

© Т. А. Терещенко, канд. хім. наук,
 провідний науковий співробітник,
 ORCID: 0000-0001-5206-9921,
 e-mail: chemistry@dorndi.org.ua
 Державне підприємство «Державний дорожній науково-
 дослідний інститут імені М. П. Шульгіна»

© Tatiana Tereshchenko, Candidate of Chemical
 Sciences (Ph. D.), Senior Research Officer,
 ORCID: 0000-0001-5206-9921
 e-mail: chemistry@dorndi.org.ua
 N.P. Shulgin State Road Research Institute State
 Enterprise

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОВЕРХНІ ПОКРИТТЯ ДОРОЖНЬОГО ОДЯГУ СТАНДАРТНІ МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ

ROAD PAVEMENTS SURFACE CHARACTERISTICS STANDARD MEASURING METHODS

Анотація. Викладено основні положення стосовно параметрів текстури поверхні покриття дорожнього одягу, прийняті в серії міжнародних та регіональних нормативних документів, розглянуто вплив таких параметрів на критичні характеристики взаємодії транспортного засобу з покриттям, зокрема на рівні контакту шини з поверхнею покриття, а також виконано порівняльний аналіз методів вимірювання та аналізування параметрів профілю покриття і опору поверхні покриття зсуву колеса транспортного засобу.

Ключові слова: дорожнє покриття, текстура поверхні, профілометр, опір зсуву, кут ковзання, коефіцієнт тертя, міжнародний індекс рівності.

Abstract. The texture of a road pavement surface and its skid resistance which concerns its ability to resist the vehicle wheel skidding have been accepted worldwide as the road safety criterion. These characteristics are interconnected in that the texture affects the skid resistance.

The goal of the paper is to carry out the comparative analysis of valid road safety and performance parameters and its dependence on the road pavement surface texture and the comparative analysis of international and regional standard methods of road surface texture and skid resistance measurements covering methods acceptable for the road network survey.

The main principles of the road pavement surface texture categorization were analyzed with its ranging as micro-, macro- and megatexture where the microtexture parameters sufficiently influence adhesion between pavement and tire especially in wet conditions. It was stated also that the macro- and megatexture parameters govern the rolling resistance and dynamic effect where the last is attributable to the comparable dimensions of the megatexture wavelength and the tire footprint and also affects the increase in loading that may be equal to the additive ESALs up to 40 %. The high-range wavelength roughness exceeding $\lambda = 500$ mm should be viewed as the road surface unevenness, as the feature negatively governing the vehicle road-holding ability.

Also the contemporary high-performance techniques and methods for the road pavement surface skid resistance determination were reviewed and it was shown that these method and the according equipment should be divided as performing the longitudinal friction measurements or the side-way force measurements to be carried out under conditions that allow the investigators to distinguish the contribution made by the road pavement surface characteristics to the friction force.

The possibilities of the usage of the results of the mathematical analysis of the road surface profile survey were analyzed separately and it was shown that the power spectral density can be accepted as a valid parameter for non-direct estimation of the road surface texture through international roughness index IRI.

Keywords: road pavement, surface texture, profilometer, skid resistance, slid angle, friction coefficient, international roughness index.

Вступ

Визначальним чинником забезпечення належних їздових якостей автомобільних доріг і зниження аварійності є характеристики поверхні покриття дорожнього одягу, де критичним параметром є опір поверхні покриття зсуву колеса транспортного засобу або опір зсуву (відповідний англомовний термін – *skid resistance*). Значення цього па-

раметра залежить від чотирьох груп складників – характеристик поверхні покриття, технічних характеристик власне транспортного засобу (далі – ТЗ), характеристик шини та погодно-кліматичних умов.

Відповідні характеристики поверхні покриття визначають за показниками лінійних розмірів у профілі – амплітудою й довжиною хвилі, де залежно від довжини хвилі

виділяють різні рівні текстури, а також нерівність поверхні, які різноспрямовано впливають на такі важливі параметри, як керованість ТЗ, аквапланування, опір коценню, інтенсивність динамічного навантажування від проїзду ТЗ (є беззаперечно важливим чинником ефективності систем *WiM* і водночас – одним із чинників передчасного руйнування покриття) і мають суттєвий вплив на довкілля внаслідок акустичного навантаження (шум) від руху ТЗ та вплив на витрати палива.

У світовій практиці дорожнього будівництва впроваджено розгалужені комплекси нормативних документів – міжнародних та регіональних – стосовно зазначених вище питань, відповідно до чого в статті пропонується загальний аналіз основних положень поширених стандартних методів визначення параметрів текстури поверхні покриття і опору зсуву. До розгляду і порівняльного аналізу взято методи, що застосовують під час обстеження мережі доріг, тобто такі, що реалізуються із застосуванням автоматичного обладнання та забезпечують відносно високу швидкість виконання великого обсягу вимірювань. Розглянуто також можливості застосування результатів математичного аналізу параметрів текстури (профілю) поверхні покриття дорожнього одягу.

Аналіз характеристик поверхні покриття залежно від шкал довжини хвилі

Здатність покриття дорожнього одягу забезпечувати опір зсуву визначається текстурою поверхні. Текстура поверхні покриття дорожнього одягу класифікується за трьома категоріями відповідно до шкал довжини хвилі – відстані між суміжними найвищими точками шорсткостей поверхні, які піддаються вимірюванню [1].

Згідно з наведеною в першоджерелі [2]¹ інформацією міжнародні стандарти серії ISO 13473 установлюють класифікацію текстури поверхні покриття дорожнього одягу відповідно до шкал довжини хвилі λ і амплі-

туди A шорсткостей поверхні наступним чином:

- мікротекстура: $\lambda < 0,5$ мм, $A = (1 \div 500)$ мкм;
- макротекстура: $0,5$ мм $< \lambda < 50$ мм, $A = (0,1 \div 20)$ мм;
- мегатекстура: 50 мм $< \lambda < 500$ мм, $A = (0,1 \div 50)$ мм.

Параметри мікротекстури визначаються характеристиками заповнювачів – мінералогією, петрологією та джерелом походження (природні або штучні кам'яні матеріали) – тобто характеристиками поверхні власне заповнювачів. Параметри макротекстури визначаються, наприклад, розміром та взаєморозташуванням частинок заповнювачів; для асфальтобетонів з погляду макротекстури визначальним є склад – зокрема гранулометричний – суміші і форма частинок заповнювача, для бетонів – методи текстурування поверхні покриття [2]. Згідно з даними [6] мікротекстура є визначальним чинником розвитку сил тертя за малих швидкостей руху ТЗ; макротекстура є домінуючим чинником розвитку сил тертя за високої швидкості руху ТЗ по вологій поверхні покриття.

Параметри профілю на рівні мегатекстури перебувають поза межами вимірювання більшості широко та усталено застосовуваних стандартних приладів і техніки. У категорії мегатекстури автори [3] виокремлюють інтервал довжини хвилі від 50 мм до 100 мм як такий, що відповідає розмірності відбитку коліс ТЗ – від легкового автомобіля до великовагових вантажних ТЗ; внаслідок цієї співрозмірності параметри профілю поверхні в зазначеному інтервалі λ визнано такими, що відповідають за виникнення ефекту динамічного впливу (*dynamic effect; dynamic loads*) під час руху ТЗ. Внаслідок вертихальних осциляцій ТЗ у русі навантаження перевищують статичні навантаження на (10 – 20) %, що відповідає збільшенню кількості еквівалентів стандартного навантаження на вісь ТЗ (*ESAL, equivalent standard axle load*) у межах від 30 % до 40 % та призводить до передчасного руйнування конструкції дорожнього одягу. Ефект динамічного впливу негативно впливає на точність систем *WiM* [7].

¹ Згідно з інформацією [3, 4] асоціація *PIARC* запровадила розглянуту класифікацію рівнів текстури а також поняття нерівності покриття (*unevenness*), де остання ідентифікується за значень $\lambda > 500$ мм. Додатково – автори [5] вказують, що для значень $\lambda > 500$ мм амплітуда становить понад 50 мм.

Важливо, що шорсткості поверхні в межах мегатекстури можуть утворюватися не тільки внаслідок зносу покриття, але й виявляються на покриттях дорожнього одягу в доброму стані (*in good conditions*) та на нових, щойно влаштованих покриттях [3]. Так, прояви мегатекстури можуть бути побічним продуктом технологій створення макротекстури, таких як влаштування поверхневих обробок, технологій *stripped concrete* – коли забезпечується експозиція заповнювачів на поверхні бетонного покриття, а також можуть утворюватися внаслідок вібрації укладача, роботи вирівнювального бруса тощо.

Різні рівні текстури поверхні покриття впливають на такі важливі параметри, як опір коченню колеса, або опір коченню (*rolling resistance*), і опір зсуву.

Опір коченню за неналежних характеристик поверхні покриття дорожнього одягу може підвищуватися на 47 %, що впливає на витрати пального. Згідно з [3] на опір коченню можуть впливати різні рівні текстури, проте максимальний вплив має мегатекстура – так, за швидкості руху ТЗ 50 км/год значення коефіцієнта опору коченню максимально корелює з параметрами шорсткостей мегатекстури за значень $\lambda = 80$ мм.

Опір зсуву безпосередньо впливає на безпеку за умов руху ТЗ по вологій поверхні дорожнього покриття. У разі належної рів-

ності в поперечному напрямку опір зсуву вологої поверхні покриття обумовлений двома рівнями текстури: шорсткості мікротекстури забезпечують належний коефіцієнт тертя внаслідок руйнування поверхневої плівки води й утримання адгезії між поверхнями шини і покриття, а шорсткості макротекстури забезпечують дренальний ефект за умов витискування води колесом, що усуває можливість виникнення гідродинамічного тиску – чинника аквапланування (*aquaplaning; hydroplaning*). Згідно з даними, наведеними в [3], за результатами експериментальних досліджень (профілометрія) зміна коефіцієнта бічного зусилля (*side force coefficient*) за зміни швидкості руху з 20 км/год до 80 км/год максимально корелює з параметрами шорсткостей макротекстури за значень $\lambda = 20$ мм; отримані експериментальним шляхом дані корелюють з результатами виконаних раніше теоретичних досліджень, згідно з якими максимальна ефективність водовідведення на поверхні контакту шина/покриття забезпечується, коли шорсткості макротекстури відтворюються в інтервалі λ від 8 мм до 16 мм.

Стосовно керованості ТЗ (*road hold; road-holding ability*) зазначається, що критичними визнано параметри нерівності за значень $\lambda > 0,5$ м.

Як зазначають автори [3], доцільно виді-

ляти дві категорії «нерівномірностей» (*irregularities*) поверхні покриття (рис. 1) – такі, що потрібно регламентувати з метою забезпечення позитивного впливу на певні показники, і такі, що підлягають усуненню, є небезпечними; границя цих двох категорій відпові-

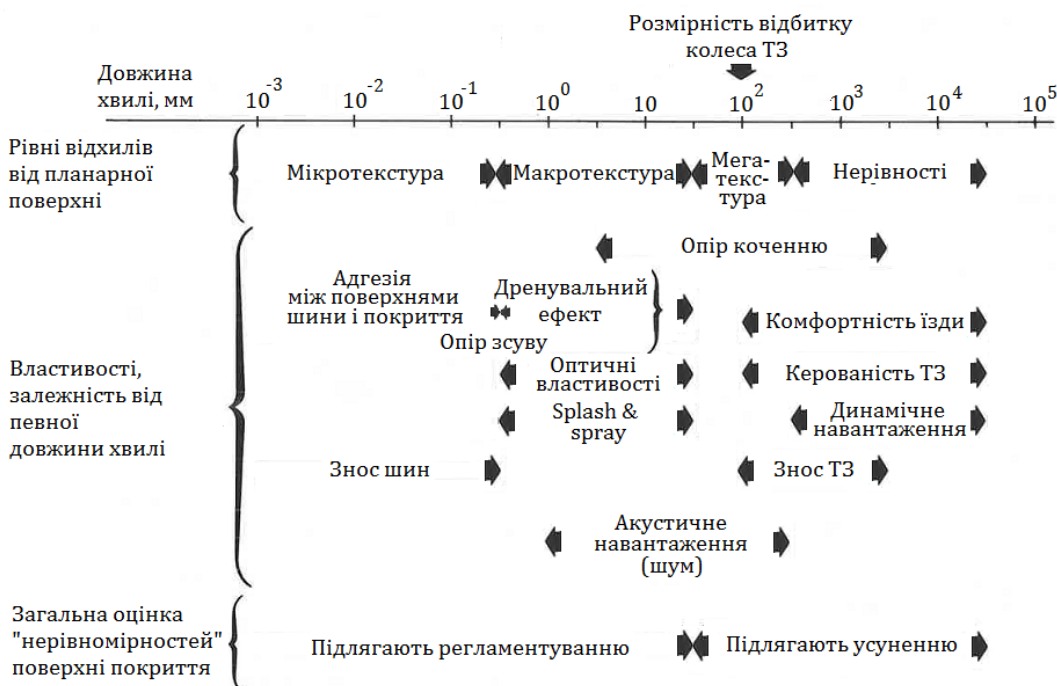


Рис. 1. Параметри, що залежать від рівнів текстури та нерівності поверхні дорожнього покриття

дає довжині хвилі орієнтовно 50 мм.

Поряд із проаналізованими вище параметрами та їх залежністю від рівнів текстури, на **рис. 1** зазначено оптичні властивості поверхні покриття (ураховуючи яскравість, освітленість) й здатність до утворення відблисків та водяних струменів і бризок (*splash and spray*); для другого випадку автори [3] зазначають, що така здатність буде знижуватися, якщо поверхня покриття забезпечує мінімізацію товщини плівки води та відведення води в площі контакту шина/покриття, тому макротекстура беззаперечно впливає на відповідні характеристики.

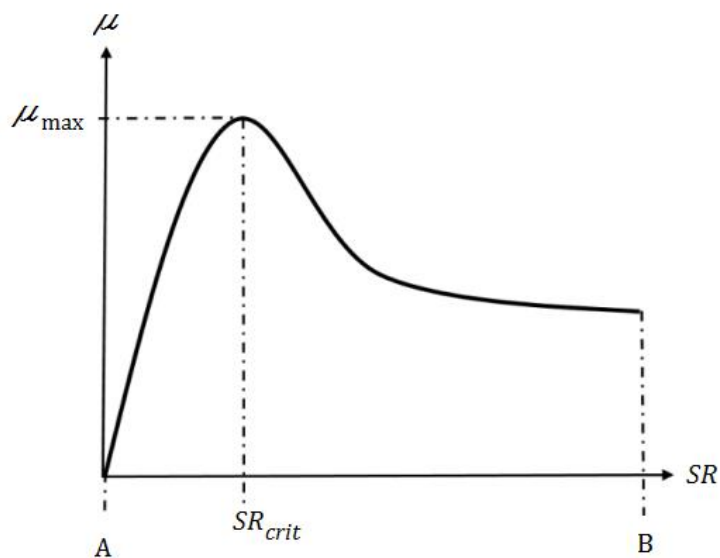
Стандартні методи визначання опору поверхні покриття зсуву колеса транспортного засобу

Автори [6] описують опір зсуву як частку сили тертя на поверхні контакту шина/покриття, яка забезпечується характеристиками поверхні покриття дорожнього одягу – на відміну від зчеплення, яке розвивається на поверхні контакту шини з певними характеристиками з певним покриттям за певних умов.

У разі визначання опору зсуву стандартні вимірювання виконують за умов сталих значень потенційно варіабельних чинників, щоб ізолювати й визначити вклад, який вносять власне характеристики поверхні покриття дорожнього одягу. Доцільно зазначити, що для створення таких умов використовують, зокрема, випробне колесо, шина якого не має протекторного рисунку (колесні шини без протекторного рисунку є більш чутливими до макротекстури, з протекторним рисунком – до мікротекстури) [1]; поряд з цим із практичного погляду такий підхід уможливорює моделювання найбільш складного випадку розвитку опору зсуву [6].

Принципи роботи обладнання для визначання сили тертя в поздовжньому напрямку (*longitudinal friction*) базуються на моделюванні частки процесу гальмування ТЗ, що рухається по прямій [6]. Під час гальмування утворюється гальмівний момент, унаслідок якого зменшується кутова швидкість колеса; в разі, коли кутова швидкість стає нижчою ніж швидкість руху ТЗ, колесо переходить до ковзання по поверхні

покриття, генеруючи сили тертя в місці контакту (в екстремальних випадках колесо припиняє обертатися). Часткове моделювання такого процесу полягає в відтворенні відношення до швидкості руху ТЗ, за якого колесо продовжує обертатися – відповідна величина, згідно з інформацією [6], характеризується як коефіцієнт ковзання *SR* (*slip ratio*), проте для обладнання з визначання опору зсуву *SR* переважно виражається в відсотках. Сила тертя в поздовжньому напрямку залежить від навантаження на колесо й від коефіцієнта тертя в поздовжньому напрямку μ (згідно з [6] позначається як *LFC* – *longitudinal friction coefficient*; використані першоджерела тяжіють до різних систем стандартизації); на **рис. 2** представлено загальний характер залежності значень μ від *SR* згідно з [1].



A – вільне кочення колеса; B – повне блокування колеса

Рис. 2. Загальний характер залежності коефіцієнта тертя в поздовжньому напрямку μ від коефіцієнта ковзання *SR* у стані гальмування ТЗ [1]

Значення *SR* варіюється від 0 до 1 (або від 0 % до 100 %), де нульові значення відповідають вільному коченню колеса, одиниця (або 100 %) відповідає повному блокуванню колеса. До початку процесу гальмування, коли кутова швидкість колеса та швидкість руху ТЗ практично однакові, значення μ та *SR* близькі до нуля. Із включенням гальма μ різко зростає до значення μ_{max} , яке згідно з твердженням авторів [1] спостерігається за значень *SR* від 15 % до 20 %.

У світовій практиці для визначання *LFC* поширеним є застосування обладнання за типом обладнання *GripTester* (монтується переважно на причепі). Цей метод було розроблено для виконання випробувань на плитах вертодромів, проте він є застосовним на дорогах та на злітно-посадкових смугах летищ. Стандартні вимоги до умов випробування із застосуванням *GripTester* згідно з [6] наведено в **табл. 1**.

Таблиця 1

Стандартні умови випробування з застосуванням *GripTester* згідно з [6]

Параметр, одиниця вимірювання	Значення параметра
Температура повітря, °C	> 4
Температура покриття, °C	понад 5 до 50
Окремі характеристики випробного колеса	колесо діаметром 254 мм з пневматичною шиною без протекторного рисунка, тиск повітря в шині 0,14 МПа
Коефіцієнт ковзання (наведено в відсотках)	15 (постійне значення)
Статичне навантаження на випробне колесо, Н	250 ± 20
Робоча швидкість, км/год	від 5 до 100
Теоретична товщина плівки води на поверхні покриття, мм	0,5
Мінімальна довжина відрізку дороги для реєстрації результатів, м	10, 20 або інше – опціональна величина

Принципи роботи обладнання для визначання сили тертя в поперечному напрямку (*transverse friction; sideway friction*) базуються на моделюванні частки процесу руху колеса за кривою. В момент входження ТЗ в поворот утворюється певний кут між напрямком руху ТЗ та напрямком передніх коліс – кут ковзання (*slip angle*).² Утворення такого кута супроводжується розвитком сили тертя; якщо відцентрова сила перевищує силу тертя, колесо переходить до ковзання по поверхні покриття – ця частка процесу підлягає моделюванню відповідним обладнанням; важливим є визначання впливу кута ковзання на коефіцієнт тертя в

бічному напрямку *SFC* (*sideway friction coefficient*) – згідно з [1] позначається η .

Автори [1] вказують, що загальні закономірності розвитку залежності значень η від кута ковзання повторюють закономірності залежності « μ/SR ». Згідно з даними [1, 6] максимальне значення η спостерігається за значень кута ковзання від 4° до 7° для легкових автомобілів та від 6° до 10° – для вантажних автомобілів.

У світовій практиці широко застосовують метод визначання *SFC* з використанням обладнання *SCRIM* (*sideway-force coefficient routine investigation machine*) [1, 6]. Як зазначають автори [6], цей метод було розроблено для випробувань на поверхні покриття дорожнього одягу, проте він також є придатним для інших об'єктів – наприклад, злітно-посадкових смуг. Вимірювання виконують на зволоженій поверхні за постійної швидкості руху *SCRIM*. Згідно з [6] в окремих системах стандартів впроваджено вимоги до умов випробування, як наведено в **табл. 2**.

Таблиця 2

Стандартні умови випробування з застосуванням *SCRIM* згідно з [6]

Параметр, одиниця вимірювання	Значення параметра
Температура повітря, °C	> 4
Температура покриття, °C	понад 5 до 50
Окремі характеристики випробного колеса	колесо 76/508 мм з пневматичною шиною без протекторного рисунка, тиск повітря в шині 0,35 МПа
Кут ковзання, град	20
Статичне навантаження на випробне колесо, Н	1960
Робоча швидкість, км/год	50 (може варіюватися з приведенням результатів вимірювань до референтної швидкості)
Теоретична товщина плівки води на поверхні покриття, мм	0,5
Мінімальна довжина відрізку дороги для визначення усереднених значень результатів, м	10

² Згідно з [6] потрібно розглядати кут між дотичною до напрямку руху ТЗ та напрямком передніх коліс за входження в поворот; у разі, коли вимірювання відбуваються за руху по прямій, потрібний кут фактично є кутом відносно напрямку руху ТЗ.

Випробне колесо монтується між осями передніх та задніх коліс переважно з одного боку залежно від типу регулювання руху (правобічний чи лівобічний) так, щоб наблизити траєкторію випробовування (кочення випробного колеса) до лінії кочення коліс ТЗ на дорозі [6].

SCRIM і *GripTester* класифікують як обладнання для безперервного вимірювання; на відміну від цих методів обладнання з вимірюванням за принципом *LWST* (*locked-wheel skid trailer*) дає змогу отримувати серію окремих результатів, акумульованих внаслідок послідовних циклів блокування колеса. У роботі [1] зазначено, що за швидкості руху *LWST* ~ 65 км/год (40 mph) одне вимірювання припадає орієнтовно на 18 м (59 футів).

Регульовані чинники впливу на параметри текстури поверхні покриття дорожнього одягу та стандартні методи вимірювання і аналізування параметрів текстури

Параметри текстури поверхні покриття дорожнього одягу є такими, що піддаються регулюванню на етапі добирання складу відповідних дорожньо-будівельних матеріалів (сумішей), а також шляхом текстурування – у разі бетонного покриття, в процесі експлуатації параметри текстури змінюються внаслідок зносу; для покриттів на основі бітумних в'язучих ці зміни на певному етапі можуть мати позитивний вплив.

У разі влаштування поверхневих обробок важливим є вибір крупних заповнювачів – згідно з даними [6] у складі таких матеріалів рекомендовано використовувати заповнювачі з показником опору поліруванню $PSV > 50$, оскільки в даному випадку мікротекстура забезпечується власне характеристиками поверхні крупних заповнювачів. Для шару покриття дорожнього одягу з окремих видів асфальтобетонів з високим відносним умістом дрібнозернистої складової мікротекстура утворюється зернами дрібного заповнювача. Крім того, як зазначають автори [6], на поверхні свіжовлаштованого шару покриття на основі бітумного в'язучого мікротекстура переважно закрита бітумом; надлишок бітуму видаляється під впливом контакту з колесами ТЗ, старіння бітуму, й відкриває мікротекстуру;

швидкість перебігу таких процесів залежить від типу матеріалу, інтенсивності транспортного потоку і погодно-кліматичних умов. У разі застосування в верхньому шарі ЦМА або пористого асфальтобетону відбувається утворення «негативної» текстури – такої, що функціонує завдяки порожнинам під поверхнею заповнювачів, що особливо стосується процесів водовідведення.

Для бетонних покриттів на початкових етапах експлуатації склад бетону не має суттєвого впливу на текстуру поверхні. Мікротекстура поверхні бетонного покриття певною мірою визначається характеристиками дрібного заповнювача, його стійкістю до полірування, особливо в разі використання відсівів дроблення гірських порід. У процесі експлуатування покриття і викришування цементного розчину більшого значення – з погляду забезпечення текстури – набувають характеристики крупних заповнювачів. Також автори [6] вказують, що згідно з досвідом німецьких колег наявність на поверхні шару бетонного покриття тонкого шару цементного розчину з високим відносним умістом дрібнозернистих складових виявляє позитивний вплив на розвиток у часі текстури поверхні і опору зсуву.

Традиційною формою звітування щодо параметрів текстури поверхні покриття є її відображення в значеннях середньої величини заглиблень профілю (*MPD, mean profile depth*), середньоквадратичної шорсткості (*root mean square roughness*), гідравлічного радіусу або інших характеристик, які проте не повністю відображають вклад параметрів текстури поверхні в функціонування покриття дорожнього одягу – наприклад, поверхні з різною текстурою можуть характеризуватися ідентичними значеннями *MPD* [6, 8].

Сучасні стандартні методи визначання параметрів текстури поверхні дорожнього одягу дозволяють отримувати просторові дані щодо амплітуди шорсткостей поверхні як функції довжини (відстані) вздовж прямої або вигнутої траєкторії на покритті. Зазначені методи базуються на результатах просторового частотного аналізу параметрів профілю поверхні, де широко застосовується, наприклад, аналізування методом Фур'є-перетворення: згідно з теорією Фур'є

будь-який сигнал може бути представлено як суму синусоїдальних хвиль різних амплітуд і частот; застосування Фур'є-перетворення дає змогу визначити амплітуду та частоту таких синусоїд за результатами вимірювання профілю поверхні.

Стандартизованим підходом до просторового спектрального (частотного) аналізування двовимірних параметрів текстури поверхні дорожнього покриття є метод дискретного Фур'є-перетворення, згідно з яким приймається, що вхідний сигнал відтворюється з періодичністю, яка дорівнює тривалості сигналу [8]. Поряд з виконанням дискретного Фур'є-перетворення в цілях стандартного просторового аналізування двовимірних параметрів текстури застосовують, за сталої ширини смуги виділення частотного спектру³, аналогові або цифрові фільтри відповідно до [9].

До стандартних методів вимірювання параметрів текстури (профілю), які є застосовними для мобільного обладнання, відносяться контактний – механічний, а також безконтактні методи цифрових зображень і лазерного сканування – останнє виконується лінійним лазером або лазерним приладом з круговим захватом (*CTM, circular track meter*, стандарт системи *ASTM*). Доцільно додати, що метод *CTM* дає змогу вимірювати параметри текстури аналогічно до методу піщаної плями – на відміну від цього лінійний лазер дає змогу вимірювати параметри в межах вертикального профілю. Зазначені методи можуть бути охарактеризовані як методи прямого вимірювання текстури.

Певні типи профілометрів установлено в стандарті [10]. Найбільш точним та таким, що забезпечує високу швидкість вимірювань, є метод лазерного сканування. Метод механічного (контактного) вимірювання профілю, не зважаючи на високий рівень відтворюваності, не є широко застосовним – точність методу залежить від швидкості руху, характеристик контактної штифта та схильності штифта до ушкоджень і стирання [8].

Застосування результатів частотного (спектрального) аналізу параметрів текстури/профілю

Окремо розглянемо загальні можливості застосування результатів Фур'є-перетворення (результатів сканування профілю поверхні) у вигляді спектрального розподілу щільності *PSD (power spectral density)*, який є однією з найбільш важливих характеристик поверхонь з хаотичною шорсткістю текстури. Шляхом нормалізації *PSD* з подальшим порівнянням середньоквадратичних відхилів може бути виконано порівняння мікротекстури поверхні покриття на об'єкті за різних строків/умов експлуатації, або мікротекстури заповнювачів із різними характеристиками поверхні, або інше [2]. Процедура аналізування *PSD* є регламентованою міжнародним стандартом *ISO* [11].

Згідно з даними авторів [12] результати виведення спектрального розподілу щільності застосовують для обчислення міжнародних критеріїв рівності поверхні покриття дорожнього одягу на підставі моделі напівактивної підвіски, яка базується на припущенні, що нерівності поверхні можуть бути описані рівномірним Гауссовим розподілом. Так, Світовим Банком у цілях аналізування статистичних даних щодо їздових якостей автомобільних доріг⁴ був рекомендований критерій непрямого оцінювання рівності покриття *ARS (average rectified slope)*, який представляє середнє, за довжиною, абсолютних значень відносного зміщення непружно закріпленої маси модельного ТЗ з напівактивною підвіскою та який пов'язаний з критерієм *ARV (average rectified velocity)*, що є відповідним середнім значенням у часі, рівнянням (1):

$$ARV = v \cdot ARS = \frac{2}{\sqrt{\pi \cdot v}} \cdot \int_0^{\infty} \omega^2 \cdot |H_s(\omega)|^2 \cdot S_{\zeta}(\Omega) \cdot d\omega, \quad (1)$$

де v – швидкість руху (лінійна);

ω – кутова швидкість;

H_s – функція частотного відклику пружно закріпленої маси;

$S_{\zeta}(\Omega)$ – рівність поверхні за показниками *PSD*, представлена через поняття хви-

³ У всіх відповідних стандартних методах частотного аналізування практикують виділення за сталим відсотком ширини смуги чи однієї третини октави.

⁴ Вимірювання виконують за швидкості 80 км/год.

льового числа, де Ω – просторова частота ($S_{\zeta}(\Omega) = PSD$).

Водночас виведено взаємозв'язок між PSD як прямим критерієм рівності поверхні покриття та показником IRI (*International Roughness Index*, міжнародний індекс рівності) як непрямим критерієм рівності покриття – відомо, що IRI характеризує відклик випробного обладнання на нерівності поверхні покриття, проте не характеризує власне поверхню. Авторами [12] для описання зв'язку IRI з просторовою частотою запропоновано рівняння (2):

$$IRI = \frac{2}{\sqrt{\pi \cdot v}} \cdot \int_0^{\infty} \omega^2 \cdot |H_s(\omega)|^2 \cdot S_{\zeta}(\Omega) \cdot d\omega. \quad (2)$$

Автори дослідження наголошують, що рівняння (1) та (2) є застосовними в широкому діапазоні умов (стану) покриття; також ці рівняння дають змогу виводити ARV , ARS та IRI за відсутності часових доменів даних прямого оцінювання рівності покриття (PSD).

У **табл. 3** наведено класифікацію ISO покриттів автомобільних доріг за значенням IRI , як її було встановлено різними організаціями: BPR (*Bureau of Public Roads*) та $HSRI$ (*Highways Safety Research Institute*).

Таблиця 3

Класифікація ISO покриттів автомобільних доріг за показником IRI [12]

Класи покриття	IRI_{HSRI} , м/км	IRI_{BPR} , м/км
Very good/Дуже добре	0,60	0,68
Good/Добре	1,20	1,37
Average/Середнє	2,41	2,73
Poor/Погане	4,81	5,47
Very poor/Дуже погане	9,62	10,94

Передумовою встановленої в **табл. 3** класифікації є те, що магнітуда коливань поверхні покриття визначається виключно параметрами шорсткостей; також потрібно співвідносити форми функцій, які застосовують для виконання регресійного аналізу за даними PSD (опис функцій відповідно до

класифікації **табл. 3** наведено в [12]). Підкреслюється, що класифікація ISO поверхні покриття дорожнього одягу потребує критичної частоти фільтру (*cutoff frequency*) 2 цикли/метр – такий рівень критичних частот не охоплює дефекти поверхні, спричинені тріщинуватістю, ямковістю, напливами тощо.

Значення IRI безпосередньо пов'язані з обмеженням швидкості руху на автомобільних дорогах, а також є застосовними для моделювання руху ТЗ за різних умов, зокрема по бездоріжжю (конструкторські роботи). Стосовно обмежень за швидкістю руху на автомобільних дорогах доцільно зазначити, що в роботі [13] наведено значення IRI в межах (1,55 – 1,86) м/км як таке, що забезпечує прийнятну швидкість руху ТЗ (за класифікацією ISO покриття відповідає класу *average*); автори [14] наводять такі цифри: за значень IRI не більше ніж 1,32 м/км обмеження за швидкістю руху становлять 72,4 км/год (45 *mph*) (дані американських колег, бетонне покриття).

Висновки

Одним із критичних чинників впливу на безпеку доріг є текстура поверхні покриття дорожнього одягу, яка визначає важливу характеристику – опір поверхні покриття зсуву колеса транспортного засобу, або опір зсуву – *skid resistance*.

Відповідно до інтервалу повторюваності шорсткостей текстури виділяють шкали довжини хвилі і, відповідно, характеристики покриття: мікротекстура, макротекстура, мегатекстура і нерівності поверхні покриття (*unevenness*), де останні реєструються за довжини хвилі понад 0,5 м.

Основний вклад у розвиток опору зсуву вносить мікро- та макротекстура. Мегатекстура, на відміну від інших рівнів текстури, є характеристикою поверхні покриття, яка не піддається прямому вимірюванню, проте суттєво впливає на їздові якості покриття, опір коченню, динамічне навантаження та рівень акустичного навантаження (шум) – такий вплив пояснюється співрозмірністю мегатекстури в інтервалі довжини хвилі (50 – 100) мм з відбитком колеса ТЗ. Прояви мегатекстури можуть бути побічним

ефектом технологій створення макротекстури.

Сучасні методи вимірювання параметрів для визначання характеристик поверхні покриття забезпечують високу швидкість виконання значного обсягу вимірювань із застосуванням автоматичного обладнання. Опір зсуву визначають за результатами вимірювання сили тертя різними типами обладнання, з моделюванням частки процесу руху ТЗ за прямою або за входження в поворот, із забезпеченням сталих значень потенційно варіабельних чинників – щоб виділити та визначити вклад власне характеристик поверхні покриття в розвиток опору зсуву колеса ТЗ.

У частині текстури розгорнутий аналіз забезпечується застосуванням тривимірного частотного аналізування переважно двовимірних параметрів профілю за результатами обстеження стандартними типами профілометрів – застосовують метод Фур'є-перетворення або аналогові чи цифрові фільтри. За результатами частотного аналізу профілю поверхні покриття визначають спектральний розподіл щільності, який дає змогу виводити показники непрямого оцінювання рівності покриття, прийняті на міжнародному рівні.

References

1. Izeppi, E.L., Flintsch, G., Katicha, S., McGhee, K., and McCarthy, R. (2019). Locked-Wheel and Sideway-Force CFME Friction Testing Equipment Comparison and Evaluation Report. Report FHWA-RC-19-001, 48. Retrieved September 27, 2023 from <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/management/pubs/fhwa-rc19001.pdf>
2. Kouchaki, S., Roshani, H., Hernandez, J.B., Prozzi, J.A. (2018). Characterization of Aggregate Texture and Correlation with Surface Skid Resistance. Technical Report 0-6878-3, 68. Retrieved September 27, 2023 from <https://library.ctr.utexas.edu/ctr-publications/0-6878-3.pdf> (дата звернення 27.09.2023 р.)
3. Descornet, G. (1989). A Criterion for Optimizing Surface Characteristics. Transportation Research Record 1215, 173 – 177. Retrieved October 10, 2023 from <https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1989/1215/1215-019.pdf> (дата звернення 10.10.2023 р.)
4. Wasilewska, M., Gardziejczyk, W., Gierasimiuk, P. (2016). Evaluation of skid resistance using CTM, DFT and SRT-3 devices. Transportation Research Procedia 14, 3050 – 3059. Retrieved October 10, 2023 from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146516304562>
5. Mataei, B., Zakeri, H., Zahedi, M., Nejad, F.M. (2016). Pavement Friction and Skid Resistance Measurement Methods: A Literature Review. Open Journal of Civil Engineering, 6, 537-565. Retrieved September 21, 2023 from https://www.researchgate.net/publication/307868187_Pavement_Friction_and_Skid_Resistance_Measurement_Methods_A_Literature_Review
6. Labbato, A. (2001). A classification of asphalt surfacing textures based on 3D imagery. Anno Accademico, 152. Retrieved September 27, 2023 from <https://core.ac.uk/download/pdf/11807656.pdf>
7. Tetiana Tereshchenko. (2023). Efektyvnist' zastosovannya system WIM na avtomobil'nykh dorohakh. Svitova praktyka. Dorohy i mosty. [The efficiency of WIM-systems application on motor roads. World-wide practice. Roads and bridges]. Kyiv, 27, 279–288 [in Ukrainian].
8. Siyu Chen, S., Liu, X., Luo, H., Yu, J., Fuda Chen, F., Zhang, Y., Ma, T., Huang, X. (2022). A state-of-the-art review of asphalt pavement surface texture and its measurement techniques. Journal of Road Engineering, 2, 156–180. Retrieved October 19, 2023 from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2097049822000208>
9. International Organization for Standardization. (2008). ISO/TS 13473-4:2008 Characterization of pavement texture by use of surface profiles — Part 4: Spectral analysis of surface profiles. International Organization for Standardization Chemin de Blandonnet 8 CP 401 - 1214 Vernier, Geneva, Switzerland, 35. Retrieved September 21, 2023 from <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:40279:en>
10. International Organization for Standardization. (2002). ISO 13473-2:2002 Characterization of pavement texture by use of surface profiles — Part 2: Terminology and basic requirements related to pavement texture profile analysis. International Organization for Standardization Chemin de Blandonnet 8 CP 401 - 1214, Vernier, Geneva, Switzerland, 17. Retrieved September 21, 2023 from <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:13473:-2:ed-1:v1:en>
11. International Organization for Standardization. (2016). ISO 8608:2016 Mechanical vibration — Road surface profiles — Reporting of measured data. International Organization for Standardization Chemin de Blandonnet 8 CP 401 - 1214 Vernier, Geneva, Switzerland, 36. Retrieved September 21, 2023 from <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:8608:ed-2:v1:en>
12. Sun, L., Zhang, Z., and Ruth, J. (April, 2001). Modeling Indirect Statistics of Surface Roughness. Journal of Transportation Engineering, 105 – 111. Retrieved September 29, 2023 from https://www.researchgate.net/publication/238180752_Modeling_Indirect_Statistics_of_Surface_Roughness
13. Wu, Z., Rupnow, T., Mahdi, M.I. (2017). Roller Compacted Concrete over Soil Cement under Accelerated Loading. Report No. FHWA/LA.16/578. 2017, 108. Retrieved July 28, 2023 from https://www.researchgate.net/publication/283861859_Roller_Compacted_Concrete_over_Soil_Cement_under_Accelerated_Loading
14. Zollinger, C. (2013). Recent advances and uses of roller compacted concrete pavements in the United States. Paving Solutions, CEMEX, Inc, Houston, TX USA, 13. Retrieved July 28, 2023 from <https://rccpavementcouncil.org/wp-content/uploads/2016/08/Recent-Advances-Uses-of-RCC-in-US.pdf>