

УДК 625.7/.8

Гамеляк І. П.¹, д-р техн. наук, проф., <https://orcid.org/0000-0001-9246-7561>Райковський В. Ф.², канд. техн. наук, <https://orcid.org/0000-0002-6391-7647>¹Національний транспортний університет (НТУ), м. Київ, Україна²Державне підприємство «Національний інститут розвитку інфраструктури» (ДП «НІРІ»), м. Київ, Україна

КОМПЛЕКСНЕ ОЦІНЮВАННЯ СТАНУ ДОРОЖНЬОГО ПОКРИВУ

Анотація

Вступ. У цій статті розглядається питання огляду існуючих методів і підходів до оцінювання стану дорожнього покриття та запропоновано методику оцінювання стану дорожнього покриття за допомогою комплексного показника. За цим показником виконують аналізування дефектів і руйнувань дорожнього покриття визначених візуальним методом.

Проблематика. Потреба удосконалення методики оцінювання стану дорожнього покриття (жорсткого, нежорсткого) із розрахування показника за допомогою якого проєктант чи балансоутримувач можуть оцінити стан наявного покриття.

Мета. Інформування фахівців дорожньої галузі з новими тенденціями та розробками у сфері обстеження та оцінювання стану дорожніх покриттів автомобільних доріг та аеродромів.

Матеріали і методи. У статті використано напрацювання ДП «НІРІ» (ДП «ДерждорНДІ»), Національного транспортного університету та діючі будівельні норми та стандарти України, матеріали закордонних нормативних документів і технічної літератури щодо оцінювання стану дорожнього покриття.

Висновки. За даними проведеного аналізу запропонована методика розрахунку комплексного коефіцієнта оцінювання стану дорожнього покриття з урахуванням міри його пошкодження, який можна використовувати, як додатковий інструмент для призначення виду ремонтних робіт.

Ключові слова: аеродромний покриття, деформація, дорожній покриття, оцінювання стану, руйнування, ступінь розвитку.

Огляд методу кількісного визначення дефектів і руйнувань дорожнього покриття за параметрами їх протяжності і ступеня розвитку

У більшості країн світу (понад 20) використовують різні типи переліків типів пошкоджень для нежорстких (з асфальтобетонним покриттям) і жорстких (із цементобетонним покриттям) дорожніх одягів, проте лише в половині із них є однакова класифікація для обох типів покриття. У **табл. 1** представлено перелік пошкоджень 1-ї та 2-ї пріоритетності і рівні, на яких їх збирають (дорожня мережа, окрема дорога) [1 – 10].

У **табл. 1** наведені також кількісні міри пошкоджень, представлені в одиницях [довжина / площа], [% довжини / площі] або в числовому вираженні в межах загальної протяжності ділянки покриття (звичайно 100 м). Вказані одиниці, що найбільш часто використовують для визначення довжини різноманітних типів пошкоджень, як для дорожньої мережі, так і для окремої дороги.

Методи оцінки параметра [% довжини / площі], як правило, пов'язані з його класифікацією. Існує 3 або 4 категорії, наприклад з такими граничними значеннями: < 10 %, 10-50 %, > 50 %. У цих випадках збір інформації виконують пішки або автомобілем при малій швидкості руху.

При візуальних обстеженнях на автомобілі з великою швидкістю найбільш придатними одиницями є [довжина / площа] або число. За звичай у цих випадках на рівні мережі оцінюють лише значні пошкодження, які часто зустрічаються.

Ступінь пошкодження у більшості країн Європи та Світу диференціюють переважно за 2 або 3 категоріями. Найбільш часті характеристики ступеня пошкодження показані в **табл. 1**. Границі між різними категоріями в межах одного пошкодження неоднакові в різних країнах.

БУДІВНИЦТВО ТА ЦИВІЛЬНА ІНЖЕНЕРІЯ

У деяких випадках застосовують ускладнені методи класифікації. Наприклад, у Франції застосовують метод, затверджений місцевою адміністрацією залежно від рівня експлуатації, різних категорій пошкоджень, таких, як просідання, колієутворення, розвиток тріщин тощо.

Таблиця 1

Перелік пошкоджень дорожнього одягу, згідно даних [1-10]

Ч.ч.	Пріоритетність збору даних	Вид пошкодження	Познака рівня оцінки	Познака типу пошкодження	Поширеність 1	Поширеність 2	Параметр оцінки пошкодження
Нежорсткий покрив							
1	1	Місцеві деформації	NP	PTA	% площі	кількість	Глибина
2	1	Вм'ятини	P	A	% площі	кількість	Глибина
3	1	Просідання	P	A	% площі	кількість	Глибина
4	1	Блочні тріщини	NP	LTA			
5	1	Повздовжні тріщини	NP	L	% довжини	довжина	Ширина розкр. + описання
6	1	Поперечні тріщини	NP	T	кількість		Ширина розкр. + описання
7	1	Сітка тріщин "Крокодилова шкіра"	NP	A	% довжини	довжина	Ширина розкр. + описання
8	1	Втрата матеріалу	NP	PLA			
9	1	Вибірки	NP	P	% довжини	кількість	Діаметр + кількість
10	1	Вивітрювання	P	A	% площі	площа	Рівень пошир.
11	1	Розшарування	P	A	% площі	площа	Рівень пошир.
12	1	Лущення	P	A	% площі	площа	Рівень пошир.
13	1	Місцевий ремонт	NP	A	% довжини	% площі	Рівень пошир.
14	1	Вижимання матер. основи	P	TA	% довжини		
15	1	Випотівання в'язучого	P	A	% площі		Описання
16	2	Утворення бокових хвиль	P	T	% довжини		Глибина
17	2	Утворення поперечних хвиль	P	T	% довжини	% площі	Глибина
18	2	Тріщини від втоми	NP	L	% довжини	довжина	Ширина розкр. + описання
19	2	Обламування кромки	NP	L	% довжини	довжина	Ширина розкр. + описання

Ч.ч.	Пріоритетність збору даних	Вид пошкодження	Познака рівня оцінки	Познака типу пошкодження	Поширеність 1	Поширеність 2	Параметр оцінки пошкодження
20	2	Тріщини біля стиків (повздовжні)	NP	L	% довжини	довжина	Ширина розкр. + описання
21	2	Відображені тріщини	NP	T	% довжини	кількість	Ширина розкр. + описання
22	2	Тріщини біля стиків (поперечні)	P	T	% довжини	кількість	Ширина розкр. + описання
23	2	Стирання	P	L	% площі		
24	2	Колійність	NP	L	% довжини	довжина	Середня глибина
Жорсткий покриття							
1	1	Обламування кутів	P	P	% площі		Рівень пошир.
2	1	Група тріщин	NP	LTA			
3	1	Повздовжні тріщини	NP	L	% довжини		Ширина розкр. + описання
4	1	Поперечні тріщини	NP	T	кількість		Ширина розкр. + описання
5	1	Місцевий ремонт	NP	A	% довжини		Рівень пошир.
6	1	Розмивання	P	T	% довжини		Описання
7	1	Лущення	P	A	% площі		Рівень пошир.
8	1	Пошкодження заповнювача шва	P	T	% довжини		Описання
9	1	Сколювання (викришування) стиків	P	T	% довжини		Описання
10	2	Здимання	P	A	% площі		
11	2	Діагональні тріщини	NP	A	% довжини		Ширина розкр. + описання
12	2	Тріщини від усадки	P	A	% площі		Ширина
13	2	Проломи	P	A	% площі		Глибина
14	2	Ступінчасте просідання	NP	T	% довжини		
15	2	Сколювання кромок	P	L	% довжини		Глибина
Примітки: Рівень оцінки: N – мережа, P – окрема дорога. Тип пошкодження: P – точка, T – поперечне, L – повздовжне, A – площа. Розмірність: площа в (м ²), довжина в (м). Параметри оцінки пошкодження: глибина, ширина або діаметр в (мм).							

Оцінювання покриття за допомогою комбінованого показника

У багатьох країнах використовують комбіновані показники для представлення результатів візуальних обстежень покриттів. Можливі декілька методів для обчислення цих показників: середнє значення, середньозважений показник, категорія (без обмеження кінцевої величини), виведення значення.

Середнє значення використовують головним чином для оцінювання однієї і тієї ж категорії пошкодження, наприклад тріщин, виявлених візуально (метод, який застосовується в Іспанії).

У деяких методах використовують **середньозважені показники**, де структурні пошкодження набувають, як правило, головної значимості внаслідок їхнього сильного впливу на залишковий строк служби (довговічність). Для осереднення приймають інтенсивність руху або категорію дороги. Чим вища категорія, тим більший коефіцієнт зваженого фактора. Деякі приклади наведені нижче:

p_i — коефіцієнт вагомості при пошкодженні типу I;

e_i — пошкодженість типу I;

s_i — ступінь пошкодження типу I.

В Угорщині застосовують такий показник середньозваженої величини:

$$Index = f(p_i e_i s_i). \quad (1)$$

Одержані з формули значення використовують найбільш часто.

У Швеції використовують глобальний показник (явного пошкодження покриття):

$$Index = 5 - f(p_i e_i s_i) / 10. \quad (2)$$

У Бельгії візуальний показник V :

$$V = V_{max} - f(p_i e_i). \quad (3)$$

Показники на основі середньозваженої величини або виведені формули звичайно застосовуються в методах, де міра пошкоджень виражена у відсотках % від довжини / площі.

Наступна за важливістю характеристика — це *категорія*, в якій значення кінцевої величини не обмежується, а нуль означає відсутність пошкодження. Це робить можливим неперервну класифікацію. Точки накопичуються зокрема для різних типів пошкодження. Цей тип показника використовують здебільшого в методах, де довжина пошкоджень виражається в одиницях довжини, площі або числом.

Автоматизований збір даних про пошкодження покриття

Згідно анкетного опитування встановлено, що в більшості країн використовують наступні типи збирання та оброблення інформації:

- візуальне збирання відомостей і ручне оброблення оператором;
- збирання характеристик (на рівні зображення) і їх ручне оброблення оператором;
- збирання характеристик (на рівні зображення) і напівавтоматизоване оброблення з участю оператора;
- автоматизоване збирання даних (на рівні зображення) і їх автоматичне оброблення.

Автоматизоване збирання даних переважно застосовують при аналізуванні таких пошкоджень, як тріщиноутворення, втрата матеріалу, випотівання в'язучого. Деформації покриття, як правило, вимірюють і обробляють датчиками.

Мета автоматизованих методів — замінити оператора при ідентифікації та кількісному визначенні різних типів пошкоджень. Заміна оператора доцільна під час безперервного оброблення інформації, ідентифікації розміру пошкоджень і способу представлення результатів (починаючи з точного вимальовування рисунку кожного індивідуального пошкодження до вирахування загального показника, який узагальнює усі пошкодження). Неоднакові цілі призводять до різних концепцій при розробленні систем і відмінностей в їх ефективності (ідентифіковані типи пошкоджень, точність, продуктивність тощо).

За результатами аналізу наявних автоматизованих систем збору даних виділено наступні 11, найбільш поширених автоматичних або напівавтоматичних систем, в які включена частина аналізування зображення:

- | | |
|--------------------|--|
| 1. Канада: | Дорожня Корпорація, WISECRAX |
| 2. Франція: | Середземноморське CETE, MACADAM |
| 3. Франція: | Нові технології |
| 4. Японія: | Nichireki |
| 5. Японія: | PASCO |
| 6. Швеція: | RST, система PAVUE |
| 7. Швейцарія: | IMAC, Федеральний Політехнічний інститут у Лозанні, CREHOS |
| 8. Великобританія: | Бірмінгемський Університет |
| 9. США: | Університет штату Огайо |
| 10. США: | Асоціація MHM, ARIA |
| 11. США: | Дорожник PCES |

За результатами аналізу можна зробити такі узагальнення.

Одержання зображення

Спосіб фіксування зображення. Три системи (відео, цифрова) фіксують зображення перервним засобом. Вісім інших систем збирають неперервне зображення дорожнього покриття.

Експлуатаційні умови. Для денного використання є 5 систем (відео). Три системи збирають зображення в нічний час при додатковому освітленні на плівці 35 мм. При додатковому освітленні в денний або нічний час можуть використовуватись 3 відео- або цифрові системи.

Робочі швидкості. Більшість транспортних засобів має робочі швидкості від 60 км/год до 90 км/год. Дві відео системи, функціонують із швидкістю — приблизно 50 км/год.

Діапазон зйомки. Практично всі системи можуть робити зйомку по меншій мірі однієї смуги руху. Багато систем охоплюють смугу шириною до 4,5 м, а одна до 4,8 м.

Підтримка зображення. У трьох системах використовують плівку 35 мм, у 6 — відео, одна з яких поєднується з ультразвуковими датчиками, ще одна з лазерами, одна система використовує цифрове зображення і одна є лазерною. Останні дві системи фактично не збирають зображення.

Оброблення зображення, як правило, виконують в офісі (9 систем) [11 – 18]. Дві системи розроблені для часткового оброблення безпосередньо на місці, дві системи — без фактичної реєстрації зображення для оброблення всіх даних У реальному часі за наступними параметрами:

Довжина покриття. Неперервний процес відомий у 9 випадках. У двох інших системах виконується перервна зйомка зображення.

Типи покриттів. Усі системи розроблені для обстеження асфальтобетонних покриттів. 9 із цих систем розраховані для обстеження як асфальтобетонних, так і цементобетонних покриттів, 2 системи ще не пристосовані для обстеження цементобетонних покриттів.

Ідентифікація об'єкта. Шість систем здатні виявляти об'єкти або форму покриття. Тільки 3 системи з 11 можуть ідентифікувати і правильно розпізнавати елементи розмітки.

Ідентифікація типів пошкоджень. Усі системи мають можливість ідентифікації одиночних тріщин і сітки тріщин типу «крокодилова шкіра». Мінімальна ширина розкриття тріщини складає: 1 мм у 5 системах, 2 мм — у 3 системах і 3 мм — у 2 системах.

Форма представлення даних. Приблизно половина систем (5) має багатократні формати для представлення даних, включаючи графіки, показники, таблиці або гістограми. Найбільш часто дані видаються у формі – розрахованих показників (9 систем), графіків (8 систем), після цього — таблиць і гістограм (6 систем).

Методи оброблення. В усіх системах для обчислення використовують різні алгоритми, без опису. 6 систем застосовують методи розпізнання образів, що є класичним інструментом для аналізування зображення. В одній системі використовують пам'ять, яка базується на експертній оцінці, а в іншій використовують — голографічний метод відображення.

Швидкість оброблення знаходиться в дуже широкому діапазоні — від 8 км/добу до 800 км/добу. Самі швидкісні системи звичайно використовують перервну обробку при швидкості 24 км/добу. За винятком критичних випадків, коли швидкість оброблення коливається від 30 км/добу до 100 км/добу.

Уніфікація підходу до візуальної оцінки стану покриття

У теперішній час активно проводять роботи з узгодження автоматизованих методів і результатів отримання даних про стан доріг. Дані, отримані на основі оброблення відеозображень, забезпечують кращу якість результатів, ніж традиційне візуальне оцінювання.

Найбільш часто всі дефекти диференціюють за типами дорожнього одягу:

- нежорсткий та напівжорсткий;
- жорсткий.

Типи можуть мати підтипи. Наприклад, для нежорсткого дорожнього одягу поряд з традиційним покритвом із щільного асфальтобетону можна віднести просочування щебеню, асфальтобетон пористий чи перервного зернового складу тощо. Дефекти таких покриттів досить подібні до пошкоджень асфальтобетону. Таке узагальнення значно спрощує порядок контролю і, вважається, запорукою відтворюваності результатів.

Класифікація типів дефектів поверхні покриттів складається з 4-х головних груп:

- група тріщин (6 типів для нежорстких і 5 – для жорстких дорожніх одягів);
- пошкодження і деформації (5 типів для нежорстких і 4 для жорстких дорожніх одягів);
- дефекти поверхні (3 типи для нежорстких і 3 для жорстких дорожніх одягів);
- дефекти стиків (швів) і кромки (2 типи для нежорстких і 4 для жорстких дорожніх одягів).

Рівні деталізації

Точність оцінки стану покриття змінюється від більш детальної до загальної:

- довжина, ширина, глибина, шаблон (pattern) чи форма, тип, місцезнаходження (оцінюють індивідуально);
- діапазон, частота появи, ступінь пошкодження, тип, місцезнаходження (оцінюють індивідуально);
- універсальний показник ступеня розвитку пошкоджень для кожного типу пошкоджень;
- універсальний показник для кожного типу пошкоджень (без встановлення ступеня розвитку пошкоджень);
- шкала (дискретні діапазони універсального показника);
- загальний об'єднаний показник.

Кожен тип чи група дефектів повинна мати свій рівень деталізації.

Розмірність пошкоджень

Величину поширення пошкоджень можна приймати як для дороги (ділянки дороги), так і для характерних секцій на які попередньо розділена дорога (чи ділянка). Одиниці розмірності приймають: довжина [м], область/площа руйнування [м²], ширина і глибина [мм] (в основному для більш детальних рівнів).

З практичної точки зору більше значення мають відносні пропорції пошкодження поверхні дорожнього покриття:

- відношення площі покриття з дефектами до загальної площі секції чи ділянки дороги [% площі];
- відношення довжини пошкоджень (коли розглядають пошкодження кромки чи дефекти швів стиків) до загальної довжини елементів [% довжини].

Таке відносне представлення кількості пошкоджень дає чітку уяву про ступінь деградації секції чи ділянки дороги.

Ступінь пошкодження

Деякі типи дефектів оцінюють за їхнім ступенем розвитку. Для цього використовують такі поняття як класи ступеня пошкодження, границі класів і показники ступеня пошкодження (рівня дефектності).

Пропонується 3 класи ступеня пошкодження для візуальної оцінки: низький, помірний та високий.

Границі між класами дозволяють виразити візуальну оцінку цифрою — показником ступеня пошкодження. Якщо показник ступеня пошкодження ≥ 1 , то це вказує на те, що клас ступеня пошкодження даного дефекту «високий», його подальший розвиток недопустимий і покрив потребує термінового ремонту. Єдиної точки зору між державами щодо границь класів поки що не досягнуто.

Методи оцінки пошкоджень

Пропонується 3 рівні деталізації під час виконанні обстежень. Основна відмінність між рівнями — мета візуального обстеження.

Рівень I — дослідницький. Найбільш детальні обстеження, які виконуються автоматизованим або спеціальним способом і дають кількісні результати з досить високою точністю. Визначають розміри (довжину, ширину, глибину, площу) окремих індивідуальних пошкоджень.

Рівень II — проєктний. Обстеження виконують автоматизовано або іншим способом. Оцінюють розміри (довжину, ширину, глибину, площу) окремих об'єднаних пошкоджень. Результати обстеження мають достатню точність для планування утримання дороги.

Рівень III — відноситься до мережі доріг. Обстеження виконують автоматизовано або з кабіни автомобіля на малій швидкості. Оцінюють пропорції (% довжини чи площі) і ступеня пошкодження типів дефектів. Результати обстеження придатні для оцінювання стану мережі доріг. На цьому рівні принципово важливим є встановлення типів дефектів для можливості аналізувати різні плани (стратегу ремонтів).

Інтелектуальний моніторинг та оцінювання стану дорожнього та аеродромного покриття

Для оцінювання стану покриття конкретної злітно-посадкової смуги, як правило, немає достатньо часу, оскільки роботи потрібно виконати між посадкою і злетом літака. дуже обмежений. Тому розробляються інтелектуальні системи моніторингу, які ретельно відстежують та надають інформацію про стан покриття, який піддається повторним навантаженням транспорту та / або екологічним / кліматичним чинникам, без необхідності закривати злітно-посадкову смугу / руліжну доріжку.

Останні досягнення в технологіях інтелектуального зондування включають: технології мікроелектромеханічного датчика (MEMS), наноелектромеханічного датчика (NEMS) і оптоволоконного датчика для оцінювання часток на покритті внаслідок руйнувань (FOS). У поєднанні з бездротовими сенсорними мережами та ефективними підходами споживання енергії за рахунок сонячних батарей вони надають можливості для тривалого, безперервного вимірювання реакції на навантаження в режимі реального часу та моніторингу стану аеродромного покриття в аеропортах.

Традиційні підходи до зондування та моніторингу стану з використанням дротових датчиків використовували для відстеження реакції покриття на навантаження навколишнього середовища та транспорту, включаючи температуру, вологість, деформацію, напругу, прогин тощо. Однак протягом останніх двадцяти п'яти років дослідження та проєкти в яких залучали традиційні дротові датчики повідомили про декілька недоліків використання цих систем, таких як потреба у високій щільності масиву, пошкодження дротів, висока вартість і час встановлення, низька живучість дротових датчиків для тривалої роботи тощо.

Концепція, яка лежить в основі створення «розумної» конструктивної системи, полягає у впровадженні в систему технологій зондування/приведення в дію, щоб повідомляти про реакцію конструкції в режимі реального часу на зовнішні сили, таким чином забезпечуючи краще розуміння поведінки конструкції та несної здатності на постійній основі. Інтелектуальні системи моніторингу стану покриття дозволяють у режимі реального часу безперервно контролювати зміни зовнішнього та внутрішнього стану конструкції та реагувати на ці зміни без втручання людини.

Попередні основні дослідження датчиків MEMS/NEMS для моніторингу покриттів включають «Smart Pebbles», «Smart Dust», датчики MEMS, здатні вимірювати температуру та вологість у

середині бетону, а в останні роки запропоновано «розумну систему моніторингу покривів» та «самопідтримуваний датчик виявлення пошкоджень» [19 – 22].

Подібним чином FOS є ще однією багатообіцяючою технологією інтелектуального зондування для моніторингу стану покривів в аеропортах. Волоконно-оптичний датчик може контролювати умови навколишнього середовища або передавати дані за допомогою оптоволоконного зв'язку, який модулює світловий промінь у волокні. Загалом волоконно-оптичні датчики мають невеликий розмір і вагу і можуть використовуватися у вибухонебезпечних і корозійних середовищах. Вони також можуть бути використані для забезпечення розподіленого зондування вздовж оптичного волокна. Теоретично можна виміряти сотні місць уздовж волокна довжиною лише один метр. Крім того, волоконно-оптичні датчики можна використовувати для вимірювання деформації, температури, вологості, рН тощо.

Дані у **табл. 2** і **табл. 3** підсумовують деякі сфери моніторингу стану автомобільних доріг, де були застосовані технології in-situ / вбудованого інтелектуального зондування (MEMS, NEMS, FOS тощо) з потенційною можливістю подальшого використання цих систем для моніторингу стану покриття в аеропорту.

Таблиця 2

Порівняння можливих застосувань для моніторингу стану асфальтобетонних (АС) покривів в аеропортах на основі інтелектуального датчика

Ч.ч.	Область застосування для асфальтобетонного покриття	Технологія інтелектуального зондування на місці
1	Деформація розтягування; втомне розтріскування	Бездротовий датчик з автономним живленням: п'єзоелектричний перетворювач з набором обчислювальних схем з плаваючим затвором з наднизьким енергоспоживанням
2	3D розподіл деформації: вертикальна та стискаюча деформація	Армований волокном полімер (FRP) — волоконно-оптична решітка Брегга (OFBG)
3	Деформація розтягування; втомне розтріскування	Розподілений волоконно-оптичний датчик (FOS) на основі релеєвського зондування
4	Вертикальний тиск; утворення колії	FBG
5	Деформації в холодному регеноерованому покритті (CIRP)	FOS
6	Старіння асфальтобетонного покриття в польових умовах	Хімічний датчик
7	Деформація / напруження / температура	Бездротові MEMS-сенсори з автономним живленням: Зарядний пристрій Фарадея

Таблиця 3

Порівняння застосувань інтелектуального зондування для моніторингу стану цементобетонних (PCC) покривів в аеропортах

Ч.ч.	Область застосування для цементобетонного покриття	Технологія інтелектуального зондування на місці
1	Розтріскування в ультратонких незв'язаних бетонних покриттях	Скло FRP-OFBG
2	Вміст води в бетонних матеріалах	бездротовий, пасивний вбудований датчик
3	Деформації, напруження та пошкодження в бетоні	Датчик деформації на основі цементу (CBSS)
4	Напруження і деформація	Магнітний мікропровід, вбудований в композит на основі цементу (MMCC)

Ч.ч.	Область застосування для цементобетонного покритву	Технологія інтелектуального зондування на місці
5	Ширина тріщин	Мідні дроти з емальованою плівкою з різними граничними деформаціями
6	Моніторинг просочування води	Інтелектуальний агрегатний датчик на основі п'єзокераміки
7	Температура	Температурна мітка з радіочастотною ідентифікацією (RFID)
8	Вимірювання деформацій, напружень і пошкоджень	Цементні композити, що містять графітові наночастинки (GNP)

Розрахунок загальних показників

Для деяких спеціальних задач (встановлення пріоритетності, ранжування) розраховують комбіновані показники стану покритву, як, наприклад, індекс стану покритву (PCI) [14-18]. Таких показників відомо досить багато, оскільки багато дорожніх адміністрацій мають власні розробки.

Однак метод розрахунку узагальнених показників має другорядне значення поряд з якісно наповненою базою даних на основі якої ці показники обчислюють.

Безрозмірні показники мають перевагу при візуальному обстеженні мережі доріг. Патерсоном ще у 1994 р. було запропоновано універсальний показник розтріскування CI для групи тріщин [11]:

$$\begin{aligned}
 CI &= \text{поширення} \cdot \text{інтенсивність} \cdot \text{ширина розкриття тріщин} = \\
 &= (\text{пошкоджена площа} / \text{загальна площа}) \cdot (\text{довжина тріщин} / \text{пошкоджена площа}) \cdot \text{ширина} \\
 &\text{розкриття тріщин} = (\text{довжина тріщин} \cdot \text{ширина розкриття тріщин}) / \text{загальна площа} = \\
 &= \text{площа розкриття тріщин} / \text{загальна площа}
 \end{aligned}$$

Універсальний показник пошкодження:

- для груп «Дефекти і деформації» і «Пошкодження покритву» (див. **табл. 2**):

$$DI_1 = (\text{площа пошкодження} / \text{загальна площа}) \cdot 100, \%$$

- для групи «Стики, шви чи кромки»:

$$DI_2 = (\text{довжина пошкодження} / \text{загальна довжина}) \cdot 100, \%$$

Універсальний показник пошкодження може приймати до уваги показник ступеня пошкодження сумуючи вагомості замірених чи оцінених пошкоджень:

- для груп «Дефекти і деформації» і «Пошкодження покритву»:

$$DI_{1S} = \frac{1}{2} \cdot \text{Низький \% площі} + 1 \cdot \text{Середній \% площі} + 2 \cdot \text{Високий \% площі};$$

- для групи "Стики, шви чи кромки":

$$DI_{2S} = \frac{1}{2} \cdot \text{Низький \% довжини} + 1 \cdot \text{Середній \% довжини} + 2 \cdot \text{Високий \% довжини}.$$

Такі показники придатні як для «ручної», так і автоматизованої оцінки стану покритву.

Комплексний коефіцієнт оцінювання стану дорожнього покритву за даними візуального обстеження України

Визначення ступеня пошкодження конструкції дорожнього одягу в Україні виконують відповідності до ДСТУ 8954:2019 [8], однак в цьому документі відсутнє поняття — комплексна оцінка стану поверхні покритву.

Відповідно з вимогами ДСТУ 8954:2019 у наявному на сьогоднішній день аналітичному комплексі (СУСП) Система управління станом дорожнього покритву наведена форма збору даних про руйнування поверхні дорожнього одягу (**табл. 4**) та на **рис. 1**. Приклад результатів візуального обстеження руйнувань.

Таблиця 4

Форма збору даних про руйнування поверхні дорожнього одягу

Код дороги (міжнародний):

Код дороги (місцевий): **М-14**

Назва дороги: **Одеса - Мелітополь - Новоазовськ (на м. Таганрог)**

Господарство: **Служба автомобільних доріг у Одеській області**

Від		До		Тип руйнування конструкції	Міра ураження ділянки і протяжність в % від довжини ділянки			Дата отримання даних
км	+ (м)	км	+ (м)		Рівень 1	Рівень 2	Рівень 3	
A	B	C	D	E	F	G	H	I
17	0	18	0	2	2	2	0	28.08.2024
17	0	18	0	6	18	18	18	28.08.2024
17	0	18	0	7	0	2	2	28.08.2024
17	0	18	0	11	0	4	4	28.08.2024
17	0	18	0	12	0	8	8	28.08.2024
17	0	18	0	13	0	6	6	28.08.2024
18	0	19	0	2	2	2	2	28.08.2024
18	0	19	0	6	18	18	18	28.08.2024
18	0	19	0	7	0	1	1	28.08.2024
18	0	19	0	11	0	4	6	28.08.2024

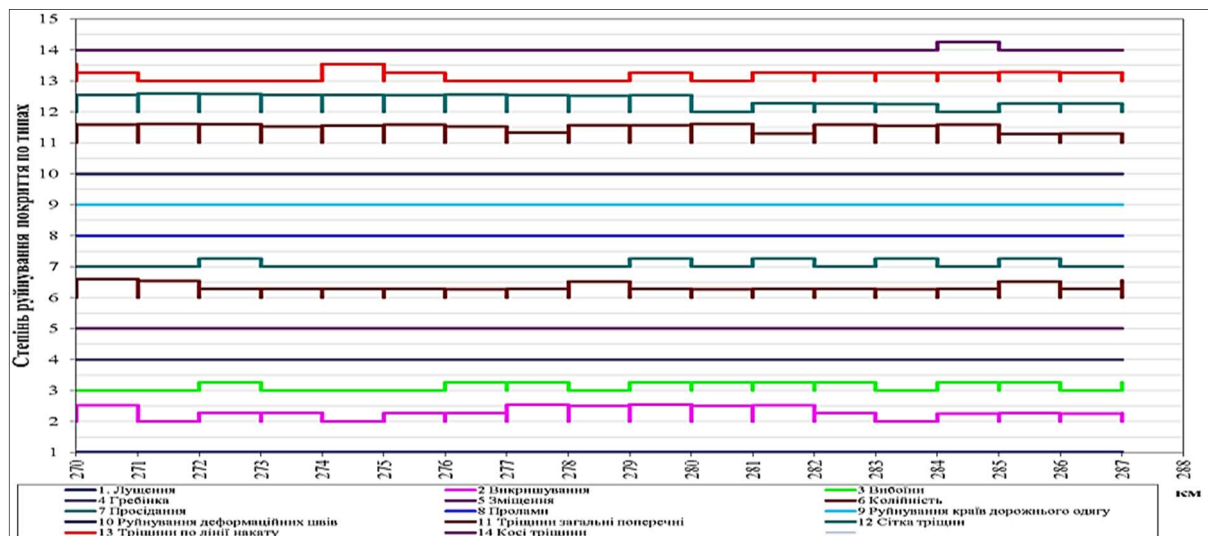


Рисунок 1 — Приклад результатів візуального обстеження дорожнього покриття М-14 Одеса – Мелітополь – Новоазовськ (на м. Таганрог), км 270 – 287

Оцінювання ступеня пошкодження дорожнього покриття ділянки автомобільної дороги пропонується виконувати за такою формулою (1) на основі даних СУСП за даними обстежень [7]:

$$K_{\text{стан}} = \sum_{i=1}^i \begin{pmatrix} 1 \text{ рівень дефектності } \sum_{i=1}^i D_i \cdot \frac{0,25}{100} \\ 2 \text{ рівень дефектності } \sum_{i=1}^i D_i \cdot \frac{0,25}{100} + 0,25 \\ 3 \text{ рівень дефектності } \sum_{i=1}^i D_i \cdot \frac{0,5}{100} + 0,5 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

де D_i — відсоток руйнування за i -м видом руйнування для кожного рівня ступеня пошкодження дорожнього покриття, визначений візуальним методом відповідно до ДСТУ 8954;

$K_{стан}$ — комплексна оцінка ступеня пошкодження дорожнього покриття, для 1 км автомобільної дороги.

За результатами розрахунків за формулою (4) на **рис. 2** та **табл. 5** наведено приклад аналізу даних для окремих ділянок автомобільної дороги М-14.

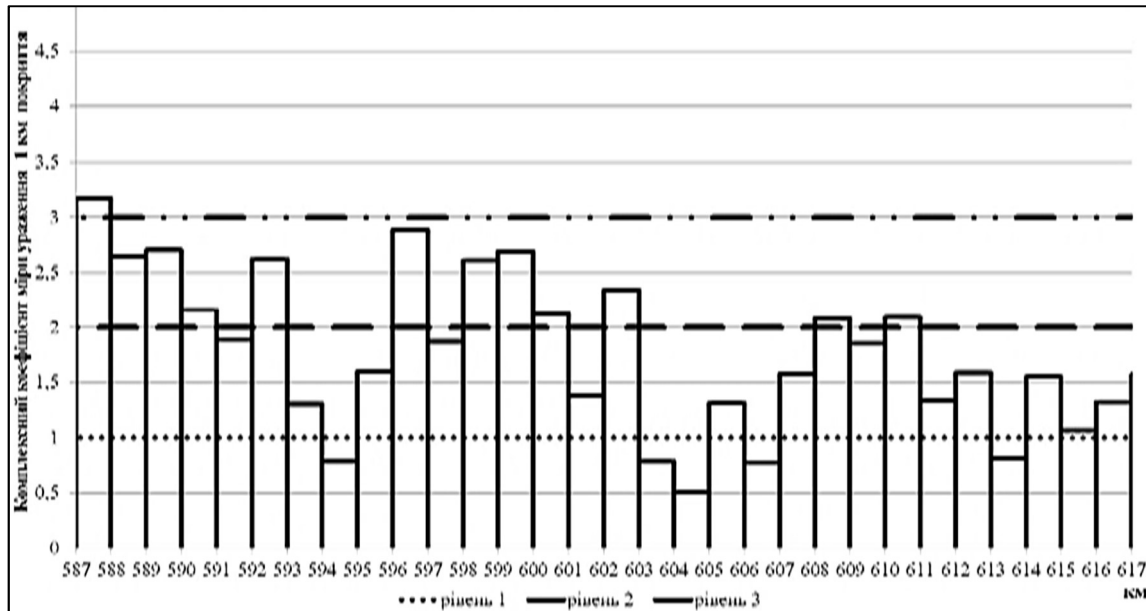


Рисунок 2 — Результати розрахунку оцінки стану дорожнього покриття

Таблиця 5

Комплексна оцінка руйнування дорожнього одягу

Від		До		Комплексна оцінка стану покриття	Дата отримання даних
км	+ (м)	км	+ (м)		
A	B	C	D	E	I
17	0	18	0	2,035	
17	0	18	0	3,190	
17	0	18	0	3,245	
				...	...

На **рис. 3** наведено аналіз ділянки автомобільної дороги М-14 Одеса – Мелітополь – Новоазовськ (на м. Таганрог) на ділянці км 260+000 – км 460+000 за показником комплексної оцінки покриття та нерівністю дорожнього покриття за міжнародним індексом нерівності IRI за даними 2017 року.



Рисунок 3 — Порівняльний аналіз ділянки автомобільної дороги М-14 за показником комплексного коефіцієнта стану покриття та нерівністю дорожнього покриття за міжнародним індексом нерівності IRI

За результатами аналізу наведених на **рис. 3** для усіх отриманих значень зміну нерівності від комплексної оцінки можна апроксимувати степеневою залежністю за формулою (5).

$$IRI = 0,7483 \cdot K_{стан}^{0,6032}, \quad (5)$$

де $K_{стан}$ — комплексна оцінка ступеня пошкодження дорожнього покриття.

Однак, з **рис. 4** слідує, що доцільно виділити зону (між червоними прямими на **рис. 4**), де залежність між нерівністю та комплексною оцінкою може бути уточнена.

Також за результатами аналізу даних по всій протяжності автомобільної дороги М-14 Одеса – Мелітополь – Новоазовськ (на м. Таганрог) в межах Одеської, Миколаївської, Запорізької та Донецької областей (загальною протяжністю 618 км) встановлено достатньо тісну залежність міжнародного індексу нерівності IRI від загального модуля пружності (**рис. 5**).

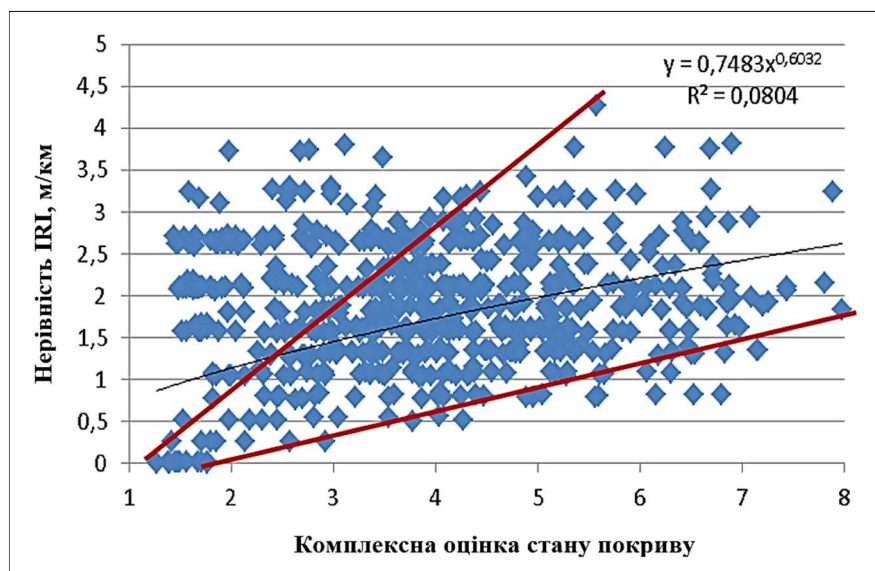


Рисунок 4 — Залежність міжнародного індексу нерівності IRI з комплексним коефіцієнтом стану покриття

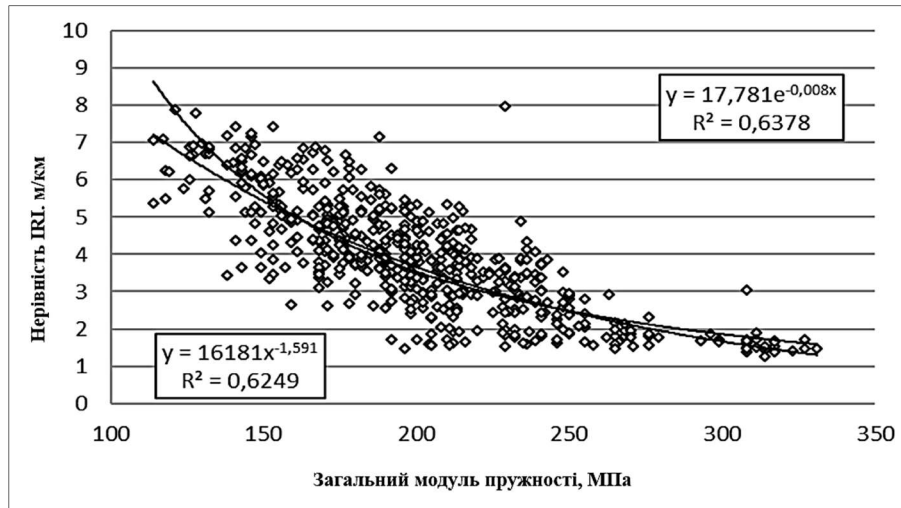


Рисунок 5 — Залежність міжнародного індексу нерівності IRI від загального модуля пружності

Висновки

На основі аналізу сучасного стану збору даних про пошкодження дорожнього покриття можна зробити такі висновки:

1. Візуальний збір даних: Широко відомий метод, який використовують як в Україні, так і в країнах Європи. Наразі набувають популярності системи автоматичного збирання та оброблення дефектів і руйнувань дорожнього покриття, що значно полегшує процес діагностування та прийняття інженерних рішень щодо ремонтних заходів. Значний прогрес досягнуто завдяки використанню нейронних мереж та оброблення спектральних зображень, а також вивчення важливості та результатів використання різних формул для обчислення загальних показників ступеня пошкодження дорожнього покриття.

2. Автоматизовані системи: Наразі автоматизовані системи знаходяться на стадії розроблення та вдосконалення алгоритмів. У цьому процесі беруть участь дві групи дослідників: оперативна група, яка займається практичними системами обстеження та попереднього оброблення польових даних, і аналітична група, яка займається обробленням та аналізуванням зображень. Обидві групи повинні чітко дотримуватися рекомендацій щодо кількісного визначення ступеня пошкоджень, аналізу та формування звітів.

3. Методика оцінювання стану покриття: На основі проведених досліджень запропоновано методику розрахунку комплексного коефіцієнта оцінювання стану дорожнього покриття з урахуванням ступеня його пошкодження, яка може використовуватися як додатковий інструмент для визначення виду ремонтних робіт. У подальшому для кожного типу руйнувань і ступеня їхнього розвитку доцільно встановити коефіцієнти впливу на зміну рівності та несної здатності покриття.

Останніми роками спостерігається перехід до методів і засобів із використанням перетворювачів або ультразвукового контролю до постійних систем моніторингу стану з автоматизованими інструментами оброблення зображень із використанням штучного інтелекту.

Публікація підготовлена на основі матеріалів, отриманих у рамках проєкту 2023.04/0097 «Створення технології та системи оперативного аналізу та управління станом цементобетонного покриття об'єктів критичної інфраструктури на основі спектральних фотоінформаційних зображень», що фінансується Національним фондом досліджень України.

Список літератури

1. Pavement management system. Report prepared by an OECD scientific expert group. Paris. 1987. 159 p.
2. Praticò, Filippo G., Paolo G. Briante, and Clara Celauro. Modelling pavement surface characteristics for noise prediction through Bailey-related indicators. *International Journal of Pavement Research and Technology*. 14.2 (2021). P. 222–231.
3. Matlack, Glenn R., et al. Measuring surface texture of in-service asphalt pavement: Evaluation of two proposed hand-portable methods. *Road Materials and Pavement Design*. 24.2 (2023). P. 592–608.
4. Underwood, B. Shane, Y. Richard Kim, and J. Corley-Lay. Assessment of use of automated distress survey methods for network-level pavement management. *Journal of performance of constructed facilities*. 25.3 (2011). P. 250–258.
5. White, Greg, et al. Developing a framework for diagnosis of shear distress in asphalt surfaces. *International Journal of Pavement Engineering*. 18.12 (2017). P. 1039–1051.
6. Gulyas A. Surface Distress Assessment / *Routes & Report*. 1991, 1. No. 301, P.15–30.
7. Райковський В.Ф., Удосконалення методу розрахунку надійності нежорсткого дорожнього одягу при дії навантаження. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Київ, 2021. 24 с.
8. Обстеження пошкоджень. Керівництво процедурами Візіроад /Ingeroute, Viziroad Proc V3A (rus), 23 p.
9. ДСТУ 8954:2019 Автомобільні дороги. Оцінювання рівня дефектності дорожнього одягу. Київ, 2019 . 52 с. (Інформація та документація)
10. PIARC World Road Association, Surface Characteristics, Report of the Committee. XXth World Road Congress. Ref.PIARC 20.01.B, Montreal, 1995, 102 p.
11. LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). *Deep learning*. Nature. 521(7553). P. 436–444.
12. Krizhevsky, A., Sutskever, I., & Hinton, G. E. (2012). ImageNet classification with deep convolutional neural networks. *Communications of the ACM*. 60(6). P. 84–90.
13. Gonzalez, R. C., & Woods, R. E. (2008). *Digital Image Processing* (3rd ed.). Pearson Education.
14. Shahin, M. Y. (2005). *Pavement Management for Airports, Roads, and Parking Lots*. Springer.
15. AASHTO (1993). *Guide for Design of Pavement Structures*. American Association of State Highway and Transportation Officials.
16. Al-Omari, B., & Darter, M. I. (1994). Relationships Between International Roughness Index and Present Serviceability Rating. *Transportation Research Record*. 1435. P. 130–136.
17. Miller, J. S., & Bellinger, W. Y. (2003). *Distress Identification Manual for the Long-Term Pavement Performance Program* (Fourth Revised Edition). Federal Highway Administration.
18. Shahin, M. Y., & Kohn, S. D. (1981). *Pavement maintenance management for roads and streets using the pavement condition index*. Construction Engineering Research Laboratory.
19. Ceylan, H et al. (2013). Highway Infrastructure Health Monitoring Using Micro-Electromechanical Sensors and Systems (MEMS). *Journal of Civil Engineering and Management*. Vol. 19, Issue 1. P. 188–201.
20. Zhou, Z et al. (2012). Optical fiber Bragg grating sensor assembly for 3D strain monitoring and its case study in highway pavement. *Mechanical Systems and Signal Processing*. Vol. 28. P. 36–49.
21. Zhou, D et al. (2014). Feasibility of water seepage monitoring in concrete with embedded smart aggregates by P-wave travel time measurement. *Smart Materials and Structures*. Vol. 23. No. 6.
22. Zhang, B et al. (2014). Crack width monitoring of concrete structures based on smart film. *Smart Materials and Structures*. Vol. 23. No. 4.

References

1. Pavement management system. Report prepared by an OECD scientific expert group. Paris. 1987. 159 p. [in English].

2. Praticò, Filippo G., Paolo G. Briante, and Clara Celauro. Modelling pavement surface characteristics for noise prediction through Bailey-related indicators. *International Journal of Pavement Research and Technology*. 14.2 (2021). P. 222–231 [in English].
3. Matlack, Glenn R., et al. Measuring surface texture of in-service asphalt pavement: Evaluation of two proposed hand-portable methods. *Road Materials and Pavement Design*. 24.2 (2023). P. 592–608 [in English].
4. Underwood, B. Shane, Y. Richard Kim, and J. Corley-Lay. Assessment of use of automated distress survey methods for network-level pavement management. *Journal of performance of constructed facilities*. 25.3 (2011). P. 250–258 [in English].
5. White, Greg, et al. Developing a framework for diagnosis of shear distress in asphalt surfaces. *International Journal of Pavement Engineering*. 18.12 (2017). P. 1039–1051 [in English].
6. Gulyas A. Surface Distress Assessment / *Routes & Report*, 1991, 1. No. 301, P. 15–30.
7. Raikovskiy V.F., Udoskonalennia metodu rozrakhunku nadiinosti nezhorstkoho dorozhnoho odiahu pry dii navantazhennia (Improvement of the method of calculating the reliability of non-rigid road clothing under load). Avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk. Kyiv, 2021. 24 p. [in Ukrainian].
8. Obstezhennia poshkodzen. Kerivnytstvo protseduramy Viziroad (Inspection of damages. Guide to Viziroad /Ingeroute procedures) /Ingeroute, Viziroad Proc V3A (rus), 23 p. [in Ukrainian].
9. DSTU 8954:2019 Avtomobilni dorohy. Otsiniuvannia rivnia defektnosti dorozhnoho odiahu. Roads. Evaluation of the level of defectiveness of road clothing [in Ukrainian].
10. PIARC World Road Association, Surface Characteristics, Report of the Committee. XXth World Road Congress. Ref.PIARC 20.01.B, Montreal, 1995, 102 p. [in English].
11. LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). Deep learning. *Nature*. 521(7553). P. 436–444.
12. Krizhevsky, A., Sutskever, I., & Hinton, G. E. (2012). ImageNet classification with deep convolutional neural networks. *Communications of the ACM*. 60(6). P. 84–90. [in English].
13. Gonzalez, R. C., & Woods, R. E. (2008). *Digital Image Processing* (3rd ed.). Pearson Education [in English].
14. Shahin, M. Y. (2005). *Pavement Management for Airports, Roads, and Parking Lots*. Springer [in English].
15. AASHTO (1993). *Guide for Design of Pavement Structures*. American Association of State Highway and Transportation Officials [in English].
16. Al-Omari, B., & Darter, M. I. (1994). Relationships Between International Roughness Index and Present Serviceability Rating. *Transportation Research Record*. 1435. P. 130–136 [in English].
17. Miller, J. S., & Bellinger, W. Y. (2003). *Distress Identification Manual for the Long-Term Pavement Performance Program* (Fourth Revised Edition). Federal Highway Administration [in English].
18. Shahin, M. Y., & Kohn, S. D. (1981). *Pavement maintenance management for roads and streets using the pavement condition index*. Construction Engineering Research Laboratory [in English].
19. Ceylan, H et al. (2013). Highway Infrastructure Health Monitoring Using Micro-Electromechanical Sensors and Systems (MEMS). *Journal of Civil Engineering and Management*. Vol. 19, Issue 1. P. 188–201 [in English].
20. Zhou, Z et al. (2012). Optical fiber Bragg grating sensor assembly for 3D strain monitoring and its case study in highway pavement. *Mechanical Systems and Signal Processing*. Vol. 28. P. 36–49 [in English].
21. Zhou, D et al. (2014). Feasibility of water seepage monitoring in concrete with embedded smart aggregates by P-wave travel time measurement. *Smart Materials and Structures*. Vol. 23, No. 6 [in English].
22. Zhang, B et al. (2014). Crack width monitoring of concrete structures based on smart film. *Smart Materials and Structures*. Vol. 23. No. 4 [in English].

Igor Gameliak¹, D.Sc., Prof., <https://orcid.org/0000-0001-9246-7561>

Vitaliy Raykovskiy², Ph.D., <https://orcid.org/0000-0002-6391-7647>

¹National Transport University (NTU), Kyiv, Ukraine

²State Enterprise “National Institute for Development Infrastructure” (SE “NIDI”), Kyiv, Ukraine

COMPLEX COEFFICIENT FOR ASSESSING THE CONDITION OF THE ROAD SURFACE

Abstract

Introduction. This article deals with the issue of reviewing existing methods and approaches to assessing the condition of the road pavement and proposes a methodology for assessing the condition of the road pavement using a complex indicator. This indicator is used to analyze the defects and destruction of the pavement determined by the visual method.

Problem. The need to improve the methodology for assessing the condition of the road surface (rigid, non-rigid) by calculating the coefficient by which the designer or balance holder can assess the condition of the existing pavement.

The purpose of the article. To inform road industry specialists about new trends and developments in the field of road pavement inspection of roads and airfields.

Materials and methods. SE “NIDI” (DerzhdorNDI SE), National Transport University and current construction norms and standards of Ukraine, materials of foreign regulatory documents and technical literature on pavement condition assessment were used in the article.

Conclusions. According to the analysis, a methodology for calculating a complex coefficient for assessing the condition of the pavement, taking into account the degree of damage to the pavement, which should be used as an additional tool for assigning the type of repair work, is proposed.

Keywords: road and airfield pavement, deformations, destruction, degree of development, condition assessment.