

**МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ
АСФАЛЬТОБЕТОННОГО ПОКРИТТЯ НА МОСТАХ**

Онищенко А. М., канд. техн. наук

Різніченко О. С., асистент

Національний транспортний університет (НТУ)

Ряпухін В. М., канд. техн. наук

Харківський національний автомобільно-дорожній університет (ХНАДУ)

Асфальтобетонне покриття на мостових спорудах перебуває у складних умовах експлуатації. На нього у процесі служби діють багато несприятливих факторів, до основних з яких відносять [1-3]: атмосферні опади; коливання температури; перемінне заморожування-відтавання води в порах і ушкоджених місцях; сонячна радіація; забруднення води й повітря агресивними хімічними засобами, що були викинуті промисловістю; реагенти використання під час утримання автомобільних доріг; рідкі нафтопродукти й кислоти, що потрапляють на поверхню в процесі проїздів транспортних засобів; продукти згоряння палива у двигунах; циклічні навантаження при русі важкого транспорту, що викликають складний несприятливий напружено-деформований стан покриття в різних конструктивних сполученнях.

Дорожній одяг мостових споруд є складовим елементом їхньої проїзної частини та складається із шару покриття, що безпосередньо сприймає вплив транспортних навантажень і атмосферних факторів, і несучого шару, що розподіляє й передає навантаження на нижче розташовані елементи проїзної частини штучної споруд [1-3].

Моделювання напружено-деформованого стану (НДС) виконували шляхом використання методу скінчених елементів. Розрахунок виконано в програмних комплексах Ліра та Ansys. При моделюванні прольотної будови використані типові балки 3.503-14 (рис. 1, 2), довжина прольотної будови складала 21 м, а її ширина 12 м, товщина асфальтобетонного шару покриття була прийнята 15 см. При моделюванні враховували умову надійного зчеплення контакту асфальтобетонного шару та прольотної будови. Модуль пружності асфальтобетонного шару прийнято відповідним до температури 50 °С і дорівнює 400 МПа, коефіцієнт Пуассона 0,4.

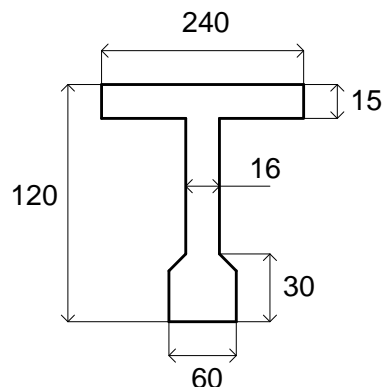


Рисунок 1 – Типовий проект балки 3.503-14

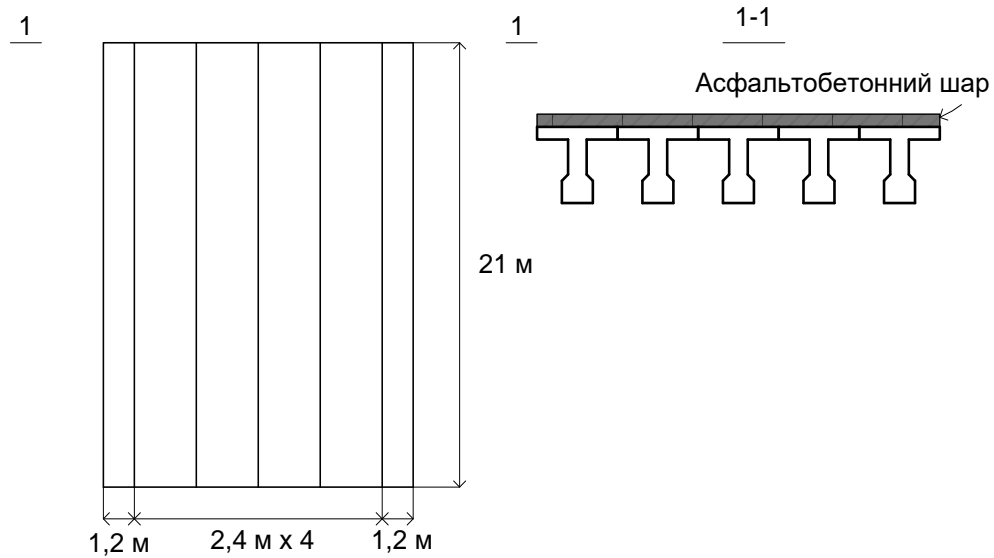


Рисунок 2 – Прольотна будова (вид зверху та збоку)

При модельовані напружено-деформованого стану асфальтобетонного шару на прольотній будові використано 2 типи навантаження (рис. 3 - 6). Перший тип завантаження виконано у вигляді одиночного автомобіля групи А1 з двома осями (рис. 3, 4). Навантаження на кожен вісь прийнято 115 кН. Площа відбитку колеса становить 935 см². Навантаження на одне колесо становить 57,5 кН. Площа відбитку колеса 935 см². Питомий тиск:

$$P = \frac{57,5 \text{ кН}}{0,0935 \text{ м}^2} \approx 640 \frac{\text{кН}}{\text{м}^2} = 0,64 \text{ МПа}$$

(1)

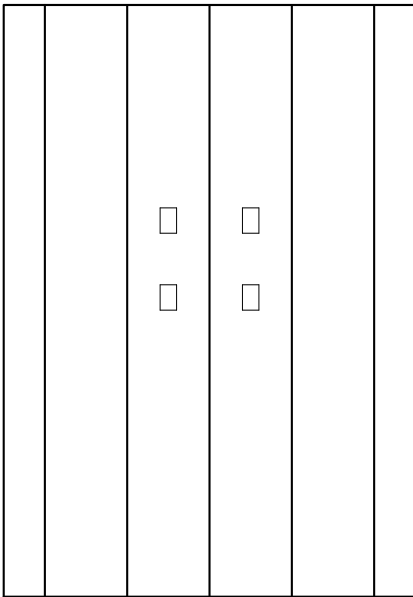


Рисунок 3 – Розрахункова схема першого типу завантаження прольотної будови

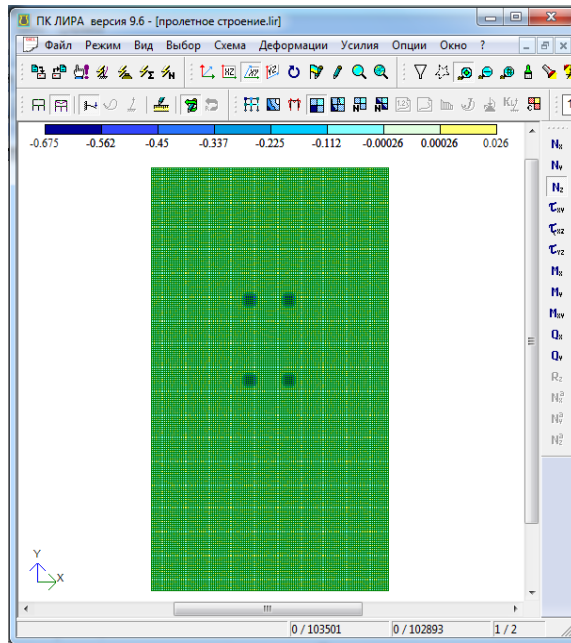


Рисунок 4 – Модель асфальтобетонного шару на прольотній будові для першого типу завантаження в програмному комплексі Ліра

Другий тип завантаження виконано у вигляді одного колеса автомобіля групи А1 (рис. 5, 6).

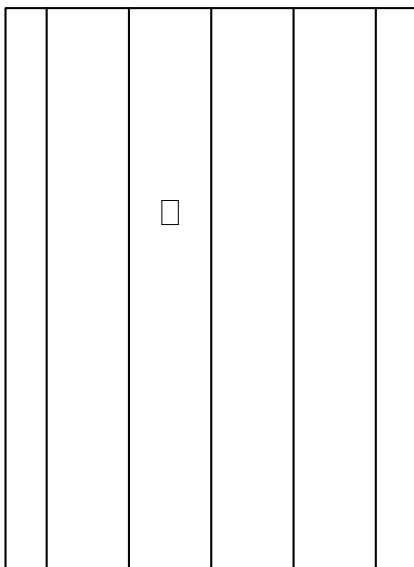


Рисунок 5 – Розрахункова схема другого типу завантаження прольотної будови

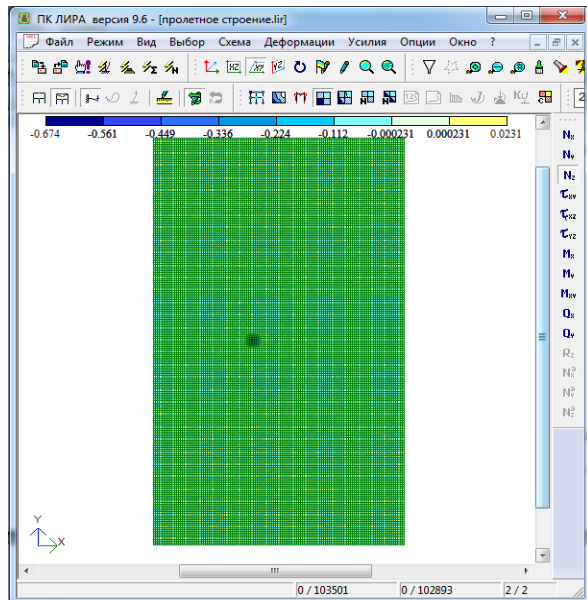
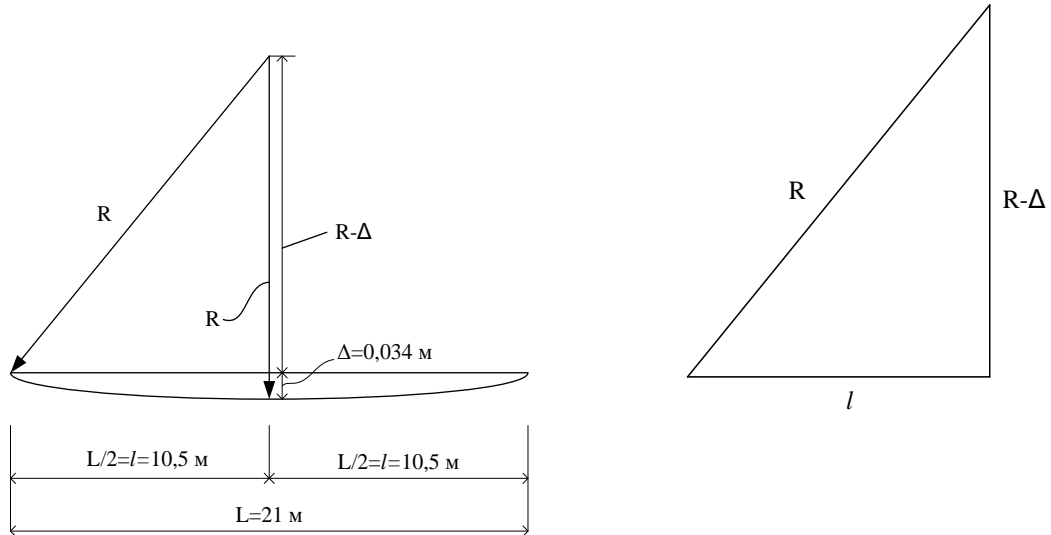


Рисунок 6 – Модель асфальтобетонного шару на прольотній будові для другого типу завантаження в програмному комплексі Ліра

ШТУЧНІ СПОРУДИ

В результаті НДС асфальтобетонного шару на прольотній будові визначено переміщення на поверхні моделі по вісі відбитку колеса. Для першого типу завантаження (4 колеса) переміщення дорівнює $\Delta = 3,4$ см. Для другого типу навантаження (1 колесо) переміщення дорівнює $\Delta = 2,4$ см. Після навантаження визначили радіус кривизни чаші прогину (рис. 7-8). Для цієї мети зі схеми до визначення радіусу кривизни чаші прогину прольотної будови (рис. 7) виділили трикутник зі сторонами R , $R-\Delta$ та l (рис. 8).



R – радіус кривизни чаші прогину, Δ – переміщення (прогин) поверхні прольотної конструкції,
 L – довжина прольотної будови

Рисунок 7 – Схема до визначення радіусу кривизни чаші прогину прольотної будови

Рисунок 8 – Схема трикутника до визначення радіусу кривизни чаші прогину прольотної будови

Зі схеми наведеної рис. 8 зрозуміло, що радіус кривизни чаші прогину R є гіпотенузою і відповідно його можливо визначити за наступною формулою:

$$R^2 = l^2 + (R - \Delta)^2 = l^2 + R^2 - 2 \times R \times \Delta + \Delta^2 \quad (2)$$

Внаслідок чого встановлено рівність:

$$2 \times R \times \Delta = l^2 + \Delta^2 \quad (3)$$

З урахуванням рівнянь (2) і (3) можливо визначити R :

$$R = \frac{l^2 + \Delta^2}{2 \times \Delta} = \frac{10,5^2 + 0,035^2}{2 \times 0,035} = 1575 \text{ м} \quad (4)$$

Скористаємось рішенням по Одемарку наведеним в [1] для визначення прогину однорідного напівпростору в залежності від чаші прогину:

ШТУЧНІ СПОРУДИ

$$\delta = \frac{2 \times r^2}{R} = \frac{612}{157500} = 0,004 \quad \text{см} = 0,04 \text{ мм} \quad (5)$$

де: r – радіус відбитку колеса, см;
 R – радіус кривизни чаші прогину, см.

За прогином визначимо модуль пружності на півпросторі [1]:

$$E = \frac{p \times D}{\delta} = \frac{6 \times 35}{0,004} = 52500 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2} = 5250 \text{ МПа} \approx 5000 \text{ МПа} \quad (6)$$

де: p – тиск від колеса, кг/см²;
 D – діаметр радіус відбитку колеса, см;
 Δ – прогин однорідного на півпросторі, см.

Окрім цього виконано моделювання напружено-деформованого стану асфальтобетонного шару на напівпросторі, що за своїми властивостями відповідає прольотній будові (рис. 9 - 11). Розмір в плані розрахункової моделі обрано ґрунтуючись на літературних даних досліджень у цій галузі [2] та дорівнює 2 м x 2 м. Товщина асфальтобетонного шару 15 см, товщина на півпросторі 2 м. Модуль пружності асфальтобетонного шару 400 МПа, коефіцієнт Пуассона 0,4. Модуль пружності на півпросторі 5000 МПа, коефіцієнт Пуассона 0,15.

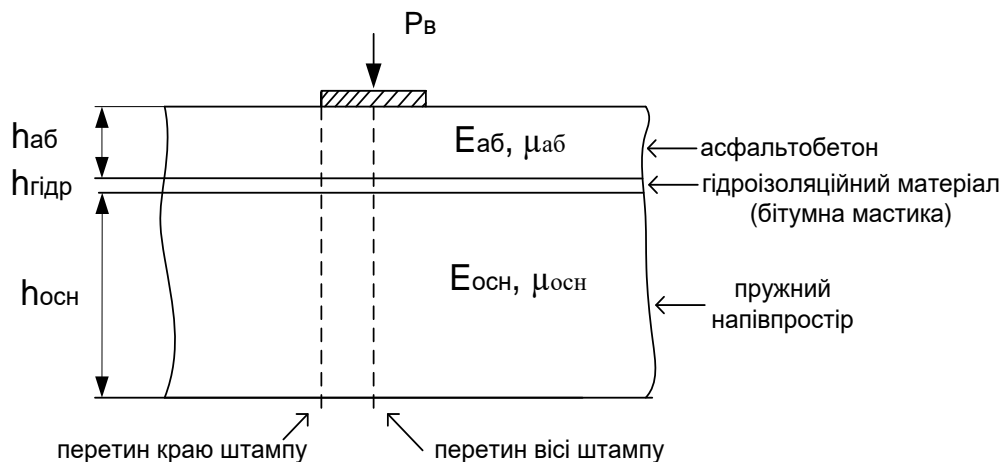


Рисунок 9 – Розрахункова схема моделі асфальтобетонного шару на пружному напівпросторі

Величину навантаження прийнято аналогічну попереднім розрахункам. Діаметр штамбу 34,5 см Площа відбитку колеса становить 935 см². Навантаження на одне колесо становить 57,5 кН. Питомий тиск:

$$P = \frac{57,5 \text{ кН}}{0,0935 \text{ м}^2} \approx 640 \frac{\text{кН}}{\text{м}^2} = 0,64 \text{ МПа} \quad (7)$$

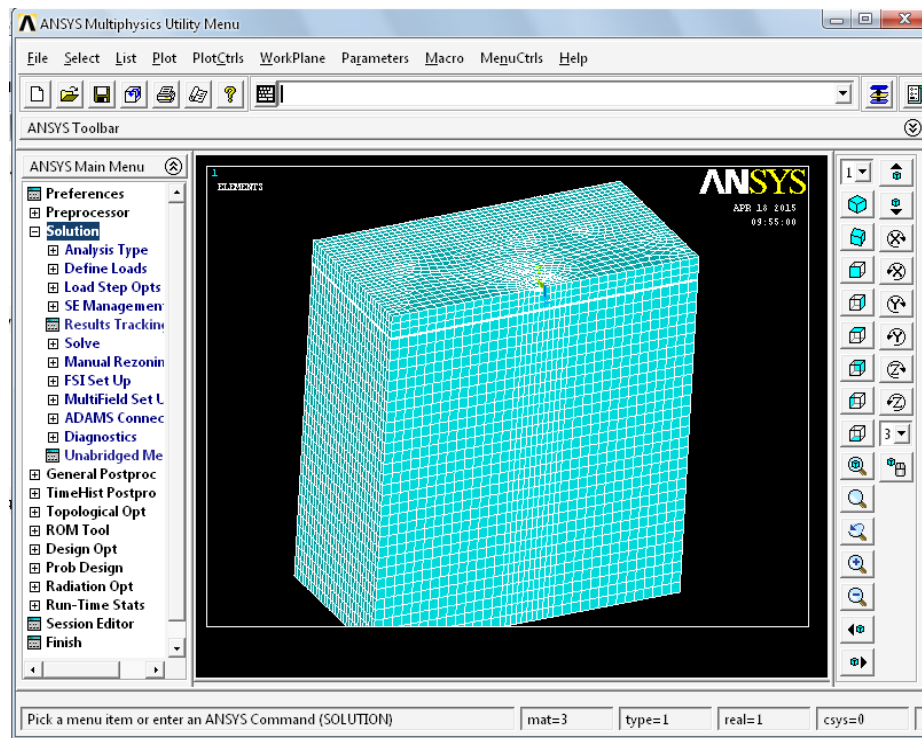


Рисунок 10 – Модель асфальтобетонного шару на пружному напівпросторі в програмному комплексі ANSYS

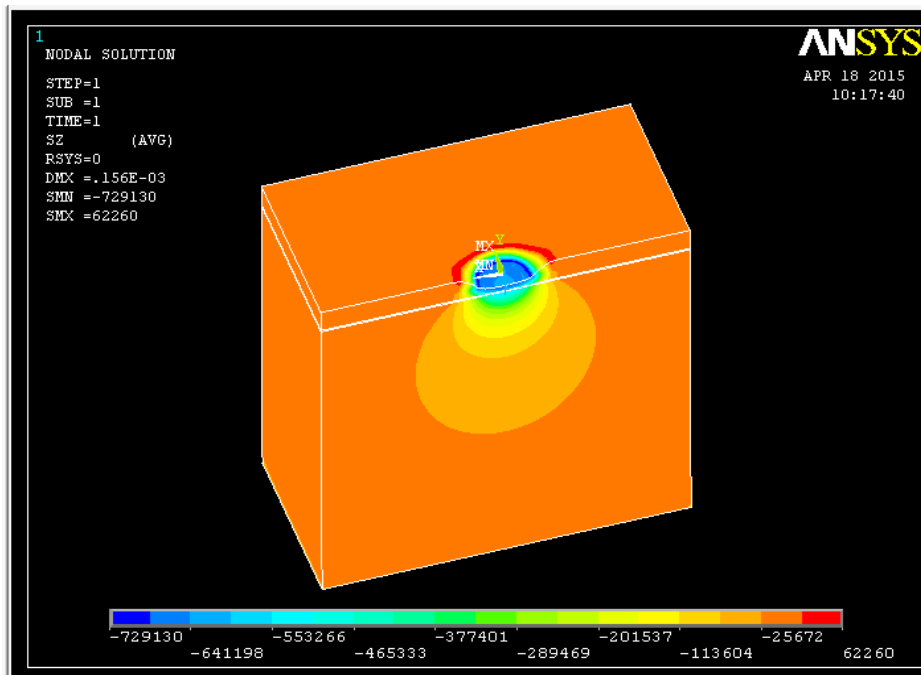


Рисунок 11 – Напруження σ_z в розрахунковій моделі

ШТУЧНІ СПОРУДИ

Для визначення впливу модуля пружності півпростору на дотичні і вертикальні напруження, окрім модуля пружності півпростору 5000 МПа при моделюванні використано модуль пружності 48000 МПа. Характеристики цієї конструкції:

- асфальтобетонний шар товщиною 15 см, модуль пружності 400 МПа, коефіцієнт Пуассона 0,4;
- шар гідроізоляції з бітумної мастики товщиною 1 см, модуль пружності 200 МПа, коефіцієнт Пуассона 0,4;
- пружний напівпростір, що імітує прольотну будову товщиною 200 см, модуль пружності 48000 МПа.

Максимальне переміщення (деформація) знаходиться на вісі штампу дорівнює $0,15645 \times 10^{-03} \text{ м} = 0,016 \text{ см}$. Це переміщення занесено в табл. 1, в рядок «Переміщення на поверхні моделі (вісь відбитку колеса)». Приклад результатів моделювання напружень σ_z наведено на рис. 11. Значення цих напружень та результатів розрахунків за іншими моделями (наведеними вище) зведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Зведена таблиця результатів моделювання

Тип завантаження			
Одиночний автомобіль на прольотній будові	Одне колесо на прольотній будові	Одне колесо на напівпосторі	
Програмний комплекс використаний для моделювання			
Ліра		Ansys	
Характеристики моделі			
1. Асфальтобетонний шар: - товщина шару: 15 см; - модуль пружності: 400 МПа; - коеф. Пуассона: 0,4; 2. Прольотна будова у вигляді типових балок 3.503-14 довжиною 21 м.	1. Асфальтобетонний шар: - товщина шару: 15 см; - модуль пружності: 400 МПа; - коеф. Пуассона: 0,4; 2. Прольотна будова у вигляді типових балок 3.503-14 довжиною 21 м.	1. Асфальтобетонний шар: - товщина шару: 15 см; - модуль пружності: 400 МПа; - коеф. Пуассона: 0,4; 2. Пружний напівпростір: - товщина шару: 200 см; - модуль пружності: 5000 МПа; - коеф. Пуассона: 0,15.	1. Асфальтобетонний шар: - товщина шару: 15 см; - модуль пружності: 400 МПа; - коеф. Пуассона: 0,4; 2. Пружний напівпростір: - товщина шару: 200 см; - модуль пружності: 48000 МПа; - коеф. Пуассона: 0,15.
Напруження на поверхні моделі (вісь відбитку штамп)			
$\sigma_z = -0,63$ $\tau_{xz} = 0$ $\sigma_x = -0,44$ $\tau_{xy} = 0$ $\sigma_y = -0,37$ $\tau_{yz} = 0$	$\sigma_z = -0,63$ $\tau_{xz} = 0$ $\sigma_x = -0,41$ $\tau_{xy} = 0$ $\sigma_y = -0,36$ $\tau_{yz} = 0$	$\sigma_z = -0,64$ $\tau_{xz} = 0$ $\sigma_x = -0,34$ $\tau_{xy} = 0$ $\sigma_y = -0,34$ $\tau_{yz} = 0$	$\sigma_z = -0,64$ $\tau_{xz} = 0$ $\sigma_x = -0,33$ $\tau_{xy} = 0$ $\sigma_y = -0,33$ $\tau_{yz} = 0$

ШТУЧНІ СПОРУДИ

Кінець табл. 1

Напруження на контактi асфальтобетонного шару та прольотної будови (вiсь вiдбитку штампу)			
$\sigma_z = -0,62$ $\tau_{xz} = 0$	$\sigma_z = -0,62$ $\tau_{xz} = 0$	$\sigma_z = -0,57$ $\tau_{xz} = 0$	$\sigma_z = -0,56$ $\tau_{xz} = 0$
$\sigma_x = -0,25$ $\tau_{xy} = 0$	$\sigma_x = -0,24$ $\tau_{xy} = 0$	$\sigma_x = -0,22$ $\tau_{xy} = 0$	$\sigma_x = -0,23$ $\tau_{xy} = 0$
$\sigma_y = -0,23$ $\tau_{yz} = 0$	$\sigma_y = -0,23$ $\tau_{yz} = 0$	$\sigma_y = -0,22$ $\tau_{yz} = 0$	$\sigma_y = -0,23$ $\tau_{yz} = 0$
Максимальнi перемiщення на поверхнi моделi (вiсь вiдбитку штампу)			
-3,4 см	-2,4 см	-0,018 см	-0,016
Напруження на поверхнi моделi (край вiдбитку штампу)			
$\sigma_z = -0,46$ $\tau_{xz} = -0,05$	$\sigma_z = -0,46$ $\tau_{xz} = 0,05$	$\sigma_z = -0,42$ $\tau_{xz} = 0,05$	$\sigma_z = -0,39$ $\tau_{xz} = -0,10$
$\sigma_x = -0,37$ $\tau_{xy} = -0,01$	$\sigma_x = -0,34$ $\tau_{xy} = 0$	$\sigma_x = -0,24$ $\tau_{xy} = 0$	$\sigma_x = -0,22$ $\tau_{xy} = 0$
$\sigma_y = -0,31$ $\tau_{yz} = 0$	$\sigma_y = -0,30$ $\tau_{yz} = 0$	$\sigma_y = -0,24$ $\tau_{yz} = 0$	$\sigma_y = -0,21$ $\tau_{yz} = 0$
Напруження на контактi асфальтобетонного шару та прольотної будови (край вiдбитку штампу)			
$\sigma_z = -0,44$ $\tau_{xz} = -0,13$	$\sigma_z = -0,44$ $\tau_{xz} = -0,12$	$\sigma_z = -0,28$ $\tau_{xz} = -0,16$	$\sigma_z = -0,25$ $\tau_{xz} = -0,15$
$\sigma_x = -0,165$ $\tau_{xy} = 0$	$\sigma_x = -0,16$ $\tau_{xy} = 0$	$\sigma_x = -0,13$ $\tau_{xy} = 0$	$\sigma_x = -0,12$ $\tau_{xy} = 0$
$\sigma_y = -0,165$ $\tau_{yz} = -0,13$	$\sigma_y = -0,16$ $\tau_{yz} = -0,12$	$\sigma_y = -0,11$ $\tau_{yz} = 0,16$	$\sigma_y = -0,10$ $\tau_{yz} = 0,15$

Аналізуючи результати моделювання напружено-деформованого стану асфальтобетонного шару на жорсткій основі можна зробити наступні висновки:

- напруження на поверхні асфальтобетонного шару і на контактi асфальтобетонного шару з прольотною будовою можна вважати однаковими для умов навантаження одним автомобілем з чотирма колесами та умов навантаження одним колесом;
- прогин поверхні асфальтобетонного шару на прольотній будові від завантаження одним автомобілем більше приблизно на 30 % у порівнянні з прогином асфальтобетонного шару на прольотній будові завантаженим одним колесом;
- при зміні модуля пружності напівпростору, що імітує прольотну будову, з 5000 МПа на 48000 МПа напруження на поверхні асфальтобетонного шару та на контактi шарів майже не змінюються.
- заміна прольотної будови пружним напівпростором, при інших рівних умовах, призводить до незначної зміни величини напружень. Тому в подальшому, з метою полегшення розрахункової моделі, при розрахунках напружено-деформованого стану асфальтобетонного шару та гідроізоляційного матеріалу (контакту шарів) прольотну будову замінюватимемо пружним напівпростором.

При проїзді транспортних засобів на покриття дорожнього одягу окрім вертикального тиску може діяти горизонтальна сила. Поява горизонтальної сили значно змінює напружено-деформований стан шарів дорожнього одягу.

Виконано моделювання напружено-деформованого стану асфальтобетонного шару на напівпросторі при прикладенні вертикального навантаження і горизонтальної сили. Вертикальний тиск для групи А1 0,8 МПа [4]. Горизонтальна сила прикладена у розмірі 75 % від вертикального тиску [1], що складає 56 кН. Результати моделювання напружено-деформованого стану наведено в табл. 2.

ШТУЧНІ СПОРУДИ

Таблиця 2 – Результати моделювання напружено деформованого стану асфальтобетонного покриття на мостах

Розташування перетину		
вісь відбитку колеса	край перед відбитком колеса	край за відбитком колеса
Напруження на поверхні моделі		
$\sigma_z = -0,64$ $\tau_{xz} = -0,57$ $\sigma_x = -0,42$ $\tau_{xy} = -0,52$ $\sigma_y = -0,42$ $\tau_{yz} = 0$	$\sigma_z = -0,34$ $\tau_{xz} = -0,57$ $\sigma_x = -0,97$ $\tau_{xy} = -0,41$ $\sigma_y = -0,40$ $\tau_{yz} = 0$	$\sigma_z = -0,46$ $\tau_{xz} = -0,46$ $\sigma_x = +0,52$ $\tau_{xy} = -0,41$ $\sigma_y = -0,04$ $\tau_{yz} = 0$
Напруження на контакті асфальтобетонного шару та прольотної будови		
$\sigma_z = -0,59$ $\tau_{xz} = -0,17$ $\sigma_x = -0,23$ $\tau_{xy} = 0$ $\sigma_y = -0,23$ $\tau_{yz} = 0$	$\sigma_z = -0,41$ $\tau_{xz} = -0,31$ $\sigma_x = -0,27$ $\tau_{xy} = 0$ $\sigma_y = -0,15$ $\tau_{yz} = 0$	$\sigma_z = -0,13$ $\tau_{xz} = 0,03$ $\sigma_x = +0,01$ $\tau_{xy} = 0$ $\sigma_y = -0,05$ $\tau_{yz} = 0$

Висновки

На сьогодні, конструкцію дорожнього одягу на мостових спорудах призначають на основі досвіду експлуатації асфальтобетонного покриття. Запропоноване моделювання дозволяє підібрати конструкцію дорожнього одягу ще на етапі проектування. Дані результати моделювання напружено-деформованого стану асфальтобетонного покриття на мостах дозволили отримати номограми [5] для визначення дотичних напружень від дії вертикального навантаження з урахування різних змінних параметрів: товщини асфальтобетонних шарів та їх модуля пружності, діаметру відбитку колеса, вертикального навантаження.

Література

1. Радовский Б. С. Теоретические основы конструирования и расчета нежестких дорожных одежд на воздействие подвижных нагрузок: Дис. ... д-р техн. наук: 05.22.03. – М., 1983. – 552 с.
2. Мозговой В. В. Научные основы обеспечения температурной трещиностойкости асфальтобетонных покрытий: Дис. докт. техн. наук: 05.22.11 - К., 1996 – 406 с.
3. Смолянец В. В. Удосконалення проектування асфальтобетонного покриття нежорсткого дорожнього одягу в умовах міст: Дис. канд. техн. наук: 05.22.11. – К., 2005. – 108 с.
4. Шеппери Р. А. Вязкоупругое поведение композиционных материалов / Механика композиционных материалов. – М.: Мир, 1978. – С. 102-195.
5. М 02070915-750:2016 Методика проектування асфальтобетонного покриття залізобетонних автодорожніх мостів