

Г.Г. Бігун, Л.О. Карасьова, Я.Ф. Андрусик<sup>1</sup>  
Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра автомобільних шляхів,  
<sup>1</sup>кафедра механіки та автоматизації машинобудування

## ОЦІНКА СТІЙКОСТІ ДОРОЖНЬОГО ОДЯГУ ПРОТИ ХВИЛЕУТВОРЕННЯ

© Бігун Г.Г., Карасьова Л.О., Андрусик Я.Ф., 2013

**Запропоновано математичну модель та рівняння процесу хвилеутворення дорожнього одягу, наведено приклад розрахунку несучої спроможності верхнього шару асфальтобетонного покриття проти хвилеутворення на ділянках інтенсивного гальмування автомобільних потоків.**

**Ключові слова:** несуча спроможність, довговічність, хвилеутворення, деформації, пластичність, гальмування.

**Mathematical model of asphalt carpet waveformation and example of calculation bearing capacity of flu top layer of asphalt pavement against wave formation on areas of heavy braking traffic was described.**

**Key words:** bearing capacity, durability, wave formation, deformation, plasticity, inhibition.

### Вступ. Постановка проблеми

Міцність і довговічність асфальтобетонного покриття залежить від різноманітних факторів, що змінюють умови роботи конструктивних елементів автомобільних доріг. До таких впливів належить температурно-силова дія в літній період на ділянках інтенсивного гальмування автомобільних потоків, коли спостерігається підвищена пластичність асфальтобетону. Дія гальмівної сили на нагрітий шар асфальтобетону може призвести до порушення рівності дорожнього полотна, а згодом до його руйнування.

Відомо, що розрахунки на міцність дорожнього одягу ґрунтуються на висновках теорії пружності під час визначення напружено-деформівного стану шаруватого підпростору, на поверхню якого діє осесиметричне навантаження. Тоді міцність і довговічність покриття типу асфальтобетон під час експлуатації залежить від дії численних факторів, що змінюють умови роботи конструктивних елементів автомобільних доріг. До таких впливів належить температурно-силова дія в літній період, коли спостерігається підвищена пластичність асфальтобетонного покриття. Тому для оцінювання стійкості дорожнього одягу на пластичне течення виникає необхідність використовувати методи і визначальні співвідношення математичної теорії пластичності.

Ця робота є першою спробою таких досліджень, направлених на більш різнобічну оцінку роботи дорожнього покриття. Отримані результати можна використати під час визначення несучої спроможності шару асфальтобетону на пластичне течення в літній період на ділянках інтенсивного гальмування автомобілів або руху по схилу.

Розглянено деформації асфальтобетону під час стискаючих навантажень.

### Аналіз останніх досліджень та публікацій

Характер деформування циліндричного зразка асфальтобетону під час стискання показано на рис. 1 [1]. Коли напруження на діаграмі досягають певної величини (границі текучості матеріалу  $\sigma_s$ ) точка А, то виникають пластичні деформації. Якщо напруження менше від границі текучості (точка В на діаграмі стиску), то матеріал здеформований пружно, а якщо більше (точка С) – пружно-пластичне.

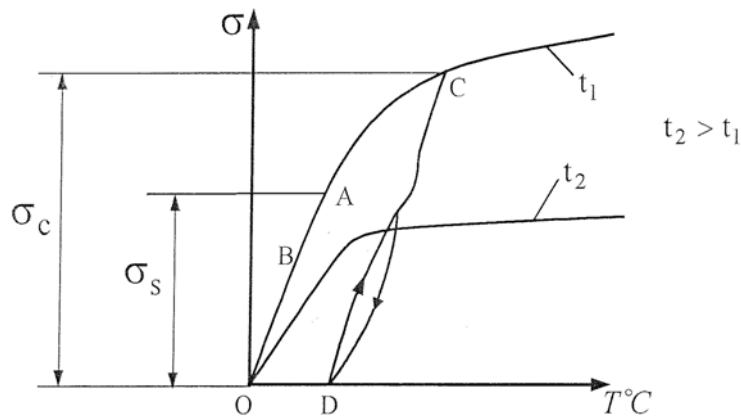


Рис. 1. Характеристика деформацій циліндричного зразка асфальтобетону під час стискування

Якщо для пружно-пластично деформованого зразка навантаження зменшувати, то крива розвантаження СД взагалі близька до прямої лінії, остання має такий самий нахил, як і лінія пружної ділянки; величина залишкової (пластичної) деформації вимірюється відрізком ОД. На вид кривої деформування асфальтобетону впливає температура. Із збільшенням температури границя текучості зменшується, а характер діаграми стиску набуває вигляду такого, як для ідеально пластичного матеріалу (рис. 1). Дослідження показують, що асфальтобетон стає ідеально пластичним за температур  $t_2 \approx 50^\circ\text{C}$ .

#### Мета та задачі досліджень

Для визначення напружено-деформованого стану шару асфальтобетону під колесами автомобіля розглянемо задачу Прандтля про стискування пластичного шару між паралельними жорсткими плитами (рис. 2).

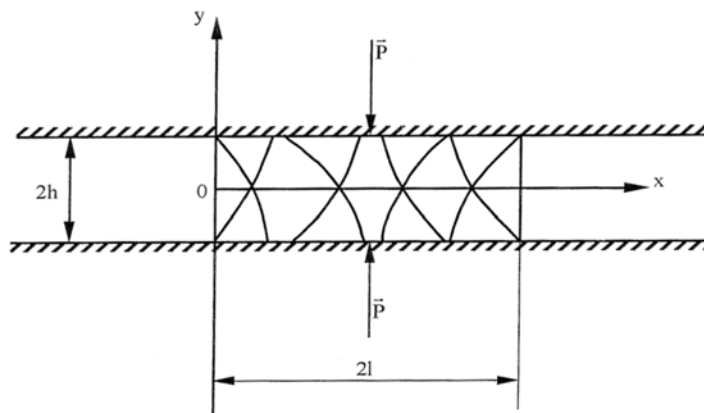


Рис. 2. Схема стискування пластичного шару асфальтобетону між паралельними жорсткими плитами

Представимо шар завтовшки  $2h$  завширшки  $2l$  (коли  $l > h$ ), стиснутий між двома жорсткими і жорсткими плитами силою  $\bar{P}$ .

Допустимо, що плити настільки жорсткі, що інтенсивність сил тертя на площинах контакту дорівнює максимально можливому напруженню тертя, тобто границі текучості в разі зсуву  $t_{max} = t_s$ . Матеріал шару – це ідеально пластичне тіло, яке знаходиться в умовах плоскої деформації. Осі координат  $x, y$  відносно яких відбувається переміщення частинок тіла, вибираємо з початком у середині лівого торця шару (рис. 2).

Якщо середовище між плитами знаходиться в стані ідеальної пластичності, то пластичний шар витискається в боки і тече від середини до країв по лінії ковзання. Лінії ковзання – лінії, що дотикаються всіма своїми точками площадок максимальних дотичних напружень. Коли перебігає процес пластичного деформування, ці дотичні напруження досягають максимального значення  $t_s$ .

Використовуючи цю умову текучості разом з рівнянням рівноваги, Прандтль вперше отримав їх розв'язок, який визначає напружений стан шару матеріалу між плитами [2]. Не наводячи виразів з визначення всіх компонент тензора напружень, запишемо рівняння закону зміни тиску на контактній поверхні [2]:

$$t_{yy} = -t_s \left( \frac{p}{2} + \frac{x}{h} \right) \quad (1)$$

Граничне значення зусилля  $P$ , яке приводить у пластичний стан шар між плитами, знаходять простим підрахунком:

$$P = 2 \int_0^1 |s_{yy}| dx = -t_s 1 \left( p + \frac{1x}{h} \right) \quad (2)$$

### Експериментальні дослідження

Зсув і стиск тонкого шару. Істотний вплив на пластичне розповзання шару виявляє наявність зусилля  $Q$ , що зсуває плити (рис. 3).

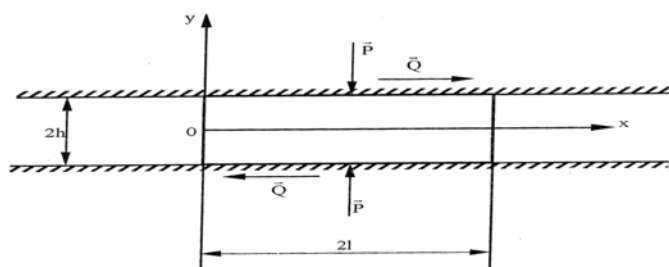


Рис. 3. Схема зсуву і стиску тонкого шару асфальтобетону

Не зупиняючись на знаходженні напруженого стану шару матеріалу під час такого навантаження, запишемо отриману умову граничної рівноваги:

$$\left( 1 - \frac{Q}{2t_s 1} \right) \left[ \frac{P}{t_s 1} - \left( 1 - \frac{Q}{2t_s 1} \right) \frac{1}{h} \right] = \frac{P}{2} + 2 \left( 1 - \frac{Q}{t_s 1} \right) \sqrt{\frac{Q}{2t_s 1} \left( 1 - \frac{Q}{2t_s 1} \right) - \arcsin \left( \frac{Q}{t_s 1} - 1 \right)} \quad (3)$$

Аналіз цієї формули показує, що прикладання до стискаючого навантаження зсуваючої сили значно зменшує несучу здатність шару.

Оцінка несучої спроможності шару асфальтобетону на пластичне течення. Використаємо формули (2) і (3) для оцінки несучої спроможності шару асфальтобетонного покриття за різних температурних і силових умов. Схема передачі зусиль від колеса на дорожнє покриття в разі вільного і гальмівного режиму руху колеса показано на рис. 4.

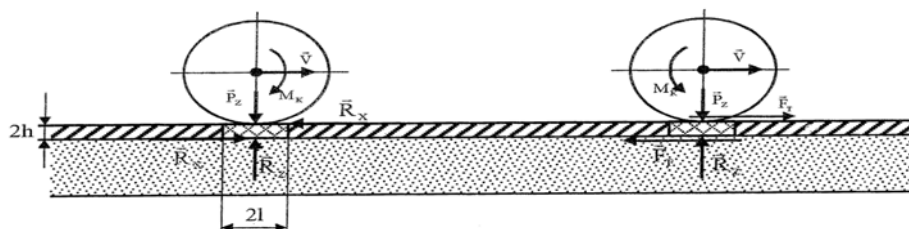


Рис. 4. Схема передачі зусиль від колеса на дорожнє покриття в разі вільного і гальмівного режиму руху

Для важких автомобілів з навантаженням на дорогу від колеса  $P_z = 7,5 \times 10^4 \text{ Н}$ , довжина опорної площадки дорівнює:  $2l = 300 \text{ мм}$  [4]. Розрахована на міцність еквівалентна товщина шару асфальтобетону, який забезпечує проїзд очікуваного потоку автомобілів становить:  $2h = 120 \text{ мм}$ . Для такого покриття використовується асфальтобетон, у якого  $\sigma_s = 1,6 \text{ МПа}$  за  $t = 20^\circ \text{C}$  [1]. Врахуємо, що в режимі гальмування колеса, коефіцієнт зчеплення шини з поверхнею  $\phi = 0,8$  [4].

У разі вільного режиму кочення колеса (рис. 4, а) можна знехтувати величиною зсуваючої сили  $R_x$  порівняно з  $P_z$ . Знайдемо граничне значення навантаження на дорогу  $[P_{z,гр}]t_1$ , за  $t_1 = 20^\circ\text{C}$ , яке забезпечує стійкість шару асфальтобетону на пластичне течення. Оскільки, згідно з теорією пластичності  $\tau_s = \frac{\sigma_s}{2} = 0,8 \cdot 10^6$  Па, то на основі формули (2), отримаємо:  $[P_{z,гр}]t_1 = 6,77 \cdot 10^5 \text{H}$ .

Очевидно, що за цієї температури і такого режиму руху колеса забезпечується несуча здатність шару на пластичне течення  $[P_{z,гр}]t_1 > P_z$ .

Аналогічно зробимо розрахунки за температури  $t_2 = 50^\circ\text{C}$ . Оскільки за цієї температури  $\tau_s = 0,23$  МПа, [1], то згідно з (2) знайдемо  $[P_{z,гр}]t_2 = 1,9 \cdot 10^5 \text{H}$ .

Отже, несуча спроможність шару за цієї температури також забезпечена  $[P_{z,гр}]t_2 > P_z$ .

Тепер виконаємо перевірку стійкості шару асфальтобетону на пластичне течіння на основі рівняння (3) для гальмівного режиму руху колеса (рис. 4, б). Враховуючи, що гальмівна сила  $F_T = P_z \cdot \phi = Q = 6,0 \cdot 10^4 \text{H}$ , за температури  $t = 20^\circ\text{C}$  маємо:

$$[P_{z,гр}^\phi]t_1 = 6,3 \cdot 10^5 \cdot H, [P_{z,гр}^\phi]t_1 > P_z \quad (4)$$

Як видно з результату підрахунків у цьому випадку несуча спроможність шару забезпечена.

Відповідно за температури  $t_2 = 50^\circ\text{C}$ , знаходимо

$$[P_{z,гр}^\phi]t_2 = 7,5 \cdot 10^4 \cdot H, [P_{z,гр}^\phi]t_2 = P_z \quad (5)$$

Тобто, за  $t_2$  навантаження на дорожнє полотно від колеса автомобіля досягло свого граничного значення. Верхній шар асфальтобетону знаходиться на межі несучої спроможності на пластичне течення. На ділянці дороги, де відбувається інтенсивне гальмування автомобілів або рух по схилу, може виникати пластичне течення верхнього шару асфальтобетону. В результаті цього відбувається поступове нагромадження незворотної деформації видовження, яка приводить до появи хвиль на асфальтобетонному покритті. Отже, умова граничної рівноваги (3) дає змогу оцінити несучу спроможність покриття проти хвилеутворення.

Тому для підвищення довговічності дорожнього одягу на деяких ділянках дороги необхідно проектувати асфальтобетон з урахуванням можливої втрати несучої здатності на пластичне течення.

Верхній шар асфальтобетону, що знаходиться між колесами автомобіля і основою дорожнього одягу, який підлягає навантаженню в умовах плоскої деформації. Напружено-деформівний стан шару асфальтобетону під колесами автомобіля визначається силою  $P_z$ . Граничне значення зусилля  $P_z$ , яке приводить у пластичний стан шар асфальтобетону під колесами автомобіля, знаходять з рівності

$$P_z = -\tau_s \left( \frac{\pi}{2} + \frac{l}{h} \right), \quad (6)$$

де  $\tau_s$  – границя текучості асфальтобетону при зсуві;  $2l$  – довжина опорної площини колеса;  $2h$  – товщина шару покриття.

Суттєво впливає на пластичне розповзання шару гальмівна сила  $F_T$ , яка досягає значень співмірних з нормальним навантаженням за гальмівного режиму руху колеса. Величина гальмівної сили під час гальмування автомобіля для окремого колеса визначається за формулою  $F_T = j P_z$ , де  $\phi$  – коефіцієнт зчеплення колеса з опорною поверхнею.

Механічна модель процесу взаємодії загальмованого колеса з дорожньою поверхнею розглядається як зсув і стиск ідеально-пластичного тонкого шару між паралельними жорсткими плитами [4]. У межах сформульованої моделі запропонована така формула для оцінювання несучої здатності шару асфальтобетонного покриття на ділянках інтенсивного гальмування автомобільних потоків:

$$\left( 1 - \frac{F_T}{2\tau_s l} \right) \left[ \frac{P_z}{\tau_s l} - \left( 1 - \frac{F_T}{2\tau_s l} \right) \frac{l}{h} \right] = \frac{\pi}{2} + 2 \left( 1 + \frac{F_T}{\tau_s l} \right) \sqrt{\frac{F_T}{2\tau_s l} \left( 1 - \frac{F_T}{2\tau_s l} \right) - \arcsin \left( \frac{F_T}{\tau_s l} - 1 \right)}. \quad (7)$$

Аналіз цього рівняння показує, що прикладання нормального навантаження до дорожнього полотна разом з гальмівною силою значно зменшує несучу спроможність шару асфальтобетону.

Співвідношення (1) і (2) використовуються для оцінки стійкості дорожнього одягу проти пластичного течення за різних температурних і силових умов.

Наведені підрахунки показали, що в умовах слабкого силового навантаження забезпечується несуча спроможність шару асфальтобетону в температурному діапазоні  $t = (20^\circ\text{C}; 50^\circ\text{C})$ . Проте під час гальмівного режиму руху колеса за  $t = 50^\circ\text{C}$  відбувається втрата стійкості дорожнього одягу

проти пластичного течення. Це означає, що на цій ділянці дороги в літню спеку під час гальмування автомобілів відбувається плин верхнього шару асфальтобетону, в результаті чого виникає поступове нагромадження пластичної деформації видовження, (рис. 5).

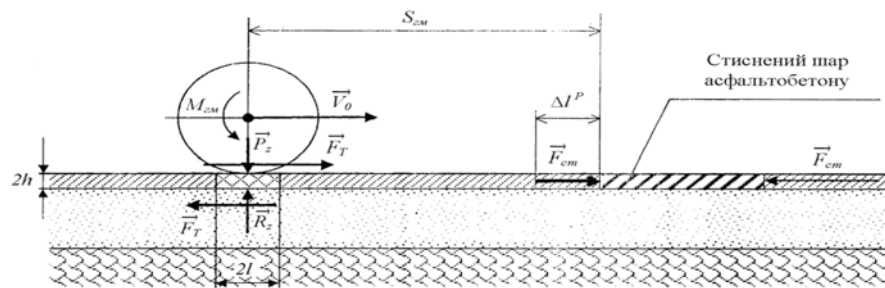


Рис. 5. Схема незворотного пластичного видовження верхнього шару асфальтобетону під час інтенсивного гальмування автомобілів

На ділянці дороги інтенсивного гальмування автомобілів, що дорівнює, приблизно, довжині гальмівного шляху  $S_{ГМ}$ , після проїзду  $k$ -го автомобіля відбувається незворотне видовження шару асфальтобетону на величину  $Dl_k^p$ . Відповідно, після проїзду з гальмуванням  $n$  автомобілів повне пластичне видовження верхнього шару ділянки асфальтобетону, на якій втрачена несуча здатність на пластичне течення, дорівнює: (рис. 5).

$$Dl^p = \sum_{k=1}^n Dl_k^p \quad (8)$$

Тому прилегла ділянка дорожнього одягу до гальмівної ділянки перебуває в стисненому стані під дією стискаючої сили  $F_{ст}$ . (рис. 5). За деякого граничного значення цієї сили відбувається втрата стійкості цього шару і він випучується (рис. 6).

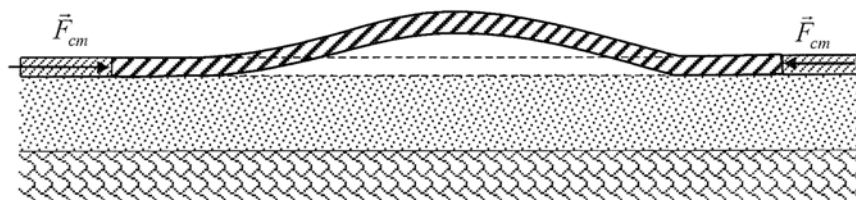


Рис. 6. Втрата стійкості та випучування верхнього шару асфальтобетону

### Висновки

1. За температури  $\approx 50^\circ\text{C}$  дорожнє полотно від навантаження колеса автомобіля досягло свого пластичного значення, верхній шар асфальтобетону знаходиться на межі втрати несучої спроможності.
2. Запропонована модель силової взаємодії колеса з дорожньою поверхнею дає змогу провести оцінку несучої спроможності покриття проти хвилеутворення. Тому для підвищення міцності і довговічності дорожнього одягу на ділянках інтенсивного гальмування або руху по схилу необхідно проектувати асфальтобетон з урахуванням можливої втрати несучої спроможності на пластичне течення.
3. Подальше охолодження дорожньої поверхні не приводить до зникнення випучених областей, а проїзд по них важких автомобілів викликає поступове руйнування дорожнього одягу.

1. Бабков В.Ф., Андреев О.В. Проектирование автомобильных дорог. – Ч. 1,2. – М.: Транспорт, 1987. – 368 с. 2. Смирнов Г.А. Теория движения колесных машин. – М.: Машиностроение, 1990. – 352 с. 3. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. – М.: Машиностроение, 1975. – 400 с. 4. Качанов Л.М. Основы теории пластичности. – М.: Наука, 1969. – 420 с. 5. Грушко И.М., Королев И.В., Борщ И.М., Мищенко Г.М. Дорожно-строительные материалы. – М.: Транспорт, 1991. – 357 с.