

УДК 625.7/8

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИЖИВЛЕННЯ ТОНКИХ ШАРІВ ЗНОСУ ДО ДОРОЖНІХ ПОКРИТТІВ

Доктор технічних наук Павлюк Д.О.,  
Глуховеря В.М.

*В статті наведені результати дослідження приживлення тонких шарів зносу при різних умовах їх виготовлення та випробування.*

*In the article results of research are shown of stability a surfacing Seals under different conditions of manufacturing and tests.*

**Постановка проблеми.** Згідно з діючими в Україні нормами [1] роботи з поточного ремонту дорожніх покриттів передбачають влаштування поверхневих обробок та інших шарів зносу для підвищення шорсткості, поліпшення рівності покриттів і вирівнювання поперечного профілю або влаштування тонкошарових покриттів з емульсійно-мінеральних та асфальтобетонних сумішей поверх існуючих дорожніх одягів. Такі шари — тонкі шари зносу (ТШЗ) — повинні достатньо економно відновити шорсткість, рівність покриття і при цьому усунути дефекти та ізолювати нижні шари від агресивної дії води. Насправді, після влаштування, часто виникає проблема передчасного руйнування ТШЗ: шар не приживлюється до покриття, і в перші дні експлуатації відривається під дією коліс автотранспорту. При цьому на поверхні покриття з'являються «лісі» плями, велика кількість зайвого матеріалу, знижується шорсткість.

**Аналіз попередніх досліджень.** З метою оцінювання приживлення ТШЗ заздалегідь, до влаштування шару, в НТУ був розроблений пристрій «ЦП-НТУ» [2, 3, 4, 5]. Пристрій виконаний у вигляді горизонтальної центрифуги в контейнері якої поміщають металеві пластини з нанесеним ТШЗ. Методика застосування пристрою «ЦП-НТУ» передбачає виготовлення зразків відповідно до технології влаштування ТШЗ, витримування їх у відповідних температурно-вологісних умовах та випробування під дією зусиль, які призводять до відриву зерен кам'яного матеріалу.

На сьогодні виникла необхідність проведення досліджень щодо отримання закономірностей зміни кількості матеріалу ТШЗ в часі під час випробувань за допомогою пристрою «ЦП-НТУ».

Для рішення поставленої задачі вважатимемо, що ТШЗ являє собою систему з об'єднаних в одне ціле одиничних елементів, які утворюють шорстку поверхню, а оцінка приживлення всього шару характеризується приживленням кожного з цих елементів. Кількісно приживлення ТШЗ за час його роботи  $t$  оцінюємо за наступним показником:

$$P(t) = \frac{N(t)}{N_0} 100\%. \quad (1)$$

де  $N_0$  — початкова кількість одиничних елементів ТШЗ, шт.;

$N(t)$  — кількість одиничних елементів ТШЗ, що залишилися на момент часу  $t$ .

В процесі експлуатації кожен одиничний елемент ТШЗ піддається короткочасній ( $\sim 0,1$  с) багаторазовій дії коліс транспортних засобів в різних режимах руху. При цьому виникають нормальні та дотичні зусилля. Кожен наїзд транспортного засобу призводить до розривів та послідуєного відновлення зв'язків між одиничними елементами ТШЗ та покриттям. За рахунок невідповідності інтенсивності розриву та відновлення відбувається остаточне руйнування зв'язків та повний відрив. Якщо виключити процес відновлення зв'язків і провести випробування одним тривалим навантаженням є можливість за короткий строк провести оцінювання приживлення ТШЗ та отримати залежності втрати приживлення з часом.

Розглянемо деяку обмежену площу ТШЗ. На ній знаходиться  $N$  одиничних елементів, що піддаються зовнішнім впливам в однорідних за часом умовах. В процесі роботи відбувається їх відрив. Даний процес носить випадковий характер, але відомо, що кількість елементів постійно зменшується з часом. Дослідимо закон  $N=N(t)$  зменшення загальної кількості цих елементів.

Нехай за малий проміжок часу  $dt$  кількість одиничних елементів  $N(t)$ , що втрималися від відриву, змінилася на  $dN > 0$ . Тоді швидкість зменшення загальної кількості одиничних елементів ТШЗ в кожний момент часу пропорційна кількості елементів, що не відірвалися:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda(t) \cdot N(t), \quad (2)$$

де  $\lambda(t)$  — коефіцієнт пропорційності або ймовірність відриву елемента ТШЗ за час  $dt$ .

Після розділення змінних в (2) отримаємо:

$$\frac{dN}{N(t)} = -\lambda(t)dt. \quad (3)$$

Після інтегрування отримаємо:

$$\ln N(t) + C_0 = -\int \lambda(t)dt. \quad (4)$$

Після введення позначення

$$C_0 = -\ln C, \quad (5)$$

отримаємо

$$N(t) = Ce^{-\int \lambda(t)dt}. \quad (6)$$

Фізичний зміст сталої  $C$  знайдемо з умови:  $N(0) = N_0$ ,  $C = N_0$ . Тоді (6) матиме вигляд:

$$N(t) = N_0 e^{-\int \lambda(t)dt}. \quad (7)$$

Вираз (8) являє собою закономірність втрати приживлення в процесі роботи ТШЗ. Подібним чином отримано закон радіоактивного розпаду та залежність коефіцієнта зчеплення колеса автомобіля з дорожнім покриттям [6].

Для знаходження величини  $\lambda(t)$  скористаємось положеннями теорії надійності. Згідно з [7] ймовірність безвідмовної роботи

$$R(t) = e^{-\int \lambda(t)dt}, \quad (8)$$

де  $\lambda(t)$  — ймовірність того, що елемент, який пропрацював без відмови (відриву) до моменту часу  $t$ , відмовить в наступний момент часу. Інакше кажучи  $\lambda(t)$  — це ймовірність відриву одиничних елементів ТШЗ. З огляду на це запишемо (8) у вигляді

$$N(t) = N_0 \cdot R(t). \quad (9)$$

Поведінку ТШЗ з точки зору ймовірності відриву одиничних елементів можна представити у наступному вигляді. В початковий період експлуатації ТШЗ, коли виявляються і видаляються всі дефектні одиничні елементи, ймовірність відриву змінна  $\lambda(t) \neq const$ . Саме тут виявляються невдалі спроби влаштування ТШЗ. В період нормальної експлуатації ймовірність відриву стала  $\lambda(t) = const$ , природа їх носить раптовий характер і не залежить від часу. В період старіння і зносу ТШЗ, коли має місце процес розвитку деградації, ймовірність відриву змінна  $\lambda(t) \neq const$  і збільшується з часом. У випадку невдалого влаштування початковий період експлуатації одразу переходить у період розвитку деградації ТШЗ. Загальний вигляд функції  $R(t)$  при різній ймовірності відриву наведений в табл. 1.

Функція безвідмовної роботи ТШЗ при різній ймовірності відриву

| Характер зміни ймовірності відмови в часі | Стала                          | Лінійна  | Степенева   |
|---|--------------------------------|--|---|
|   | $\lambda(t) = \lambda = const$ | $\lambda(t) = \frac{t}{\gamma^2}$                        | $\lambda(t) = \frac{\alpha}{\beta} t^{\alpha-1}$  |
| Функція безвідмовної роботи               | $R(t) = e^{-\lambda t}$        | $R(t) = e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t}{\gamma}\right)^2}$ | $R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha}$ |

За результатами експериментальних даних будемо підбирати теоретичний закон розподілу часу відриву кожного одиничного елемента та відповідну функцію безвідмовної роботи. Мірою узгодження теоретичного розподілу з експериментальним взяті критерії Колмогорова-Смірнова та Пірсона [8]. Залежність втрати приживлення з часом будемо отримувати шляхом підстановки функції  $R(t)$  в (9). Достовірність апроксимації оцінимо за коефіцієнтом детермінації  $R^2$  [9].

При випробуваннях за допомогою пристрою «ЦП-НТУ» до ТШЗ прикладаються зусилля відриву:

$$\sigma = \frac{m \cdot a_n}{S_m}, \quad (10)$$

де  $m$  та  $S_m$  — маса та фактична площа контакту з покриттям одиничного елемента ТШЗ, до якого прикладається зусилля відриву;

$a_n$  — нормальне прискорення в центрифуговому силовому полі пристрою «ЦП-НТУ», 2882 м/с<sup>2</sup>.

Крім нормальних зусиль, за рахунок неправильної форми зерна при відриві, виникають дотичні зусилля. Вважаємо їх вплив на результати незначним.

Маса та площа контакту одиничного елемента пов'язана з розміром та формою зерна крупного заповнювача для ТШЗ. Для створення однакових умов при виготовленні випробувальних зразків відношення  $m/S$  для всіх зерен повинно бути однаковим. Враховуючи, що оцінити фактичну площу контакту важко, для аналізу взято контурну площу контакту, вважаючи, що між даними площами є сталі співвідношення.

Для виготовлення випробувальних зразків був взятий кубовидний гранітний щебінь залишок з сита 12,5 мм для першого експерименту та 15 мм — для другого. В результаті аналізу встановлено, що розподіл значень  $m/S$  для проб відібраного щебеню підкоряється нормальному закону: середнє значення для щебеню 12,5 мм складає 1,79 г/м<sup>2</sup> ( $K_g=20\%$ ), для 15 мм — 2,43 г/м<sup>2</sup> ( $K_g=18,9\%$ ). Для першого експерименту взятий бітум БНД 90/130, для другого — БНД 90/130 + 1,3% «Elvaloy».

Порядок виготовлення зразків передбачав нагрів в'язучого до робочої температури  $T_p$ , розподіл в заданій кількості на металеві пластини та вкладання щебеню в шар в'язучого. Для занурення щебеню у в'язуче зразки витримували при температурі  $T_p$  протягом 20 хв. Потім зразки витримували 1 год. на повітрі при температурі 22°C та 1 добу у воді 20...21°C (рис.1-2).

Після витримання, зразки поміщали в пристрій «ЦП-НТУ» та випробовували з фіксацією часу життя (часу відриву)  $\phi$  кожного зерна до повного руйнування ТШЗ.

В першому експерименті було випробувано дві серії зразків. Витрати в'язучого 1,0 л/м<sup>2</sup>. Першу серію випробували без зупинки випробування. Другу серію випробували із зупинкою після спливання часу 180 с., після чого зроблена пауза 3 хв. і продовжено випробування. При цьому загальний час відриву визначений як 180 с. плюс час відриву після другого запуску. На рис.3 зображені закономірності зміни приживлення для обох випадків. Характерною особливістю даної залежності для другої серії зразків є відновлення структури ТШЗ та збільшення середнього часу життя одиничних елементів ТШЗ.

Планом другого експерименту було передбачено виготовлення трьох серій зразків з витратами бітуму 0,80, 1,20 та 1,50 л/м<sup>2</sup>. Результати експериментів наведені на рис.4, а приклад статистичної обробки серії 1 — на рис.5.

Після підбору закону розподілу знайдений вигляд функції безвідмовної роботи  $R(t)$  для кожної випробувальної серії (рис.6) та рівняння апроксимуючої функції за (9). Результати наведені в табл.2 та на рис.7.



Рис. 1. Зовнішній вигляд випробувальних зразків для першого експерименту  $T_p=185^\circ\text{C}$



Рис. 2. Зовнішній вигляд випробувальних зразків для другого експерименту  $T_p=155^\circ\text{C}$

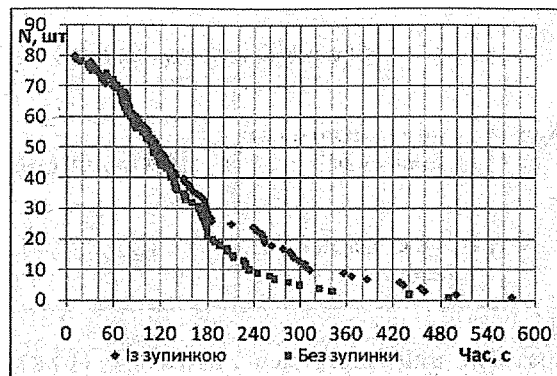


Рис. 3. Результати першого експерименту

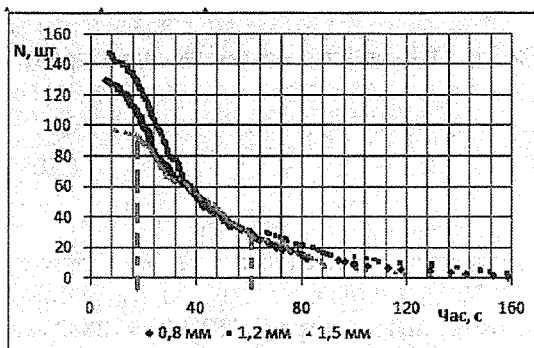


Рис. 4. Результати другого експерименту

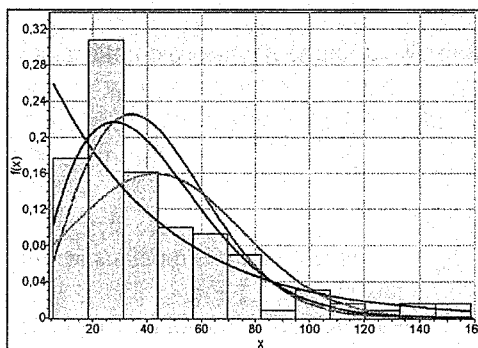


Рис. 5. Статистична обробка результатів експерименту

Таблиця 2

Результати підбору апроксимуючої функції

| Серія                                 | 1  | 2  | 3  |
|---------------------------------------|--|--|--|
| Рівняння апроксимуючої функції $N(t)$ | $130 \cdot \exp\left[-\left(\frac{t}{46,166}\right)^{1,7234}\right]$ | $148 \cdot \exp\left[-\left(\frac{t}{48,171}\right)^{1,7378}\right]$ | $98 \cdot \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t}{40,02}\right)^2\right]$ |
| Достовірність апроксимації $R^2$      | 0,99   | 0,96   | 0,99   |

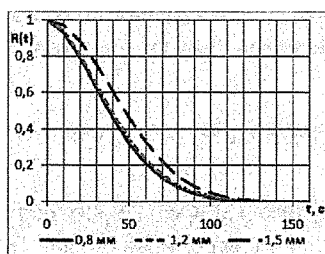
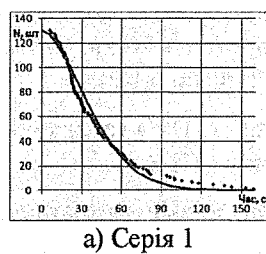
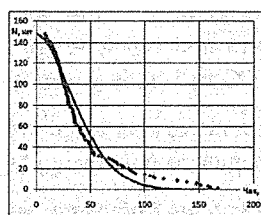


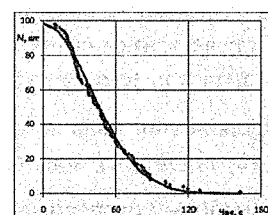
Рис. 6. Графіки функцій  $R(t)$



а) Серія 1



б) Серія 2



в) Серія 3

Рис. 7. Графіки апроксимуючих функцій

З огляду на результати другого експерименту можна сказати, що при зміні товщини шару бітуму від 0,7 до 1,5 мм середнє вибіркоче значення часу життя  $\tau_{cp}$  одиничних елементів ТШЗ зростає з 41 до 50 с, а показник приживлення за (1) при тривалості випробувань 60 с зростає з 22 до 30%.

Висновки.

1. В період випробувань, коли навантаження з ТШЗ знято, в ньому відновлюються структурні зв'язки, що призводить до збільшення середнього часу життя одиничних елементів ТШЗ.

2. Розвиток процесу відриву ТШЗ можна розділити на три етапи (рис.4): початковий, коли інтенсивність відриву наростає, проміжний, коли інтенсивність є сталою, та кінцевий, коли інтенсивність поступово зменшується.

3. Зміна приживлення ТШЗ відбувається за залежністю, характер якої можна описати функцією безвідмовної роботи за розподілом Вейбула. Отримані емпіричні залежності зміни приживлення з часом мають високу достовірність апроксимації експериментальних даних.

4. За результатами аналізу залежності зміни приживлення ТШЗ є можливість створити оптимальні умови виготовлення випробувальних зразків з найвищим показником приживлення а з тим, оптимізувати технологічні параметри улаштування даного шару на дорозі.

### Література

1. ВБН Г.1-218-182:2006 Класифікація робіт з ремонтів автомобільних доріг загального користування Укравтодор 2006 — 11 с.
2. Павлюк Д.О., Іваненко А.П., Глуховеря В.М., Русин Р.М. Дослідна експлуатація пристрою для оцінки адгезійних властивостей в'язучих та кам'яних матеріалів. // Автошляховик України. — 2006, № 5, С. 36-38.
3. Глуховеря В.М. Оцінка зчеплення кам'яного матеріалу з органічним в'язучим — шлях підвищення якості тонких шарів зносу дорожніх покриттів // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. Науково-технічний збірник. — К.:НТУ, 2008. — Випуск 75. — С. 91-94
4. Павлюк Д.О., Іващенко А.П., Глуховеря В.М. До атестації пристрою для оцінки адгезійних властивостей в'язучих та кам'яних матеріалів. // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. Науково-технічний збірник. — К.: НТУ, 2009. — Випуск 76. — С. 45-49
5. Павлюк Д.А., Глуховеря В.М. Исследование приживаемости каменного материала для тонких слоев износа дорожных покрытий // Материалы международной научно-практической конференции «Перспективные направления проектирования, строительства и эксплуатации дорог, мостов и подземных сооружений» — Минск: БНТУ, 2010 — С. 155-159
6. Павлюк Д.О. Основи і застосування теорії зчпних якостей дорожніх покриттів: Дис... докт. техн. наук: 05.22.11. — К.: УТУ, 1996 — 480 с.
7. Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. Математические методы в теории надежности — М., 1965 — 524 с.
8. Минцер О.П., Угаров Б.Н., Власов В.В. Методы обработки медицинской информации. — К.: Вища школа, 1982 р. — 160 с.
9. Красовский Г.И., Филаретов Г.Ф. Планирование эксперимента — Минск: Изд. БГУ, 1982 — 302 с.

УДК 625.72

## ЗАСТОСУВАННЯ ЛЕМНІСКАТИ ПРИ ПРОЕКТУВАННІ АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ

Кандидат технічних наук Пальчик А.М.,  
Білик А.В.

*В даній статті наведені переваги застосування лемніскати при проектуванні автомобільних доріг.*

*This article highlights the advantages of using the lemniscate in the design of roads.*

**Постановка проблеми.** Значний зріст інтенсивності й швидкості руху на автомобільних дорогах викликав збільшення дорожньо-транспортних подій, причому в деяких випадках причиною виникнення ДТП були малі радіуси заокруглень автомобільних доріг та невдало запроектоване заокруглення дороги.

Також зі збільшенням інтенсивності руху на автомобільних дорогах виникає і необхідність проведення реконструкції доріг, проектування розв'язок у різних рівнях та заміни горизонтальних кривих. В даній статті пропонується до розгляду використання лемніскати Бернуллі в якості перехідної кривої при проектуванні з'їздів та перетинів автомобільних доріг, зокрема при проектуванні з'їздів на примиканнях і перехрещеннях в одному рівні та при проектуванні дорожніх розв'язок у різних рівнях. Це, в свою чергу, надасть змогу покращити умови руху автомобілів на з'їздах, а також зменшити вартість будівництва розв'язки.