

© С. І. Ілляш, канд. техн. наук, начальник центру,  
ORCID: 0000-0002-3001-8012,  
e-mail: illiash.s@ukr.net;  
© Т. О. Стасюк, завідувач відділу,  
ORCID: 0000-0001-5921-4503,  
e-mail: wife.stas@ukr.net  
(ДП «НІПІ»)

© Sergii Illiash, PhD, Candidate of Technical Sciences, Head of the Center,  
ORCID: 0000-0002-3001-8012,  
e-mail: illiash.s@ukr.net;  
© Tetiana Stasiuk, Head of the Department,  
ORCID: 0000-0001-5921-4503,  
e-mail: wife.stas@ukr.net  
(NIDI SE)

## ЗАКОНОМІРНОСТІ ЗМІНИ СТАНУ АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ У СУЧАСНИХ УМОВАХ ЕКСПЛУАТУВАННЯ

### PATTERNS OF CHANGES IN THE CONDITION OF AUTOMOBILE ROADS UNDER MODERN OPERATING CONDITIONS

**Анотація.** Сучасна практика планування робіт з експлуатаційного утримування автомобільних доріг дедалі більше ґрунтується на прогнозуванні зміни технічного стану дорожніх покриттів у часі. За умов обмеженого фінансування та зростання транспортних навантажень особливого значення набуває науково обґрунтоване визначення строків і обсягів ремонтних втручань на основі моделей деградації дорожніх конструкцій. Ключовим параметром, що узагальнено відображує вплив конструктивних, кліматичних та транспортних факторів, є міцність дорожньої конструкції. У статті розглянуто закономірності зміни міцності дорожніх конструкцій автомобільних доріг у процесі експлуатування. Проаналізовано етапи деградації нежорстких дорожніх одягів, встановлено зв'язок між зниженням міцності, розвитком руйнувань покриття, погіршенням рівності та умов безпеки руху. Залежності можуть бути використані під час обґрунтування заходів з експлуатаційного утримування та плануванні ремонтних робіт.

Підходи до прогнозування стану дорожніх покриттів часто базуються на спрощених емпіричних моделях або не враховують поетапний характер деградації міцності дорожніх одягів. Крім того, універсальні моделі, розроблені для інших країн, не завжди адекватно відображають реальні умови експлуатування автомобільних доріг України, що характеризуються перевищенням розрахункових осьових навантажень, значною нерівномірністю фінансування, а також додатковими руйнівними впливами, спричиненими воєнними діями та зміною структури транспортних потоків.

Метою дослідження є узагальнення та розвиток наукових підходів до моделювання деградації дорожніх покриттів на основі поетапної зміни міцності дорожніх конструкцій, а також обґрунтування можливостей застосування таких моделей для прогнозування транспортно-експлуатаційного стану автомобільних доріг в сучасних умовах.

Стаття – оглядова. Використаний системний підхід, що є сукупністю загальнонаукових методологічних принципів (вимог), в основі яких лежить розгляд об'єктів як систем.

Установлено, що деградація дорожніх покриттів має чітко виражений поетапний характер. Зниження міцності дорожньої конструкції є визначальним чинником розвитку руйнувань покриття, зростання площі вибійок і погіршення рівності проїзної частини. Розкрито взаємозв'язок між показниками міцності, рівності та безпеки руху, а також обґрунтовано доцільність використання комбінованих моделей деградації, які поєднують механістично-емпіричні та ймовірнісні підходи. З'ясовано, що застосування локально адаптованих моделей дозволяє підвищити достовірність прогнозування залишкового терміну служби дорожніх покриттів.

Запропонований підхід до моделювання деградації дорожніх покриттів на основі поетапної зміни міцності дорожніх конструкцій може бути використаний як наукова основа для прийняття рішень у системах управління дорожніми активами. Адаптація моделей до реальних умов експлуатування автомобільних доріг України є необхідною умовою підвищення ефективності експлуатаційного утримування та раціонального використання фінансових ресурсів.

**Ключові слова:** автомобільні дороги, експлуатаційне утримування, дорожній покриття, деградація дорожніх конструкцій, транспортно-експлуатаційний стан.

**Abstract.** Modern practices of planning road maintenance activities are increasingly based on forecasting changes in pavement condition over time. Under conditions of limited funding and growing traffic loads, scientifically substantiated determination of the timing and scope of maintenance and repair actions based on pavement deterioration models becomes particularly important. The key parameter that integrally reflects the influence of structural, climatic, and traffic-related factors is the structural capacity of the pavement structure. This paper examines the patterns of changes in the structural capacity of road pavement structures during operation. The stages of deterioration of flexible pavements are analyzed, and the relationship between the reduction in structural capacity, the development of pavement distress, deterioration of ride quality, and traffic safety conditions is established. The obtained dependencies can be used to substantiate maintenance strategies and to plan repair works.

*Existing approaches to pavement condition forecasting are often based on simplified empirical models or do not adequately account for the stage-wise nature of pavement structural capacity degradation. In addition, universal models developed for other countries do not always adequately reflect the real operating conditions of Ukrainian highways, which are characterized by excessive axle loads, significant irregularity of funding, and additional destructive impacts caused by military actions and changes in traffic flow structure.*

*The purpose of this study is to generalize and further develop scientific approaches to modeling pavement deterioration based on the stage-wise change in pavement structural capacity, as well as to substantiate the applicability of such models for predicting the serviceability and operational condition of automobile roads under modern operating conditions.*

*This study is of a review nature. A systems approach was applied, which represents a set of general scientific methodological principles based on considering the objects of study as complex systems.*

*It was established that pavement deterioration has a clearly defined stage-wise character, in which the reduction of pavement structural capacity is the determining factor governing the development of pavement distress, the increase in the area of potholes, and the deterioration of surface evenness. The interrelation between structural capacity indicators, ride quality, and traffic safety was demonstrated. The feasibility of using combined deterioration models that integrate mechanistic-empirical and probabilistic approaches was substantiated. It was shown that the application of locally calibrated models improves the reliability of residual service life prediction for pavements.*

*The proposed approach to modeling pavement deterioration based on the stage-wise change in pavement structural capacity can serve as a scientific basis for decision-making in road asset management systems. Adapting deterioration models to the actual operating conditions of Ukrainian highways is a necessary prerequisite for improving the efficiency of road maintenance and the rational use of limited financial resources.*

**Keywords:** *automobile roads, road maintenance, pavement, pavement deterioration, pavement serviceability condition.*

## Вступ

Сучасна система експлуатаційного утримування автомобільних доріг дедалі більше орієнтується не на усунення наслідків руйнувань, а на прогнозування змін технічного стану дорожніх покриттів з метою раціонального планування ремонтних заходів. Можливість достовірного прогнозу майбутнього стану покриття є критично важливою з економічної точки зору, оскільки дозволяє формувати оптимальні графіки втручання, визначити пріоритети фінансування та забезпечувати відповідність показників стану дорожнього покриття встановленим нормативним вимогам.

У межах цього дослідження міцність дорожньої конструкції розглядається як узагальнений структурний показник, що характеризує здатність дорожнього одягу сприймати транспортні навантаження протягом нормативного терміну експлуатування. Зміна міцності у процесі експлуатування супроводжується погіршенням нормованих показників стану дорожнього покриття, зокрема рівності, тріщиностійкості та інших параметрів, які використовують для оцінювання його експлуатаційної придатності. Такий підхід дозволяє поєднати аналізування внутрішніх процесів руйнування дорожнього одягу з оцінюванням фактичних показників стану автомобільних доріг.

Наявність ретроспективних даних про експлуатаційні характеристики дорожніх покриттів дає змогу оцінювати залишковий термін служби дорожніх конструкцій і використовувати ці оцінки для прогнозування їх подальшого стану. Це створює передумови для переходу від реактивного реагування на руйнування до превентивного управління станом дорожньої мережі. Водночас розроблення універсальних моделей прогнозування ускладнюється обмеженою доступністю якісних і репрезентативних даних, різноманіттям конструктивних рішень та значною варіабельністю властивостей матеріалів дорожніх одягів.

У світовій практиці для опису деградації дорожніх покриттів застосовуються емпіричні, механістично-емпіричні, імовірнісні та data-driven (орієнтовані на дані) моделі, кожна з яких має власну сферу доцільного використання. Проте без урахування поетапної зміни міцності дорожньої конструкції у часі такі підходи не завжди дозволяють своєчасно виявити момент переходу до критичних стадій деградації.

З огляду на це актуальним є дослідження закономірностей зміни міцності дорожніх конструкцій у часі з метою обґрунтування стратегій експлуатаційного утримування, орієнтованих на недопущення функціонального відмов-

лення покривів та забезпечення довготривалої експлуатаційної надійності автомобільних доріг в умовах України.

**Мета й завдання роботи.** Проаналізувати закономірності зміни міцності дорожньої конструкції в часі та узагальнити підходи до моделювання деградації дорожніх покривів з метою обґрунтування доцільності застосування планово-попереджувальних ремонтів у системі експлуатаційного утримування автомобільних доріг. Це дозволяє підвищити ефективність управління технічним станом дорожніх покривів, оптимізувати планування ремонтних заходів і забезпечити раціональне використання фінансових ресурсів в сучасних умовах.

### Основна частина

У системі показників транспортно-експлуатаційного стану автомобільних доріг визначальне місце посідає міцність дорожньої конструкції, яка формується сукупною роботою земляного полотна та шарів дорожнього одягу. Саме рівень міцності значною мірою визначає довговічність покриття, інтенсивність розвитку дефектів, а також рівність проїзної частини і безпеку дорожнього руху

Оцінювання міцності дорожньої конструкції, як правило, здійснюють за коефіцієнтом запасу міцності, який характеризує співвідношення фактичного та необхідного модуля пружності конструкції. При цьому необхідний модуль визначають з урахуванням фактичної або перспективної інтенсивності та складу руху.

$$K_{мц} \leq \frac{E_{заг}}{E_{потр}}, \quad (1)$$

де  $K_{мц}$  – коефіцієнт запасу міцності дорожнього одягу;

$E_{заг}$  – загальний модуль пружності дорожньої конструкції, МПа;

$E_{потр}$  – потрібний модуль пружності дорожньої конструкції, МПа, який визначають з урахуванням капітального дорожнього одягу та інтенсивності дії навантаження [1].

Фактичний модуль пружності дорожньої конструкції не є сталою величиною і змінюється у часі під впливом транспортних навантажень та водно-теплого режиму земляного полотна і шарів дорожнього одягу. Мінімальні значення міцності, як правило, спостерігаються у несприятливих за водно-тепловими

умовами періоди, що характеризуються підвищеним зволоженням матеріалів та зниженням їх жорсткості. На відміну від цього, нормативні значення необхідного модуля пружності змінюються незначно, оскільки визначаються переважно параметрами транспортного потоку. Унаслідок цього коефіцієнти міцності та запасу міцності досягають мінімальних значень саме у критичні періоди експлуатування, що зумовлює підвищену ймовірність розвитку дефектів дорожнього покриття. Зниження значень коефіцієнтів міцності нижче нормативних рівнів супроводжується інтенсивністю процесів руйнування, зокрема утворенням вибоїн, тріщин та пластичних деформацій.

Результати спостережень свідчать про наявність тісного зв'язку між зменшенням міцності дорожньої конструкції та зростанням відносної площі деформованих ділянок покриття. За умов недостатнього запасу міцності навіть незначне зростання транспортних навантажень або погіршення кліматичних умов може призвести до різкого погіршення стану покриття.

Погіршення міцності дорожньої конструкції опосередковано проявляється і через зміну рівності проїзної частини, яка є одним із ключових показників транспортно-експлуатаційного стану автомобільних доріг. Зростання кількості та площі поверхневих дефектів призводить до збільшення нерівностей, підвищення опору коченню, зниження комфортності руху та зростання аварійності. Таким чином, рівність покриття може бути розглянута як функція часу експлуатування, що відображає накопичення пошкоджень, обумовлених деградацією міцності дорожньої конструкції.

Окрім міцності та рівності, важливими показниками стану покриття залишаються зчипні властивості та знос, однак їхній вплив на загальну працездатність дорожньої конструкції має більш складний і, у ряді випадків, випадковий характер. З цієї причини саме показники міцності доцільно розглядати як базові при обґрунтуванні строків і видів ремонтних втручань у системі експлуатаційного утримування автомобільних доріг.

Зі збільшенням терміну експлуатування покриття зростає потреба в його обслуговуванні. Точне виявлення механізму деградації та прогнозування експлуатаційних характеристик асфальтобетонного покриття є основою

для прийняття наукових рішень щодо його обслуговування. Водночас це також корисно для планування будівництва доріг та розподілу ресурсів.

У наукових дослідженнях, присвячених експлуатаційному утримуванню автомобільних доріг, деградація дорожніх покриттів розглядається як складний багатофакторний процес, що відбувається у часі під впливом транспортних навантажень, природно-кліматичних умов, конструктивних рішень та властивостей матеріалів дорожнього одягу. З позицій інженерної механіки цей процес доцільно інтерпретувати як поетапну зміну ефективної міцності дорожньої конструкції, зовнішніми проявами якої є розвиток дефектів покриття, погіршення рівності та зниження рівня безпеки руху.

Для опису та прогнозування деградації дорожніх покриттів у світовій практиці застосовуються різні класи моделей, які відрізняються рівнем деталізації, вимогами до вихідних даних і ступенем урахування фізичних механізмів руйнування. Найбільш поширеними серед них є емпіричні, механістично-емпіричні, імовірнісні та data-driven моделі.

Найпростішими та найбільш поширеними у практиці управління дорожніми покриттями залишаються емпіричні (регресійні) моделі деградації. Вони ґрунтуються на встановленні статистичного зв'язку між показниками транспортно-експлуатаційного стану покриття та параметрами його експлуатування. Такі моделі, як правило, будуються на основі результатів періодичних обстежень дорожніх ділянок і описують зміну індексів рівності, зчеплення, площі дефектів або інтегральних показників стану за допомогою лінійних чи нелінійних регресійних залежностей. Вони дозволяють відтворити загальні тенденції погіршення стану покриття, однак не відображають внутрішні процеси руйнування дорожньої конструкції та суттєво залежать від якості й повноти вихідних даних, на основі яких були отримані.[2]

Емпіричні (регресійні) моделі ґрунтуються на встановленні статистичного зв'язку між показниками транспортно-експлуатаційного стану покриття та параметрами його експлуатування. Як вихідні змінні в таких моделях зазвичай використовуються індекси рівності та стану покриття (IRI, PCI, відносна

площа дефектів), тоді як пояснювальними параметрами виступають вік покриття, накопичене транспортне навантаження (еквівалентні осі), а також кліматичні умови експлуатування.

Емпіричні моделі дозволяють відтворити загальні тенденції погіршення стану покриття у часі та є зручними для застосування на мережевому рівні. Водночас їх суттєвим обмеженням є те, що вони не відображають внутрішні процеси руйнування дорожньої конструкції та не дають прямої оцінки зміни її міцності. Як наслідок, такі моделі недостатньо чутливі до переходу покриття від стабільної фази експлуатування до стадії прискореної деградації. Для опису зазначених залежностей застосовують лінійні та нелінійні регресійні моделі, у тому числі поліноміальні та логарифмічні залежності, а також підходи, засновані на аналізованні часу до настання погіршення експлуатаційного стану [3].

$$y(t) = \beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 EAL + \beta_3 X + \varepsilon, \quad (2)$$

де  $y(t)$  – показник стану (наприклад IRI, PSI або індекс деградації),

$t$  – вік покриття;

EAL – сумарне навантаження від руху у вигляді еквівалентних одноосових навантажень;

$X$  – додаткові змінні (кліматичні, конструктивні, експлуатаційні);

$\beta_n$  – невідомі параметри, які потрібно оцінити;

$\varepsilon$  – випадкова величина.

Подальшим розвитком підходів до прогнозування стали механістично-емпіричні моделі, у яких статистичні залежності поєднуються з фізично обґрунтованим описом напружено-деформованого стану дорожньої конструкції. У межах цього підходу деградація покриття розглядається як результат накопичення пошкоджень у шарах дорожнього одягу під дією повторних навантажень, температурних коливань і впливу вологи. Механістична складова дозволяє визначати напруження та деформації в конструктивних шарах, тоді як емпірична частина встановлює зв'язок між цими величинами та фактичними проявами руйнувань на поверхні покриття.

Механістично-емпіричні моделі є найбільш придатними для аналізування зміни міцності дорожньої конструкції у часі, оскільки

вони безпосередньо пов'язують деградацію покриву зі зміною модулів пружності шарів у процесі експлуатування та накопиченням втомих пошкоджень. Саме цей підхід покладено в основу сучасних методик проектування та оцінювання довговічності дорожніх конструкцій (зокрема MEPDG, HDM-4), які широко застосовуються для прогнозування залишкового терміну служби покривів за умови відповідного калібрування до локальних умов експлуатування [4].

Механістична частина дає напруження/деформації  $\sigma$ ,  $\epsilon$  у шарі при циклічному навантаженні; емпірична частина – закон накопичення пошкодження (наприклад Miner's rule для втоми) [5]:

$$D = \sum_i \frac{n_i}{N_i(\sigma_i)}, \quad (3)$$

де  $n_i$  – число циклів з напруженням  $\sigma_i$ ,

$N_i(\sigma_i)$  – кількість циклів до відмови при цій величині напруження;

стан вважається «відмовленим», коли  $D \geq 1$ .

Поряд із детермінованими моделями значного поширення набули ймовірнісні підходи, зокрема марківські та напівмарківські моделі деградації [6]. У таких моделях технічний стан дорожнього покриву подається у вигляді дискретних станів, що відповідають певним рівням експлуатаційної придатності, а процес деградації описується як послідовність випадкових переходів між цими станами. Ймовірності переходів оцінюються на основі статистичних даних спостережень, що дозволяє враховувати стохастичний характер процесів руйнування.

Напівмарківські моделі, на відміну від класичних марківських, додатково враховують тривалість перебування покриву в окремих станах, що забезпечує більш реалістичне відтворення деградації у часі. Такі підходи є особливо доцільними для застосування у системах управління дорожніми активами на мережевому рівні, однак вони опосередковано враховують зміну міцності дорожньої конструкції і не дозволяють безпосередньо оцінювати внутрішні параметри її стану.

Марківські моделі описують деградацію як випадковий процес переходів між дискретними станами (стан 1 – «відмінний», ..., стан  $n$  – «недопустимий»). Переходи задаються мат-

рицею ймовірностей  $P=(P_{ij})$ . Класичне припущення марківських моделей – відсутність пам'яті: ймовірність переходу залежить лише від поточного стану та інтервалу часу.

Марківська модель для дискретного кроку часу:

$$p(t+1) = p(t)P \quad (4)$$

де  $p(t)$  – вектор ймовірностей того, що система знаходиться в кожному із своїх можливих станів в момент  $t$ ;

$P = [P_{ij}]$  – матриця ймовірностей переходів між станами.

Розвитком ймовірнісних підходів стали стохастичні моделі, у яких невизначеність розглядається як невід'ємна властивість процесу експлуатування дорожніх покривів. У таких моделях випадковими величинами вважаються транспортні навантаження, кліматичні впливи, а також параметри матеріалів дорожнього одягу. Це дозволяє формувати не єдину прогнозну траєкторію деградації, а множину можливих сценаріїв зміни стану покриву та оцінювати ризики досягнення критичних рівнів міцності [7].

Останніми роками у сфері прогнозування стану дорожніх покривів активно розвиваються data-driven (орієнтовані на дані) моделі, що ґрунтуються на аналізованні великих масивів інформації. На відміну від класичних емпіричних підходів, такі моделі не потребують попереднього задання аналітичної форми залежностей між параметрами стану покриву та факторами впливу, а виявляють їх автоматично на основі статистичних закономірностей у даних.

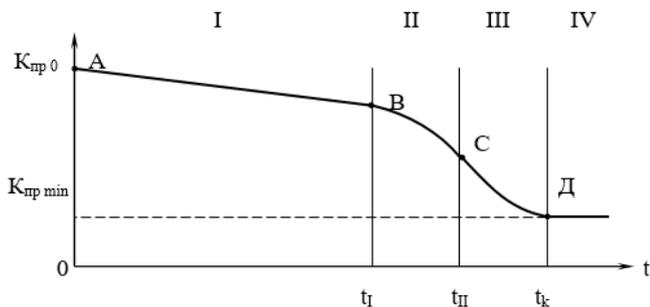
У дослідженнях цього напрямку використовують методи машинного навчання, нейронні мережі, які дозволяють враховувати нелінійні взаємозв'язки між транспортними навантаженнями, кліматичними умовами, конструктивними параметрами та показниками стану покриву. Разом з тим, обмежена інтерпретованість результатів і висока залежність від повноти та якості вихідних даних ускладнюють їх безпосереднє використання для інженерного аналізу міцності дорожніх конструкцій [8].

З огляду на це в сучасних наукових роботах все більшого поширення набувають гібридні підходи, що поєднують data-driven методи

з механістично-емпіричними моделями, у межах яких фізично обґрунтовані параметри міцності використовуються як структурна основа для побудови прогнозів.

Отже, кожен із розглянутих класів моделей деградації має власну сферу доцільного застосування, а вибір конкретного підходу визначається цілями прогнозування, доступністю вихідних даних та рівнем деталізації, необхідним для прийняття управлінських рішень у системі експлуатаційного утримування автомобільних доріг, зокрема в сучасних умовах.

Узагальнення результатів механістично-емпіричних та ймовірнісних моделей деградації дорожніх покриттів дозволяє подати зміну міцності нежорстких дорожніх конструкцій у процесі експлуатування у вигляді характерної кривої, що відображає поетапний характер накопичення пошкоджень (рис. 1). Такий підхід дає можливість пов'язати внутрішні процеси накопичення пошкоджень у шарах дорожнього одягу із зовнішніми проявами погіршення транспортно-експлуатаційного стану автомобільних доріг [9].



**Рис. 1.** Залежність зміни міцності дорожньої конструкції в часі

Початковий етап експлуатування (ділянка А–В кривої) охоплює період після завершення будівництва або капітального ремонту і характеризується максимальною ефективною міцністю дорожньої конструкції, визначеною проектними параметрами та властивостями застосованих матеріалів. У цей період конструкція перебуває у стані, близькому до проектно-розрахункового, а її здатність сприймати навантаження транспортного потоку відповідає нормативним вимогам або перевищує їх.

Зміна міцності на початковому етапі відбувається повільно і зумовлена переважно

адаптацією матеріалів дорожнього одягу та земляного полотна до реальних температурно-вологісних умов експлуатування. Для нежорстких дорожніх одягів у перші роки експлуатування накопичення втомних пошкоджень є незначним, а зниження ефективного модуля пружності шарів може бути апроксимоване лінійною або близькою до лінійної залежністю від часу. Цей етап часто відповідає латентній фазі деградації, коли зовнішні дефекти покриття мають поодинокий характер і не впливають істотно на транспортно-експлуатаційні показники.

Початковий етап має важливе значення для калібрування моделей деградації, оскільки саме в цей період формується базовий рівень міцності дорожньої конструкції, відносно якого оцінюється подальше накопичення пошкоджень.

Стадія стабільного експлуатування (ділянка В–С кривої) охоплює основну частину життєвого циклу дорожнього покриття і характеризується поступовим зниженням ефективної міцності під дією циклічних транспортних навантажень, температурних коливань та впливу вологи. На цій стадії кожен окремих навантажувальний цикл має незначний вплив на стан конструкції, однак сумарний ефект великої кількості циклів призводить до накопичення внутрішніх дефектів у шарах дорожнього одягу.

Зниження міцності у стабільній фазі супроводжується поступовим розвитком поверхневих пошкоджень, погіршенням рівності проїзної частини та зростанням значень інтегральних показників транспортно-експлуатаційного стану. Саме на цій стадії найбільш ефективними є заходи планово-попереджувального ремонту, спрямовані на збереження запасу міцності та недопущення переходу конструкції до критичних стадій деградації.

Перехідна стадія прискореної деградації (ділянка С–D кривої) настає після досягнення певного граничного рівня накопичених пошкоджень, коли внутрішні дефекти починають взаємодіяти між собою та формують масштабні порушення цілісності дорожньої конструкції. Для цієї стадії характерне різке зростання темпів зниження ефективної міцності, що обумовлено розвитком мереж тріщин, утворенням колій, порушенням роботи дренажу та втратою несучої здатності основи.

У цей період емпіричні моделі деградації часто демонструють нелінійний характер зміни показників стану, що проявляється у стрімкому зростанні площі дефектів і показників нерівності. Аналогічні тенденції спостерігаються і в механістично-емпіричних моделях, де прискорене накопичення втомних пошкоджень призводить до швидкого зменшення модулів пружності конструктивних шарів. Перехід до цієї стадії означає суттєве скорочення залишкового терміну служби дорожнього покриття.

Завершальна стадія відповідає стану функціонального відмовлення або структурного руйнування дорожньої конструкції, за якого її міцність знижується до критичного рівня. Такий стан супроводжується масовою появою великих дефектів покриття, значним погіршенням рівності та виходом транспортно-експлуатаційних показників за межі допустимих значень. За цих умов локальні ремонтні заходи втрачають ефективність, а подальше експлуатування без виконання капітального ремонту або реконструкції стає технічно та економічно недоцільним.

Отже, поетапний характер зміни міцності дорожньої конструкції в часі свідчить про доцільність орієнтації системи експлуатаційного утримування на підтримання покриття у межах стабільної стадії експлуатування. Недопущення переходу до стадії прискореної деградації є ключовою умовою продовження терміну служби дорожніх покриттів і раціонального використання фінансових ресурсів.

Отже, проведений аналіз залежності зміни міцності дорожньої конструкції в часі свідчить, що процес деградації покриття має поетапний характер і супроводжується поступовим накопиченням структурних пошкоджень, інтенсивність яких істотно зростає на пізніх стадіях експлуатування. Досягнення завершальної стадії зміни міцності, під час якої формується стан функціонального відмовлення або структурного руйнування дорожньої конструкції, призводить до різкого скорочення залишкового терміну служби та потреби у капітальних втручаннях. У зв'язку з цим доцільним є впровадження стратегії планово-попереджувальних ремонтів, за якої підтримання належного технічного стану дорожнього покриття забезпечується систематичними заходами експлуатаційного утримування, спрямованими на збереження міцності дорожньої конструкції

та запобігання переходу до критичних стадій деградації.

## Висновки

У роботі розглянуто деградацію дорожніх покриттів як поетапний процес зміни міцності дорожньої конструкції в часі під впливом транспортних навантажень, природно-кліматичних чинників та конструктивних особливостей дорожнього одягу. Показано, що саме міцність дорожньої конструкції є системоутворювальним параметром, який визначає характер і темпи погіршення транспортно-експлуатаційного стану автомобільних доріг.

Узагальнено основні підходи до моделювання деградації дорожніх покриттів, зокрема емпіричні, механістично-емпіричні, ймовірнісні та data-driven моделі, встановлено, що ефективність їхнього застосування значною мірою залежить від урахування стадійності процесу зміни міцності дорожньої конструкції. Нехтування поетапним характером деградації знижує достовірність прогнозування та ускладнює своєчасне прийняття управлінських рішень.

Обґрунтовано, що перехід дорожнього покриття до стадії прискореної деградації супроводжується різким зменшенням запасу міцності та стрімким скороченням залишкового терміну служби, що робить подальше експлуатування без капітальних втручань технічно та економічно недоцільним.

Показано, що найбільш ефективними щодо продовження терміну служби дорожніх покриттів є заходи планово-попереджувального ремонту, спрямовані на збереження міцності дорожньої конструкції на стадії стабільного експлуатування та недопущення її переходу до критичних фаз деградації.

Отримані узагальнення можуть бути використані як науково-методична основа для вдосконалення систем управління дорожніми активами, планування заходів з експлуатаційного утримування та обґрунтування пріоритетів фінансування автомобільних доріг з урахуванням реальних умов експлуатування в Україні.

З урахуванням обмежених фінансових ресурсів, характерних для сучасних умов експлуатування автомобільних доріг України, особливого значення набуває обґрунтоване планування заходів з експлуатаційного утриму-

вання, спрямованих на недопущення деградації дорожніх покриттів до стадії функціонального відмовлення або структурного руйнування. Запропонований підхід до моделювання деградації дорожніх покриттів на основі поетапної зміни міцності дорожніх конструкцій може бути використаний як наукова основа для прийняття рішень у системах управ-

ління дорожніми активами. Адаптація моделей до реальних умов експлуатування автомобільних доріг України є запорукою підвищення ефективності експлуатаційного утримування та раціонального використання фінансових ресурсів.

### References

1. MUI. (2019). GBN V.2.3-37641918-559:2019. Automobile roads. Flexible pavement. Design. Kyiv (in Ukrainian)
2. Donev, V., Hoffmann, M. (2019). Condition prediction and estimation of service life in the presence of data censoring and dependent competing risks. *International Journal of Pavement Engineering*, 2019, Vol. 20, No. 3, 313–331.  
<https://doi.org/10.1080/10298436.2017.1293264>
3. Hu, A., Bai, Q., Chen, L., Meng, S., Li, Q., Xu, Z. (2022). A review on empirical methods of pavement performance modeling. *Construction and Building Materials*, 342, Article 127968.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127968>
4. Transportation Research Board. (2004). *Flexible Pavement Design: AASHTO 1993 vs. Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide*. Washington, DC, 78.
5. PIARC. (2004). *Highway Development and Management Model (HDM-4). Volume 6: Modelling Road Deterioration and Works Effects. Version 2.0*, 297.
6. Thomas, O., Sobanjo, J. (2013). Comparison of Markov Chain and Semi-Markov Models for Crack Deterioration on Flexible Pavements. *Journal of Infrastructure Systems*, 19, 2.  
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IS.1943-555X.0000112](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000112)
7. Shahid, C. S., Zainal, Z. A., Yusoff, N. I. M., Mohammad, N., Zamzuri, Z. H., Widyatmoko, I. (2025). Stochastic-based pavement performance and deterioration models: A review of techniques and applications. *Alexandria Engineering Journal*, 120, 420–437.  
<https://doi.org/10.1016/j.aej.2025.01.020>
8. Cano-Ortiz, S., Pascual-Muñoz, P., Castro-Fresno, D. (2022). Machine learning algorithms for monitoring pavement performance. *Automation in Construction*, 139, Article 104309.  
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104309>
9. Demishkan, V. F. (2000). Improvement of road condition management under limited resources. PhD thesis. Kharkiv: Kharkiv State Automobile and Highway Technical University (in Ukrainian)