https://doi.org/10.36100/dorogimosti2023.27.145

УДК 625.7/.8

Терещенко Т. А., *канд. хім. наук, https://orcid.org/0000-0001-5206-9921*
Цинка А. О., *канд. техн. наук., https://orcid.org/0000-0002-0357-2325*
Ілляш С. І., *канд. техн. наук, https://orcid.org/0000-0002-3001-8012*
Зеленовський В. А., *https://orcid.org/0000-0001-5834-5456*

Державне підприємство «Державний дорожній науково-дослідний інститут імені М. П. Шульгіна» (ДП «ДержДорНДІ»), м. Київ, Україна

МОЖЛИВОСТІ ПРОЄКТУВАННЯ НЕУКРІПЛЕНИХ ОСНОВ НЕЖОРСТКИХ ДОРОЖНІХ ОДЯГІВ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ВИВЧЕННЯ ДЕФОРМАЦІЙНОЇ ПОВЕДІНКИ ДИСПЕРСНИХ СУМІШЕЙ

Анотація

Вступ. Висвітлено роль моделювання деформаційної поведінки дисперсних сумішей (ДС) під дією повторюваних механічних навантажень як одного з ключових аспектів проєктування нежорсткого дорожнього одягу з неукріпленими шарами основи у зв'язку з тим, що неукріплені ДС є найбільш «уразливими» матеріалами нежорсткого дорожнього одягу за умов впливу негативних кліматичних (сезонних) або техногенних факторів.

Проблематика. Проблематика статті стосується вирішення питань, обумовлених нестабільною деформаційною поведінкою ДС в неукріплених шарах основи, додаткової основи під час проєктування та експлуатації нежорсткого дорожнього одягу.

Мета. Основною метою статті є виконання аналітичного огляду теоретичних засад конструювання та розрахунку неукріпленої основи нежорсткого дорожнього одягу за результатами вивчення, з подальшою категоризацією, деформаційної поведінки ДС. Результати аналітичного огляду призначені для застосування в процесі впровадження розроблюваного національного стандарту стосовно методу випробувань дисперсних сумішей циклічним всебічним стиском, ідентичного відповідному європейському стандарту.

Результати. Розглянуто концепцію осідання (shakedown concept), яка уможливлює категоризацію та належний вибір ДС під час проєктування та будівництва дорожнього одягу. Визначено, що концепція осідання встановлює три типи пластичної поведінки ДС, які, виключно після випробування методом циклічного всебічного стиску, з урахуванням вихідних даних проєктування, можуть бути категоризовані як стабільні або нестабільні.

Також виконано аналітичне порівняння різних можливих підходів до категоризації ДС у рамках концепції осідання. Стандартизований підхід передбачає встановлення границь трьох категорій за прогресивно зростаючих напружень, з урахуванням обмежень щодо накопичених осьових пластичних деформацій. Інший підхід може бути потенційно ефективним для вибору ДС і базується на швидкості накопичення осьової пластичної деформації за один цикл навантажування.

Далі розглянуто аспекти емпіричного методу проєктування нежорстких дорожніх одягів, де деформаційну поведінку ДС, за допомогою методу скінченних елементів, було адаптовано для розрахунку розподілу напружень та моделювання розвитку колії у неукріпленому шарі основи з урахуванням змінних товщини асфальтобетонного покриття та кліматичних факторів.

Висновки. Результати вивчення деформаційної поведінки дисперсних сумішей методом циклічного всебічного стиску дозволяють здійснювати категоризацію таких сумішей за пружними або за пластичними властивостями.

Віднесення сумішей до певних категорій згідно з концепцією осідання виконують з застосуванням математичної моделі, яка базується на залежності максимального осьового напруження в зразку під час випробувань від його відношення до напруження обмежувального стискання. Потенційно перспективними є інші методи категоризації сумішей згідно з концепцією осідання — наприклад, категоризація відповідно до швидкості осьового пластичного деформування.

Забезпечення стабільної деформаційної поведінки ДС, у межах вихідних даних, дозволяє реалізувати ефективний простий метод проєктування, який не потребує розрахунку пластичних деформацій неукріпленого шару основи або будь-яких подальших обмежень навантаження.

Ключові слова: дисперсна суміш, деформаційні властивості, нежорсткий дорожній одяг, неукріплена основа, проєктування.

Вступ

Проєктування дорожнього одягу спрямоване на забезпечення роботи конструкції протягом установленого періоду експлуатації з дотриманням вимог надійності, з урахуванням оптимізації економічних чинників шляхом вибору матеріалів та відповідного розрахунку товщини шарів дорожнього одягу. Для нежорстких дорожніх одягів критичним є конструювання та розрахунок неукріплених шарів основи/додаткової основи (далі — основи) з дисперсних сумішей, які є найбільш чутливими до дії сезонних або техногенних чинників внаслідок суттєвого впливу на їх деформаційну поведінку. Дисперсні суміші за умов експлуатації в конструкції нежорсткого дорожнього одягу характеризуються в'язко-пружними властивостями; розвиток пружних та пластичних деформацій в шарі дисперсної основи впливає на розвиток втомних тріщин й утворення колії в асфальтобетонних шарах [1–3]. Неналежне урахування деформаційної поведінки дисперсних сумішей під час проєктування може призводити до руйнування дорожнього одягу від навантажень, що відповідають проєктним.

У світовій практиці дорожнього будівництва найбільш поширеними є емпіричний та механістично-емпіричний методи проєктування дорожніх одягів. До недоліків емпіричного методу відноситься обмеженість вихідних даних, які ураховують виключно умови, за яких їх було отримано. Механістично-емпіричний метод (Mechanistic-Empirical Pavement Design, MEPD) уможливлює проєктування з реалізацією максимально можливого строку служби дорожнього одягу та є більш поширеним. До недоліків цього методу потрібно віднести недостатньо повне урахування показників міцності матеріалів, зокрема таких, що залежать від пластичних властивостей — що стосується й колієутворення в нежорстких дорожніх одягах [4].

Поряд з цим у проєктуванні нежорстких дорожніх одягів набуває поширеного впровадження концепція осідання (shakedown concept), яка достатньо повно ураховує пластичні властивості дисперсних сумішей під впливом циклічних механічних навантажень, за впливу різних чинників [1–3].

З урахуванням викладеного вище в статті розглянуто підходи до проєктування нежорсткого дорожнього одягу в частині конструювання та розрахунку неукріпленої основи з дисперсних сумішей відповідно до їх пластичної поведінки, з урахуванням категоризації дисперсних сумішей згідно з концепцією осідання. У положеннях статті виокремлено методи вивчення деформаційних властивостей та категоризації дисперсних сумішей згідно з [5] (станом на час роботи над статтею стандарт [5] опрацьовується колективом ДП «ДерждорНДІ» з метою адаптації до системи національних стандартів України).

Теоретичні засади проєктування неукріпленої основи нежорсткого дорожнього одягу відповідно до деформаційної поведінки дисперсних сумішей

Деформаційна поведінка неукріпленого шару дисперсної суміші в шарі нежорсткого дорожнього одягу під впливом циклічних механічних навантажень характеризується нелінійною пружністю [6].

Під впливом навантажень від проходження транспортних засобів у неукріпленому шарі нежорсткого дорожнього одягу утворюються напруження, відповідно до яких розвиваються два види деформації — пружна (зворотна) та пластична (залишкова, незворотна). Частка пластичної деформації для кожного окремого циклу навантажування переважно є незначною, проте критичним є накопичення суттєвих залишкових деформацій за великої кількості циклів навантажування [1].

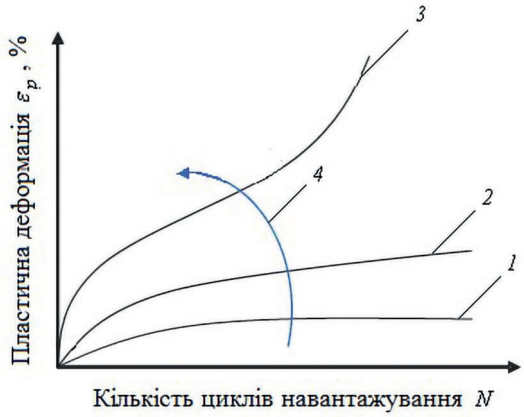
У цілому розвиток пластичних деформацій в ущільненому шарі дисперсної суміші за впливу циклічних механічних навантажень може бути охарактеризовано як такий, що складається з кількох фаз. На початковій фазі відбувається швидке — до певного рівня — зростання пластичних деформацій — цю фазу характеризують як пост-ущільнення, яке супроводжується доущільненням шару суміші, зменшенням об'єму пор та відповідно загальними змінами об'єму. На другій фазі швидкість деформування стає відносно постійною, пов'язаною зі зміною об'єму, але деформації зсуву наростають зі зростаючою швидкістю. Під час руйнування шару суміші спостерігається зсув без будь-яких змін об'єму [1].

Для характеризування поведінки дисперсних сумішей під впливом циклічних механічних навантажень застосовують концепцію осідання [1–3]. Автори цієї концепції вказують, що після проходження періоду пост-ущільнення в шарі дисперсних сумішей встановлюється стабілізований стан рівноваги, який визначається незначним впливом додаткових напружень $\Delta\sigma_1/\sigma_3$, де σ_1 є вертикальне (осьове) напруження, σ_3 є радіальне напруження. У стані рівноваги приріст пластичних деформацій зі зростанням кількості циклів навантажування є незначним. Проте за подальшого підвищення додаткових напружень відбувається різке зростання приросту пластичних деформацій, без стабілізації, що призводить до руйнування [2]. Застосування такої концепції в цілях проєктування передбачає, що потрібно встановлювати максимально допустимий рівень навантаження, який забезпечує пружний відклик неукріпленого шару основи з урахуванням умов експлуатації; перехід від стану рівноваги до нестабільного стану окреслюється граничним рівнем напруження [1–3].

У концепції, адаптованій до проєктування конструкцій нежорсткого дорожнього одягу, пластична поведінка дисперсних сумішей з урахуванням рівня напруження характеризується трьома категоріями, як наведено на **рис. 1**.

Пластична поведінка категорії А – пластичне осідання (plastic shakedown) – спостерігається за відносно низьких (для випробовуваної суміші) рівнів напруження; пластичні деформації накопичуються впродовж обмеженої кількості циклів навантажування та надалі сягають практично постійного рівня (крива 1 на **рис. 1**), фактично забезпечуючи пружний відклик шару суміші за даних умов навантажування. Так, автори [2] зазначають, що після завершення періоду пост-ущільнення та набуття шаром дисперсної суміші пружності пластичні деформації стають незначними, а залежність пластичних деформацій від кількості циклів навантажування набуває форми асимптоти.

За більш високих рівнів напруження спостерігається пластична поведінка категорії В — пластична повзучість (plastic creep), коли з підвищенням кількості циклів навантажування після певної кількості початкових циклів відбувається перехід до накопичення пластичних деформацій практично з постійною швидкістю (крива 2 на **рис. 1**). Для шару суміші категорії В власне осідання не спостерігається — за певної (великої) кількості циклів навантажування починається руйнування [1–3].



1 – верхня границя категорії А; *2* – верхня границя категорії В; *3* – верхня границя категорії С; *4* – зростання рівня напруження

Рисунок 1 — Границі категорій пластичної поведінки дисперсних сумішей, що відображають характер залежності розвитку пластичних деформацій ε_p від кількості циклів навантажування N відповідно до рівня напруження [1]

За подальшого зростання рівнів напруження спостерігається пластична поведінка категорії С — руйнування «за наростаючою» (incremental collapse), коли накопичення пластичних деформацій відбувається зі зростаючою швидкістю та призводить до стрімкого руйнування [1–3].

Криві 1–3 на **рис. 1** є границями описаних категорій, якім відповідає максимально допустимий – для даної категорії, для досліджуваної суміші – рівень напруження. Згідно з [1] категорії відповідають таким умовам пластичного деформування:

– категорія А: $\left\{\varepsilon^1_{p5000}-\varepsilon^1_{p3000}\right\}<0,045\cdot10^{-3}$;

– категорія Б: $045\cdot10^{-3}<\left\{\varepsilon^1_{p5000}-\varepsilon^1_{p3000}\right\}<0,4\cdot10^{-3}$;

– категорія С: $\left\{\varepsilon^1_{p5000}-\varepsilon^1_{p3000}\right\}>0,4\cdot10^{-3}$,

де $\left\{\varepsilon^1_{p5000}-\varepsilon^1_{p3000}\right\}$ — різниця між значеннями пластичної деформації, накопиченої за умови $N = 5\ 000$ та $N = 3\ 000$.

Уточнювати границі пластичного осідання та пластичної повзучості для кожної суміші доцільно методом інтерполяції, забезпечуючи шляхом підвищення напруження деформації ε, дещо більші за вказані вище значення.

Потрібно підкреслити, що дисперсні суміші, віднесені до категорії А, застосовують в запроєктованих конструкціях нежорсткого дорожнього одягу без обмежень, оскільки категорія А характеризується стабільною деформаційною поведінкою; суміші, віднесені до категорії В, застосовують з обмеженням максимальної кількості циклів навантажування, для доріг з відносно низькою інтенсивністю транспортного потоку; суміші категорії С не застосовують [1, 3].

Категоризація дисперсних сумішей за результатами випробувань з вивчення деформаційних властивостей

Для вивчення деформаційних властивостей дисперсних сумішей застосовують методи випробування циклічним всебічним стиском. Випробування полягає в утворенні в циліндричному зразку неукріпленої дисперсної суміші циклічних напружень, які відтворюють діапазон напружень у неукріпленому шарі дорожнього одягу, та у вимірюванні осьових і радіальних деформацій зразка, спричинених таким навантаженням [5]. Результати такого випробування

застосовують, зокрема, для категоризації дисперсних сумішей з метою проєктування.

Основними параметрами, які регламентують навантажування під час випробування, є девіаторне напруження σ_d [1] та напруження обмежувального стискання σ_3. Характер девіаторного напруження є циклічним; обмежувальний тиск (та відповідне напруження) може бути циклічним — таким, що прикладається разом з циклічним осьовим навантажуванням, або є постійним [5].

Відповідно до алгоритму навантажування, методи випробування циклічним всебічним стиском підрозділяються на одно- та багатостадійні. За одностадійною процедурою до кожного зразка прикладають навантаження виключно з забезпеченням однієї повторюваної комбінації напружень. За багатостадійною процедурою до одного й того ж зразка послідовно прикладають навантаження з забезпеченням різних комбінацій напружень [5]. Потрібно зазначити, що багатостадійний метод найбільш повно ураховує передісторію утворення напружень у зразку та є більш застосовуваним; багатостадійні випробування виконуються за постійного обмежувального тиску, розглянуті в цій статті роботи стосуються випробувань дисперсних сумішей багатостадійним методом. Також, згідно з різними системами стандартизації або з дослідницькою метою, різною може бути й загальна конфігурація навантажування: така, що передбачає період спокою (rest period), та така, що не передбачає період спокою [7].

Вибір випробних значень σ_3, σ_d, певним чином — також відношення σ_d / σ_3 — обумовлено вимогами кожної окремої системи стандартизації та проєктування у частині прийнятих розрахункових характеристик матеріалів (з урахуванням, наприклад, товщини відповідного шару згідно з типовими конструкціями дорожнього одягу), кліматичних факторів, характеристик транспортного потоку, розрахункових навантажень на вісь тощо [6]. Таким чином, умови випробування повинні моделювати фізичний стан і напружені стани ущільненого шару дисперсної суміші за умов її експлуатації у шарі дорожнього одягу за впливу навантажень від руху транспортних засобів з урахуванням вихідних даних прийнятої системи проєктування.

За результатами випробування циклічним всебічним стиском визначають пружні та пластичні властивості дисперсних сумішей, проте категоризацію дисперсних сумішей за результатами вивчення пластичної поведінки більш ефективно застосовують у цілях проєктування, та саме таку категоризацію здійснюють відповідно до положень концепції осідання. Нижче розглянуто два підходи до категоризації дисперсних сумішей за результатами вивчення пластичної поведінки: першій ґрунтується на визначанні границь категорій за зростаючих напружень, з урахуванням обмежень за накопиченими пластичними деформаціями (які наведено в розділі «Теоретичні засади проєктування…»), другий ґрунтується на категоризації відповідно до швидкості накопичення осьових (вертикальних) пластичних деформацій.

Категоризацію сумішей шляхом визначання границь категорій з урахуванням обмежень за накопиченими пластичними деформаціями було запропоновано авторами [2] та в подальшому прийнято як рекомендований стандартний метод категоризації [5]. В основу такої категоризації покладено математичну модель (1):

$$\sigma_{1max} = \alpha \cdot \left(\frac{\sigma_{1max}}{\sigma_3} \right)^{\beta}, \qquad (1)$$

де σ_{1max} — найбільше значення осьового напруження ($\sigma_d + \sigma_3$), кПа;

σ_3 — (постійний) обмежувальний тиск середовища камери, кПа;

α — коефіцієнт, прийнятий для моделі, кПа;

β — коефіцієнт, прийнятий для моделі.

[1] Девіаторне напруження σ_d у процесі таких випробувань визначається як різниця між тотальним осьовим напруженням σ_1 та тотальним радіальним напруженням σ_3: $\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$.

Модель (1) застосовують для побудови залежності σ_{1max} від σ_{1max} / σ_3, яка дозволяє визначати, зокрема, границю пластичного осідання за відповідних значень $\left\{\varepsilon^1_{p5000} - \varepsilon^1_{p3000}\right\}$ (див. розділ «Теоретичні засади проєктування…»).

На **рис. 2** наведено приклад категоризації, виконаної авторами [8] для дисперсної суміші з кам'яних матеріалів виверженних порід (гранодіорит, суміш 0/32, уміст води 4 %, випробування виконано згідно зі стандартами системи EN/DIN) із застосуванням математичної моделі (1).[2]

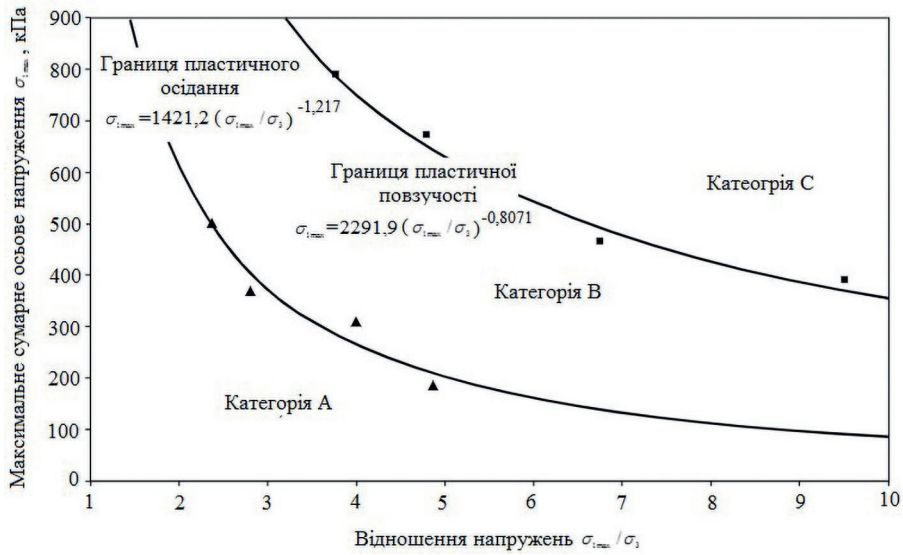


Рисунок 2 — Приклад категоризації дисперсної суміші за категоріями концепції осідання відповідно до границь категорій за результатами випробувань [8]; випробування згідно зі стандартами системи EN/DIN

Автори [6] підкреслюють, що запропонована модель дозволяє знаходити границі категорій навіть за низьких значень σ_{1max} / σ_3.

Описаний (перший) метод категоризації дисперсних сумішей було запропоновано авторами [6] як складову проєктування нежорстких дорожніх одягів з урахуванням вимог RStO (Richtlinien für die Standardizierung des Oberbaues von Ferkehrsflächen (Німеччина, емпіричний метод проєктування дорожніх одягів; у першоджерелі [6] Настанову з проєктування прийнято в редакції 2001 року (RStO 01)).

Потрібно зазначити, що категоризацію дисперсних сумішей згідно з концепцією осідання відповідно до характеру залежності σ_{1max} від σ_{1max} / σ_3 внесено до положень стандарту [5].

Щодо до другого методу категоризації дисперсних сумішей — як стверджують автори [9], ефективною є категоризація шляхом віднесення осьових пластичних деформацій, накопичених за один цикл навантажування, до величини осьових пластичних деформацій[3]: якщо осьові пластичні деформації, накопичені за один цикл (або швидкість пластичного деформування), становлять 1×10^{-7} та менше, дисперсну суміш, за встановлених умов випробування, має бути віднесено до категорії А. Якщо осьові пластичні деформації, накопичені за один цикл, перевищують 8×10^{-7}, суміш відносять до категорії С. Нижче розглянуто приклади такої категоризації, виконаної за результатами випробувань дисперсних сумішей згідно з різними системами стандартизації.

[2] Автори [6] також виконували аналогічні випробування; границю категорії пластичного осідання визначали за значення $\left\{\varepsilon^1_{p5000} - \varepsilon^1_{p3000}\right\} = 0,3\cdot10^{-3}$.

[3] Тут і далі в статті розглядаються виключно осьові (вертикальні) пластичні деформації та осьове (вертикальне) пластичне деформування.

Так, авторами [2, 8] досліджено характер залежності швидкості пластичного деформування від величини пластичних деформацій, побудовану за результатами випробувань дисперсної суміші з кам'яних матеріалів гранодіориту за постійного обмежувального тиску, значення якого варіювались.[4]

За результатами випробувань здійснили категоризацію суміші з віднесенням до категорій A, B і C за різних напружень (**рис. 3**).

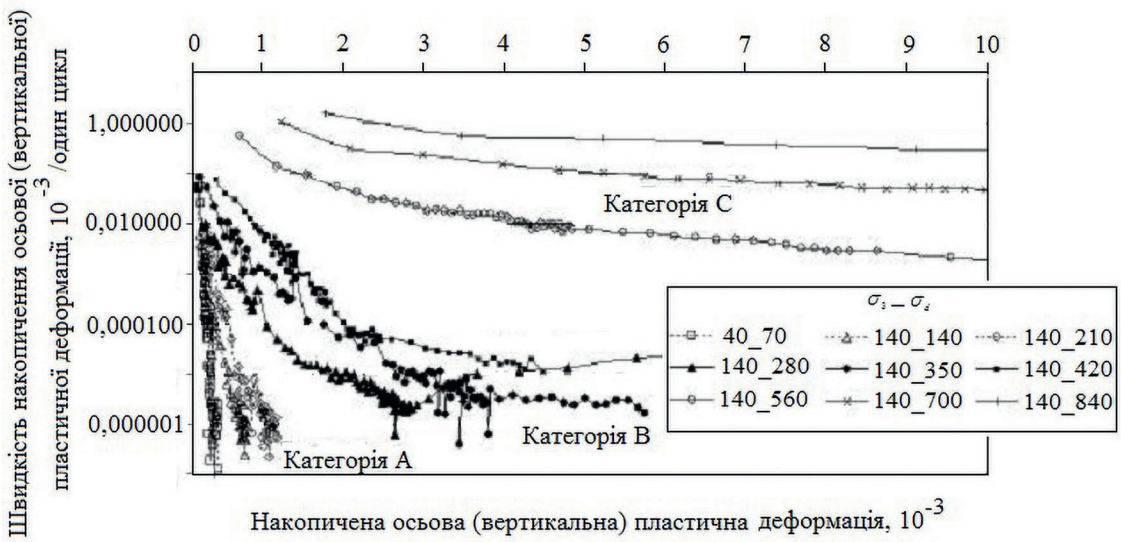


Рисунок 3 — Приклад категоризації дисперсної суміші за категоріями концепції осідання відповідно до швидкості пластичного деформування за результатами випробувань [8]; випробування згідно зі стандартами системи EN/DIN

Було показано [2], що для категорії A відбувається різке зниження швидкості пластичного деформування, яке відповідає переходу від пластичності, що спостерігається з початковими циклами навантажування ущільненої суміші (пост-ущільнення), до пружного відклику — т. зв. феномен в'язко-пружної поведінки неукріплених дисперсних сумішей під впливом циклічного механічного навантажування. Відповідно до категорії A суміш характеризується асимптотичним характером залежності пластичних деформацій від кількості циклів навантажування. У разі віднесення дисперсної суміші, за пропонованим алгоритмом випробування та категоризації, до категорії A суміш застосовують у неукріпленій основі нежорсткого дорожнього одягу, якщо накопичені осьові пластичні деформації при цьому не перевищують установлені границі.

Для категорії B спостерігається інший характер залежності — відбувається перехід від різкого зменшення швидкості пластичного деформування до її умовної (у межах прикладеної кількості циклів навантажування) стабілізації. Також автори [2] вказують на незначні відхили (distortion) в окремих точках залежності категорії B та відносять це явище до ймовірного абразивного зносу частинок. Зроблено висновок, що для сумішей цієї категорії стабільність деформаційної поведінки під дією навантажування суттєво залежить від форми, текстури частинок, та кількості міжзернових контактів Перевагу потрібно надавати дисперсним сумішам ретельно дібраного зернового складу.

[4] Роботи авторів [2, 6, 8] взято за основу під час розроблення стандартного методу випробування дисперсних сумішей циклічним всебічним стисканням у системі європейських норм.

Для категорії С спостерігається постійний, протягом всього періоду випробування, розвиток пластичних деформацій. За найбільш високого з вибраних рівня напруження суміш не проявляє пружного відклику і пластичне деформування прогресує з кожним циклом навантажування [2].

Категоризацію дисперсних сумішей за швидкістю пластичного деформування було виконано авторами [9], де випробування виконувалися згідно зі стандартами систем ASTM, AASHTO. Так, на **рис. 4** наведено графічну залежність швидкості пластичного деформування від величини пластичних деформацій, побудовану за результатами випробувань дисперсної суміші з кам'яних матеріалів осадових порід (вапняк, суміш з номінальним максимальним розміром зерен 25 мм (1 дюйм), за оптимального вмісту води w_{opm} = 6,5 %) за постійного обмежувального тиску, що варіювався від 86 кПа (12,6 psi) до 234 кПа (34 psi).[5]

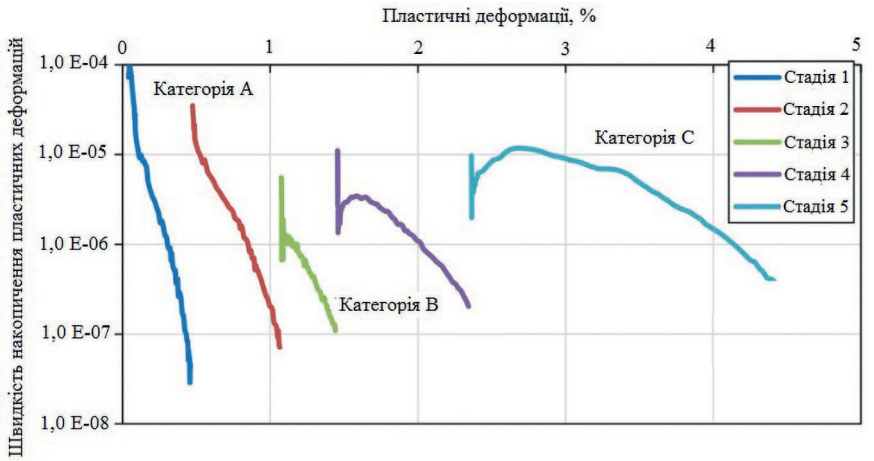


Рисунок 4 — Приклад категоризації дисперсної суміші за категоріями концепції осідання відповідно до швидкості пластичного деформування за результатами випробувань [9]; випробування згідно зі стандартами системи ASTM, AASHTO

Автори [9] аналогічно до висновків, наданих авторами [2], також відмічають характер досліджуваної залежності для категорії А — різке зниження швидкості пластичного деформування, з утворенням вертикального відрізку відповідної кривої на **рис. 4**. Характер граничної кривої категорії В (**рис. 4**) на початкових циклах навантажування є ідентичним такому категорії А, проте надалі швидкість пластичного деформування для категорії В знижується не так суттєво [9]. Поряд з цим автори [9] виконали категоризацію описаної вище суміші з кам'яних матеріалів вапняку з інкрементом умісту води: w_{opm} ± 1,5 %. Було показано, що за будь-якого одного встановленого значення вмісту води кількість циклів навантажування, що призводить до руйнування шару суміші (категорія С) залежить від рівня навантаження: чим вищим є рівень навантаження, тим менша кількість циклів навантажування спричиняє перехід до категорії С. За підвищеного вмісту води перехід від категорії А до категорії В відбувається за менших значень девіаторного напруження; відповідно за менших значень девіаторного напруження накопичуються зміни в міжзернових контактах та спостерігається руйнування шару суміші [9].

Автори [9] пропонують описаний підхід як одну із складових проєктування дорожніх одягів в системі MEPD.

[5] Параметри процесу навантажування за багатостадійним методом, за постійного обмежувального тиску було встановлено з урахуванням вимог стандарту AASHTO T 307 щодо стандартних випробувань з визначання модуля пружності дисперсних сумішей та ґрунтів (більш детально з параметрами процесу можна ознайомитися в першоджерелі [9]).

Привертає увагу, що досліджені суміші, віднесені до категорії А, стало характеризуються не тільки різким зниженням швидкості пластичного деформування, що відображається ходом кривих залежностей, отриманих авторами [2, 8] (рис. 3) та [9] (**рис. 4**) (стрімке зниження швидкості пластичного деформування; наявність вертикального відрізку на кінцевих етапах навантажування, який відповідає асимптотичній залежності пластичних деформацій від кількості циклів навантажування), але й низьким рівнем накопичених пластичних деформацій — у межах до 2 %. У зв'язку з цим важливо зазначити, що стандарт [5] установлює граничне значення загальних накопичених осьових пластичних деформацій 2,5 % — більш високі значення є недопустимими, у разі перевищення цього значення дослідний зразок дисперсної суміші визнається таким, що зазнав руйнування. Потенційно категоризація дисперсних сумішей за швидкістю пластичного деформування може бути ефективним підходом для вибору дисперсних сумішей для неукріпленого шару дисперсної основи під час конструювання нежорсткого дорожнього одягу.

Проєктування неукріпленої основи нежорсткого дорожнього одягу за результатами вивчення деформаційної поведінки дисперсних сумішей

Утворення колії в шарах дисперсної основи є одним з поширених видів деформацій, а також чинником подальшого руйнування нежорсткого дорожнього одягу. Для запобігання таким дефектам на етапі конструювання та розрахунку конструкції дорожнього одягу здійснюють належний вибір дисперсних сумішей, також може бути підвищено товщину асфальтобетонних шарів для зменшення напружень в дисперсному шарі основи або ураховано обмеження допустимих напружень в такому шарі. В останньому випадку пропонується здійснювати категоризацію дисперсних сумішей на засадах концепції осідання з приведенням максимально допустимих напружень до категорії А [6].

Авторами запропоновано алгоритм конструювання та розрахунку неукріпленої основи нежорсткого дорожнього одягу з урахуванням положень концепції осідання, з застосуванням математичної моделі (1) [6]. У цілях проєктування гранична крива категорії А визначається за різних значень умісту води, у тому числі таких, що відповідають значенням, очікуваним за впливу климатичних (сезонних) або техногенних чинників. Приймається, що за значень напружень, які на графіку залежності σ_{1max} від σ_{1max} / σ_3 відповідають точкам під граничною кривою категорії А, забезпечується стабільна деформаційна поведінка дисперсної суміші в запроєктованому шарі основи. Отримані таким чином дані є вихідними для виконання проєктних розрахунків з застосуванням методу кінцевих елементів. Обчислення напружень та деформацій в шарі неукріпленої основи здійснюють на підставі моделі нелінійної пружності (запропоновану авторами модель наведено в першоджерелі [6]) з урахуванням критичних значень умісту води та температури асфальтобетонних шарів.

Зазначається, що такий алгоритм проєктування передбачає виведення залежностей напруження розтягнення в нижній площині шару асфальтобетону та максимальних напружень на поверхні дисперсної основи від товщини шару асфальтобетону. Напруження в нижній площині шару асфальтобетону обчислюють з урахуванням градієнта температури за товщиною шару та вологості; відношення σ_{1max} / σ_3 обчислюють на підставі вертикальних та горизонтальних напружень на поверхні дисперсної основи з урахуванням температури й вологості.

Нижче, згідно з [1], наведено окремі результати конструювання та розрахунку неукріпленої основи нежорсткого дорожнього одягу з урахуванням вимог RStO 01. Розрахунок виконувався для конструкцій дорожнього одягу двох категорій: із розрахунку понад 32 млн стандартних навантажень на вісь 10 т (**рис. 5,** *а*), а також понад 0,8 млн до 3 млн стандартних навантажень на вісь 10 т (**рис. 5,** *б*).

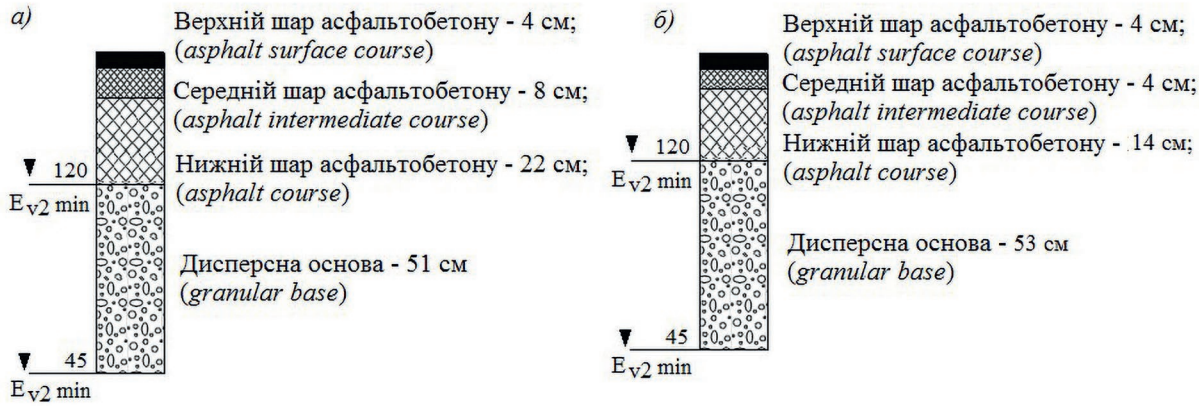


Рисунок 5 — Типові конструкції дорожнього одягу, прийняті для конструювання та розрахунку неукріпленого шару основи з дисперсної суміші згідно з [6][6]

Для конструювання та розрахунку приймали неукріплену основу дисперсних сумішей з кам'яних матеріалів гранодіориту (суміш 0/32, до вихідних даних розрахунку внесено уміст води 4 % — значення в стані природної вологості, та 5 % — значення очікується за умови відлиг). Вибрані для дослідження конструкції (**рис. 5**) відрізняються переважно загальною товщиною шарів асфальтобетону — максимальна товщина становить 34 см, що дозволило виконати моделювання процесу розподілу напружень в дисперсній основі залежно від товщини шару асфальтобетону та впливу кліматичних чинників [6].

Важливим результатом розрахунків автори позиціонують незначні пластичні деформації, накопичені в модельній неукріпленій основі протягом строку служби дорожнього одягу за умови стабільного стану дисперсної суміші. Відповідно до цього категоризація дисперсних сумішей згідно з концепцією осідання, з забезпеченням категорії А, може бути прийнята як ефективний простий метод проєктування дисперсної основи нежорсткого дорожнього одягу, який не потребує точного визначання пластичних деформацій та подальших розрахунків [6].

Також, з допомогою методу кінцевих елементів, для досліджуваної конструкції нежорсткого дорожнього одягу було показано, що за температури на поверхні асфальтобетонного покриття 47,5 °С за загальної товщини шарів асфальтобетону 22 см на поверхні шару неукріпленої основи виникають напруження, близькі до напружень границі пластичного осідання досліджуваної дисперсної суміші за умов її природної вологості — таким чином, зазначена конструкція дорожнього одягу є недостатньо «захищеною» від утворення колії, зокрема в дисперсній основі. Відповідно до цього було надано висновок, що для конструкцій нежорсткого дорожнього одягу зі зменшеною загальною товщиною шарів асфальтобетону, де дисперсні суміші неукріпленого шару основи піддаються впливу напружень, які не забезпечують стабільний стан суміші (перехід до категорії В), обов'язковим є застосування моделей пружного та пластичного деформування з метою обмеження максимальної кількості циклів навантажування [6].

Висновок щодо прийнятності категоризації сумішей згідно з концепцією осідання в цілях проєктування було надано також авторами [9], які досліджували вплив різних рівнів навантажування та вмісту води на розподіл напружень в ущільненому шарі дисперсної суміші в рамках підходів, прийнятих для проєктування методом MEPD.

[6] Наведено термінологію першоджерела; матеріали бітумовмисних шарів (асфальтобетонів) не зазначено.

Висновки

1. Результати вивчення деформаційної поведінки дисперсних сумішей методом циклічного всебічного стиску дозволяють здійснювати категоризацію таких сумішей за пружними або за пластичними властивостями. Категоризацію за пластичними властивостями виконують відповідно до концепції осідання (shakedown concept), згідно з якою суміш, за вибраних умов випробування, характеризується переходами до різних станів з підвищенням рівня напруження: стан пластичного осідання (категорія А), стан пластичної повзучості (категорія В) та руйнування «за наростаючою» (категорія С).

2. Віднесення сумішей до певних категорій згідно з концепцією осідання виконують з застосуванням математичної моделі, яка базується на залежності максимального осьового напруження в зразку під час випробувань σ_{1max} від його відношення до напруження обмежувального стискання σ_{1max} / σ_3. Ймовірно є перспективними інші методи категоризації сумішей згідно з концепцією осідання — наприклад, категоризація відповідно до швидкості пластичного деформування; було показано, що у разі віднесення суміші до категорії А швидкість накопичення осьових (вертикальних) пластичних деформацій за один цикл не повинна перевищувати 1×10^{-7}.

3. Категоризація дисперсних сумішей відповідно до характеру залежності σ_{1max} від σ_{1max} / σ_3 є стандартизованою і пропонується як складова конструювання і обчислення неукріпленого шару основи нежорсткого дорожнього одягу. У разі віднесення дисперсної суміші в проєктованому шарі неукріпленої основи до категорії А встановлюється стабільна, із забезпеченням пружного відклику, поведінка ущільненого шару дисперсної суміші за впливу циклічних механічних навантажень. Це є простий та ефективний підхід до проєктування, який не потребує виконання розрахунків з визначання пластичних деформацій в неукріпленій основі.

У разі віднесення дисперсної суміші у проєктованому шарі неукріпленої основи до категорії В є необхідною побудова моделей пружного та пластичного деформування з метою визначання граничних пластичних деформацій та обмеження кількості циклів навантажування.

Список літератури

1. Rahman M. S., and Erlingsson S. Modelling the moisture dependent permanent deformation behavior of unbound granular materials. *Procedia Engineering.* 2016, Vol. 143. P. 921–928 URL: https://www.sciencedirect.com (дата звернення: 10.02.2022).

2. Werkmeister S., Dawson A. R., Wellner F. Permanent deformation behavior of granular materials and the shakedown concept. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board.* Washington DC, USA, Vol. 1757. Issue 1. P. 75–81. URL: https://journals.sagepub.com/doi/epdf/10.3141/1757-09 (дата звернення: 13.12.2022).

3. Erlingsson S., Rahman, S., Salour F. Characteristic of unbound granular materials and subgrades based on multi-stage RLT testing. *Transportation Geotechnics.* 2017, 13, P. 28–42. URL: https://www.sciencedirect.com (дата звернення: 02.12.2022).

4. Wang L., Liu S., and Yu H. – S. A comparison between a shakedown design approach and the analytical design approach in the UK for flexible road pavements. *Advances in transportation geotechnics 3. The 3rd International Conference on Transportation Geotechnics (ICTG 2016). In: Procedia engineering.* 206, Vol. 143. P. 971–978 URL: https://www.sciencedirect.com (дата звернення: 02.12.2022).

5. EN 13286-52:2004 Unbound and hydraulically bound mixtures — Part 7: Cyclic load triaxial test for unbound mixtures. European Committee for Standardization. 2004, Brussels, Belgium, 37 p. (Інформація та документація).

6. Werkmeister, S., Numrich, R., Dawson, A. R., and Wellner, F. Design of granular pavement layers considering climatic conditions. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. Washington DC, USA, Vol. 1837, Issue 1. Jan 2003. P. 61–70. URL: https://journals.sagepub.com/doi/epdf/10.3141/1837-07 (дата звернення: 20.12.2022).

7. Alnedavi, A., Nepal, K. P., Al-Ameri, R., M. Alabdullah, M. Effect of vertical stress rest period on deformation behaviour of unbound granular materials: experimental and numerical investigations. *Journal of rock mechanics and geotechnical engineering*. 2019, 11. P. 172–180. URL: https://www.sciencedirect.com (дата звернення: 02.12.2022).

8. Werkmeister, S (2003). Permanent deformation behaviour of unbound granular materials in pavement constructions. Von der Fakultät Bauingenieurwesen der Technischen Universität Dresden, Dissertation zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.). 2003, 189 p. URL: https://tud.qucosa.de/api/qucosa%3A24221/attachment/ATT-0/?L (дата звернення: 10.02.2022).

9. Nazal, M. D., Mohammad, L. N., Austin, A., and Hosainat, A. A. Effect of moisture content on the shakedown limits of base course materials. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. Washington DC, USA, Vol. 2675, Issue 1. Jan 2021, P. 192–202. URL: https://journals.sagepub.com/doi/epub/10.1177/0361198120957312 (дата звернення: 13.12.2022).

References

1. Rahman M. S., and Erlingsson S. Modelling the moisture dependent permanent deformation behavior of unbound granular materials. *Procedia Engineering.* 2016, Vol. 143. P. 921–928. URL: https://www.sciencedirect.com (Last accessed: 10.02.2022) [in English].

2. Werkmeister S., Dawson A. R., Wellner F. Permanent deformation behavior of granular materials and the shakedown concept. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board.* Washington DC, USA, Vol. 1757. Issue 1. P. 75–81. URL: https://journals.sagepub.com/doi/epdf/10.3141/1757-09 (Last accessed: 13.12.2022) [in English].

3. Erlingsson S., Rahman, S., Salour F. Characteristic of unbound granular materials and subgrades based on multi-stage RLT testing. *Transportation Geotechnics.* 2017, 13, P. 28–42. URL: https://www.sciencedirect.com (Last accessed: 02.12.2022) [in English].

4. Wang L., Liu S., and Yu H. – S. A comparison between a shakedown design approach and the analytical design approach in the UK for flexible road pavements. Advances in transportation geotechnics 3. *The 3rd International Conference on Transportation Geotechnics (ICTG 2016). In: Procedia engineering.* 206, Vol. 143. P. 971–978. URL: https://www.sciencedirect.com (Last accessed: 02.12.2022) [in English].

5. EN 13286-52:2004 Unbound and hydraulically bound mixtures — Part 7: Cyclic load triaxial test for unbound mixtures. European Committee for Standardization. 2004, Brussels, Belgium, 37 p. (Information and documentation) [in English].

6. Werkmeister, S., Numrich, R., Dawson, A. R., and Wellner, F. Design of granular pavement layers considering climatic conditions. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board.* Washington DC, USA, Vol. 1837, Issue 1. Jan 2003. P. 61–70. URL: https://journals.sagepub.com/doi/epdf/10.3141/1837-07 (Last accessed: 20.12.2022) [in English].

7. Alnedavi, A., Nepal, K. P., Al-Ameri, R., M. Alabdullah, M. Effect of vertical stress rest period on deformation behaviour of unbound granular materials: experimental and numerical investigations. *Journal of rock mechanics and geotechnical engineering.* 2019, 11. P. 172–180. URL: https://www.sciencedirect.com (Last accessed: 02.12.2022) [in English].

8. Werkmeister, S (2003). Permanent deformation behaviour of unbound granular materials in pavement constructions. Von der Fakultät Bauingenieurwesen der Technischen Universität Dresden, Dissertation zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.). 2003, 189 p. URL: https://tud.qucosa.de/api/qucosa%3A24221/attachment/ATT-0/?L (Last accessed: 10.02.2022) [in English].

9. Nazal, M. D., Mohammad, L. N., Austin, A., and Hosainat, A. A. Effect of moisture content on the shakedown limits of base course materials. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board.* Washington DC, USA, Vol. 2675, Issue 1. Jan 2021, P. 192–202. URL: https://journals.sagepub.com/doi/epub/10.1177/0361198120957312 (Last accessed: 13.12.2022) [in English].

Tetiana Tereshchenko, *Ph. D., https://orcid.org/0000-0001-5206-9921*
Anatolii Tsynka, *Ph.D., https://orcid.org/0000-0002-0357-2325*
Serhii Illiash, *Ph. D., https://orcid.org/0000-0002-3001-8012*
Volodymyr Zelenovskyi, *https://orcid.org/0000-0001-5834-5456*

M.P. Shulgin State Road Research Institute State Enterprise – DerzhdorNDI SE, Kyiv, Ukraine

POSSIBILITIES OF DESIGNING UNBOUND BASE LAYERS OF FLEXIBLE ROAD PAVEMENTS REGARDING THE RESULTS OF THE STUDY OF DEFORMATION BEHAVIOR OF GRANULAR MIXTURES

Abstract

Introduction. The introduction to the paper highlights the role of the modeling of deformation behavior of unbound granular mixtures (UGMs) under repeated mechanical loading as the base aspect of designing flexible road pavement with an unbound base layers due to the fact that UGMs have been recognized as the most vulnerable materials of the flexible road pavement under action of negative climatic (seasonal) or technogenic factors.

Problem statement. The issues of the paper concern the problems related to unstable deformation behavior of UGMs in unbound base/subbase layers during flexible road pavement designing and maintenance.

Purpose. The main goal of the paper is to perform an analytical review of the theoretical background to the construction and calculation of an unbound base layer of the flexible road pavement according to the results of the study of UGMs' deformation behavior with their following categorization. The results of the analytical review are intended to be used during implementation of a national standard concerning the method of testing of unbound granular mixtures by the triaxial cyclic loading identical to the related European standard.

Results. The "shakedown concept" was reviewed which allows the categorization and also the appropriate selection of granular mixture during road pavement design and construction. It was established, that the "shakedown concept" sets up three types of permanent behavior of UGMs which, only after being tested via the triaxial cyclic loading method, can be categorized considering the design input data as stable or unstable ones. Also, an analytical comparison of various possible approaches to the UGMs' categorization within the "shakedown concept" was fulfilled. By the standardized approach, the limits of three categories shall be established at progressively increasing stresses taking into consideration the restrictions on accumulated axial permanent strains. The other approach may be potentially effective for UGM selection and is based on the value of the permanent axial strain rate per one loading cycle. Further, the aspects of an empirical designing of flexible road pavements were reviewed where the parameters of deformation behavior of UGM were adopted, via the Finite Elements Method, to calculate the distribution of stresses and to model rutting in an unbound base layer considering variable thickness of asphalt pavement and variable climatic factors as well.

Conclusions. The results of the study of deformation behavior of UGMs by triaxial cyclic loading allow the categorization of such mixtures regarding their resilient or permanent properties.

Categorization of UGMs on the base of the "shakedown concept" shall be performed through the application of a mathematical model based on the dependence of values of maximal axial stress of the specimen during testing on its ratio to confining stress values. Potentially perspective also will be other methods for the categorization of mixtures on the base of the "shakedown concept", for example those based on the value of the permanent axial strain rate per one loading cycle.The assurance of stable deformation behavior of UGM within the input data allows the implementation of an effective simple designing method that does not suppose the calculation of permanent strains of an unbound base layer or any subsequent limitations on loading.

Keywords: unbound granular mixture, methods of testing, cyclic load triaxial test, deformation behavior, resilient modulus, resilient strains, permanent strains.