетонного покриття, виконаний за спрощеною схемою, дає змогу дійти наступних висновків:

1. Можна припустити, що міст має знижену жорсткість на кручення, оскільки база тросової системи мала (10,8 м), а загальна ширина моста велика (41,5 м). Окрім того переріз моста має невеликий момент інерції при крученні. Для такої конструктивної схеми найбільші деформації і напруження при крученні виникають у крайових зонах моста.

2. Розрахунок навіть за спрощеною постановкою задачі термопружності свідчить, що в умовах зимового сезону найбільші температурні вигини моста також мають місце в його крайових зонах (рис. 6), в яких спостерігаються розшарування. Тут бажано отримати дані щодо початку утворення тріщин і місць їх локалізації за довжиною та шириною прогону, а також їхні орієнтації.

3. У цих же зонах генеруються і найбільші дотичні напруження між асфальтобетоном і металом, які також сприяють розшаруванню.

4. Оскільки, як показали розрахунки, важливим чинником, що впливає на зростання термонапружень, є різниця в значеннях коефіцієнтів теплового лінійного розширення асфальтобетону та сталевих фрагментів конструкції моста, бажано підбирати матеріал покриття зі значенням коефіцієнта теплового розширення, що наближається до його значення для сталі. Тут міг би бути корисним досвід регулювання різниці в значеннях теплового розширення, що використовується в механіці композитів.

5. Для перевірки достовірності сформульованих припущень мають бути виконані більш точні розрахунки за повнішими розрахунковими схемами, які включають основні несучі підконструкції моста.

*Автори виражають вдячність професору В.І. Гуляєву за консультації та обговорення результатів.*

- |  |   |
|--|---|
| <p>[1] Гуляєв В.І. Дослідження термонапруженого стану конструкцій дорожнього одягу / В.І. Гуляєв, В.В. Гайдайчук, В.В. Мозговий, Ю.О. Заєць, Л.В. Шевчук // Промислове будівництво та інженерні споруди. – 2017. – № 1. – С. 6–12.</p> <p>[2] Гайдайчук В.В. Моделювання напружено-деформованого стану конструкції дорожнього одягу під дією транспортних навантажень / В.В. Гайдайчук, В.В. Мозговий, Ю.О. Заєць, Л.В. Шевчук // Опір матеріалів і теорія споруд. – 2017. – Вип. 99 – С. 45–57.</p> <p>[3] Коваленко А.Д. Основы термоупругости. – К.: Наукова Думка, 1970. – 239 с.</p> <p>[4] Новацкий В. Динамические задачи термоупругости. – М.: Мир, 1970. – 256 с.</p> <p>[5] Новацкий В. Теория упругости. – М.: Мир, 1975 – 872 с.</p> | <p>[6] Гудрамович В.С. Теория ползучести и ее приложения к расчету элементов тонкостенных конструкций. – К.: Наукова думка, 2005. – 221 с.</p> <p>[7] Перельмутер А.В. О влиянии изменения жесткостей на перераспределение усилий в статически неопределимой системе / А.В. Перельмутер // Строительная механика и расчет сооружений. – 1974. – № 5. – С. 64–67.</p> <p>[8] Чанг Н., Хауэс Ф. Нелинейные сингулярно возмущенные краевые задачи. – М.: Мир, 1988. – 247 с.</p> <p>[9] Shishkin G.I. Method of splitting for singularly perturbed parabolic equations // East-West J.Numer. Math. – 1993. – V.1, № 2. – P. 147–163.</p> |
|--|---|

Надійшла 31.01.2019 р.