

УДК 656.13.731

Шелудченко Л.С.

Подільський державний аграрно-технічний університет

Поліщук Д.В.

ТД ВО «Машинобудівний завод»

Комарницький С.П.

Подільський державний аграрно-технічний університет

Носко В.Л.

Відокремлений підрозділ Національного університету біоресурсів і природокористування України
«Бережанський агротехнічний інститут»

Кобринська Л.В.

Подільський державний аграрно-технічний університет

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ НАДІЙНОСТІ КОНСТРУКЦІЇ АВТОМОБІЛЬНОЇ ДОРОГИ ШЛЯХОМ ДОСЛІДЖЕННЯ ЇЇ РЕОЛОГІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ

Автомобільні дороги підлягають швидкому руйнуванню дорожнього покриття, які виникають у результаті складного напружено-деформованого стану у поперечних профілях конструкції автомобільної дороги внаслідок постійного динамічного навантаження, яке здійснюють автотранспортні засоби. У даній роботі розглянуто питання підвищення технічного ресурсу автомобільних доріг шляхом використання фізичних моделей-імітаторів, які спрямовані на вивчення механізму деформування конструкції автомобільної дороги та її руйнування. Це призведе до пошуку нових конструкційних та будівельних матеріалів та методів обґрунтування прогресивних параметрів конструкцій автомобільних доріг з урахуванням конкретних умов експлуатації.

Ключові слова: автомобільна дорога, дорожнє покриття, напружено-деформований стан, експлуатаційна надійність доріг, модель-імітатор.

Постановка проблеми. Як свідчить практика, проблеми, які виникають при експлуатації автомобільних доріг, у більшості випадків пов'язані зі швидким руйнуванням дорожнього покриття та полягають у порушенні основних вимог, які закладаються на етапі проектування: порушення технології будівництва; нехтування впливу факторів навколишнього середовища, а зокрема погодно-кліматичних умов; неврахування складного напружено-деформованого стану у поперечних профілях конструкції автомобільної дороги, який виникає у результаті постійного динамічного навантаження, спричиненого автотранспортними засобами тощо. У зв'язку з цим, основною задачею вивчення механізму контактного руйнування покриття автомобільних доріг має бути наукове обґрунтування експлуатаційної міцності різних конструкцій автомобільних доріг, механізмів утворення пошкоджень у вигляді сітки тріщин та вибоїн, їх динаміки та розростання у просторі для

подальшого розроблення критеріїв несучої здатності доріг і напрацювання методів підвищення їх експлуатаційної надійності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За результатами аналізу встановлено, що в Україні руйнування дорожнього покриття автомобільних доріг починається задовго до їх закладеного проектного ресурсу, який становить лише чотири роки [1]. Для прикладу слід навести автомобільні дороги США, проектування та будівництво яких доведено до максимального рівня забезпечення безпеки руху транспортних засобів та визначаються високою експлуатаційною надійністю, а саме 20-25 років до першого капітального ремонту. Загалом, до основних конструкційно-технологічних особливостей автомобільних доріг США, які надають їм високої оцінки, можна віднести: використання бетону лише високих марок для будівництва найбільш значущих доріг, що відносяться до груп *Interstate Highways (I)* та *US*

Highways (US); застосування розчину CaCl_2 для підвищення експлуатаційних властивостей автодоріг на 80-85% (у порівнянні з трамбуванням кожного шару) для зменшення величини просідання багатшарової конструкції автодороги під впливом варіювання вологості; укладання 5-7 см шару асфальту для гідроізоляції та для забезпечення рівності поверхні бетону; застосування арматури (сталевий прутка з межею міцності не менше 415 МПа), яка підвищує міцність полотна автодороги при згині та запобігає утворенню вибоїн; заливка бетонного полотна та заробляння температурних швів за допомогою асфальту [2].

У Німеччині значна частина автомобільних доріг була побудована на початку ХХ століття і призначалася для руху важкої військової техніки. Саме тому ці дороги до теперішнього часу витримують інтенсивний трафік великовагових транспортних засобів. Конструкція профілю автомобільних доріг у Німеччині принципово не відрізняються від доріг США, хоча для будівництва дорожнього одягу використовують і асфальт у тому числі. Необхідно також зазначити відсутність у ряді європейських країн технології ямкового ремонту автомобільних доріг, яка притаманні для України.

У таких країнах, як Великобританія, Фінляндія, Швеція, ОАЕ та Австралія при будівництві автомобільних доріг значна увага приділяється безпосередньо кліматичним особливостям регіону, відповідно до яких відбувається коригування конструкції та технології будівництва шляхів сполучення [2].

Значний досвід у проектуванні автомобільних доріг набуто і у Франції, Канаді, Японії, Китаї та ряді інших країн. Впровадження у будівництво сучасних технологій у Китаї дозволило забезпечити швидкісне будівництво, а саме 750 метрів за годину, при цьому досягнуто високих транспортно-експлуатаційних показників автодороги [2].

Концепцією реформування системи державного управління автомобільними дорогами України загального користування визначено, що «... забезпечення розвитку мережі автомобільних доріг та поліпшення їх транспортно-експлуатаційного стану є необхідною умовою для подальшого соціально-економічного розвитку держави і суспільства. Середньорічне підвищення рівня інтенсивності дорожнього руху на основних магістральних автомобільних дорогах <...> досягає 20%. У складі транспортних потоків зростає частка великовагових та великогабаритних транспортних засобів, що призводить до швидкого

руйнування автомобільних доріг <...> Таким чином, транспортно-експлуатаційний стан автомобільних доріг не сприяє створенню необхідних умов для подальшого соціально-економічного розвитку...» [3], що підтверджує актуальність досліджень.

Постановка завдання. Метою досліджень є підвищення технічного ресурсу автомобільних доріг, що потребує нових аналітичних та експериментальних підходів, шляхом використання фізичних моделей-імітаторів, застосування яких має бути спрямоване на вивчення специфіки від моменту деформування конструкції автомобільної дороги до подальшого її руйнуванням під дією навантаження автотранспортних засобів. Це призведе до пошуку нових конструкційних (будівельних) матеріалів та методів обґрунтування прогресивних методів будівництва автомобільних доріг з урахуванням конкретних транспортно-технічних, погодно-кліматичних, еколого-безпечних, економічних умов їх експлуатації.

Виклад основного матеріалу. Реологія вивчає закони деформування різних матеріалів і втрату ними міцності, де фундаментальними властивостями тіл (конструкційних матеріалів) є: пружність, пластичність, в'язкість. Механічні властивості реальних конструкційних матеріалів є складним сполученням перерахованих вище фундаментальних властивостей. Основними явищами, які становлять об'єкт вивчення реології, є: релаксація, повзучість, довготривала міцність.

Під релаксацією розуміють процес поступового переходу при тривалих діях зовнішніх впливів «пружної» частки формозміни у незворотну залишкову деформацію. Явище релаксації пов'язане із перебудовою композиції структури під дією зовнішніх впливів. У реології для наочного представлення релаксаційних властивостей матеріалів широко застосовують прості механічні моделі-імітатори, які отримали назву відповідних реологічних тіл. Загалом, реологічна поведінка кожного матеріалу характеризуються двома реологічними рівняннями, які описують швидкість об'ємного деформування та його формозміни. Розглянемо моделі-імітатори основних реологічних тіл, які можна застосовувати при вивченні причин руйнування дорожнього покриття [4; 6].

Пружне тіло Гука (H). Властивості пружності умовно визначають моделлю-імітатором у вигляді пружини (рис. 1-а). Графік залежності між інтенсивністю зовнішніх сил P і деформацією ϵ (формозміною) є прямолінійним, при цьому гра-

фіки навантаження і розвантаження моделі-імітатора збігаються (рис. 1-б). Робота, яка витрачена на деформування моделі накопичується у пружині у вигляді потенційної енергії деформування і повністю повертається після припинення дії зовнішньої сили.

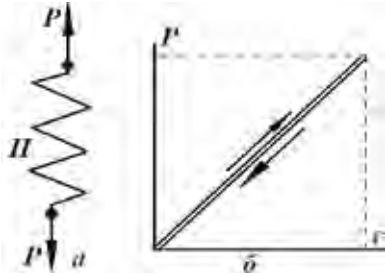


Рис. 1. Модель-імітатор пружного тіла (реологічне тіло Гука)

Пластичне тіло Сен-Венана (StV). Ідеально-пластичним (жорстко-пластичним) називають тіло, яке не відчуває жодних деформацій до тих пір, поки інтенсивність зовнішньої сили не перевищить певної межі пластичності ($P_{пл}$), після якої відбувається незворотна формозміна матеріалу поверхні (рис. 2). Поміж елементами моделі діє сухе (кулонове) тертя, яке залишається постійним при постійному значенні нормального тиску F повзуна на поверхню.

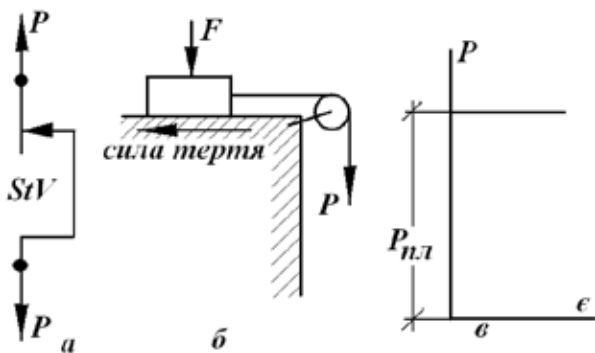


Рис. 2. Модель-імітатор ідеально-пластичного тіла (реологічне тіло Сен-Венана)

У дійсності процес незворотної формозміни матеріалу відбувається дещо складніше. Як тільки починається формозміна, початковий опір матеріалу зменшується і його перебудова відбувається при значенні P , меншому за $P_{пл}$. Значення зовнішньої сили P , за якого процес формозміни стабілізується (залишається усталеним), називається усталеною межею пластичності $P_{пл,уст}$ (рис. 3). Таке зменшення опору формозміни реальних матеріалів пов'язане із безперервними композиційними змінами у ході самого процесу формозмінення. Характерною особливістю реологічного

тіла Сен-Венана є незалежність формозміни матеріалу від швидкості прикладення зовнішніх впливів. Витрачена при цьому робота на незворотну формозміну, йде на подолання внутрішнього тертя структури і повністю розсіюється у самому матеріалі.

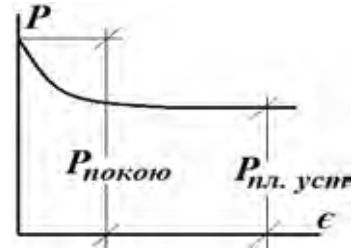


Рис. 3. Зменшення початкового опору матеріалу у процесі пластичного формозмінення її композиції

Для ряду конструкційних матеріалів у процесі їх пластичної формозміни спостерігається поступове збільшення опору, тобто зміцнення. Це явище може бути змодельоване серією моделей Сен-Венана, які з'єднано від початкового повзуна вільними від натягнення нитями так, щоб кожний повзун моделі послідовно вмикався у роботу у міру їх послідовного зсуву, як це зображено на рис. 4.

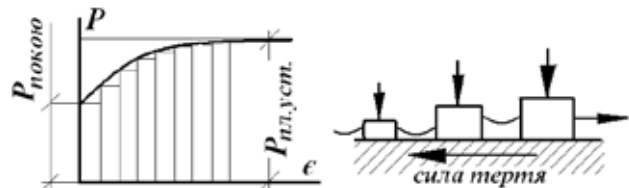


Рис. 4. Модель-імітатор пластичної формозміни матеріалу зі зміцненням структури

В'язке тіло Ньютона (N). В'язка рідина, яка підпорядкована закону в'язкості Ньютона, називається реологічним тілом Ньютона і визначена моделлю-імітатором у вигляді поршня з отворами малого діаметра, який рухається у заповненому рідиною циліндрі (рис. 5-а, б). У цьому випадку швидкість переміщення поршня пропорційна прикладеній силі P , що графічно наведено на рис. 5-в.

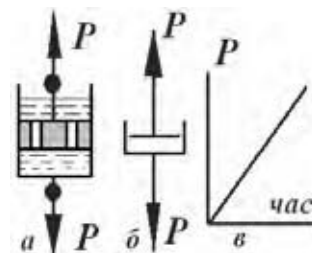


Рис. 5. Модель-імітатор в'язкого тіла (реологічне тіло Ньютона)

Складні реологічні тіла. Складними реологічними тілами називають моделі, які сполучають різні фундаментальні властивості і, таким чином, більш точно (хоча все ще дуже наближено) описують поведінку реальних конструкційних матеріалів. Складні реологічні тіла складаються шляхом послідовного та паралельного з'єднання декількох фундаментальних моделей.

Як приклад складного реологічного тіла розглянемо в'язко-пружне тіло Фойгта. Модель, яке одночасно містить безперервну пружну та в'язку в'язь (H/N) (рис. 6) [6].



Рис. 6. Модель-імітатор в'язко-пружного тіла (реологічне тіло Фойгта)

Конструкційна анізотропія реологічних властивостей автомобільної дороги (рис. 7) зумовлена її пошаровою будовою [5]: дрібнозернистий асфальтобетон; крупнозернистий асфальтобетон; щебінь, оброблений органічним в'язучим; цементобетон; морозостійкий шар гравію; підстиляючий ущільнений шар ґрунту. Така будова автомобільної дороги передбачає можливість дослідження реологічних властивостей її конструкції лише за допомогою моделей складних реологічних тіл, наприклад, тіла Бізара-Кауера, приклад якого наведено на рис. 8. Така модель-імітатор не враховує можливість «миттєвого» залишкового пошкодження (руйнування) поверхневих шарів дорожнього одягу автомобільної дороги у вигляді окремих вибоїн, які викликані контактними напруженнями. Реакція конструкції на такі «миттєві» залишкові впливи можуть бути змодельовані у складних реологічних тілах зміщенням люфтових елементів (рис. 9), який вдосконалено фіксатором «миттєвого» залишкового пошкодження у вигляді пружинної защіпки та запобігає зворотній «формозміні» складного реологічного тіла.

При цьому, пружинна защіпка люфтового елемента спрацьовує при його стисканні. Застосування люфтового елемента з фіксацією «миттєвих» залишкових деформацій поверхневих шарів дорожнього одягу автомобільних шарів дозволяє доопрацювати модель реологічного тіла Бізара-

Кауера для дослідження реологічних властивостей багат шарових конструкцій автодоріг за умови утворення вибоїн на їх поверхні. На рис. 11 наведено принципову схему моделі-імітатора для дослідження реологічних властивостей автомобільної дороги, конструкцію якої подано на рис. 7.

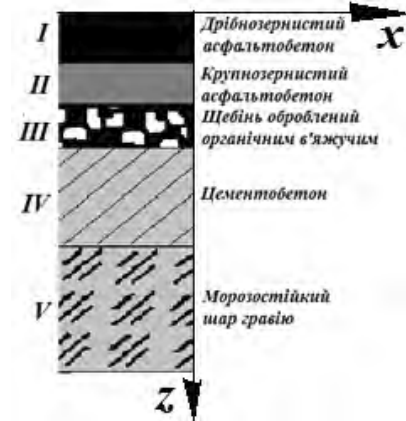


Рис. 7. Пошарова анізотропія реологічних властивостей конструкції автомобільної дороги у вертикальному напрямку

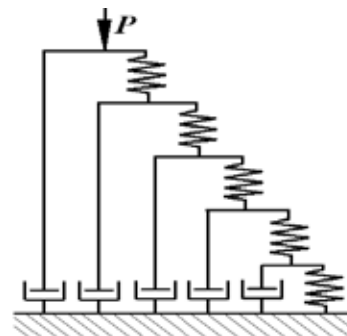


Рис. 8. «Сходиноква» модель-імітатор в'язко-пружного реологічного тіла Бізара-Кауера

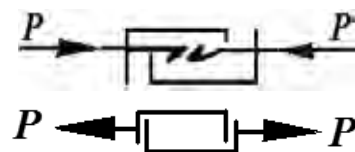


Рис. 9. Люфтовий елемент з фіксацією і без фіксації

Отже, доопрацьована модель реологічного тіла Бізара-Кауера (рис. 11) визначає реологічні властивості конструкції автомобільної дороги з анізотропними вертикально розташованими шарами конструкційних матеріалів. При цьому імітується можливість крихкого утворення вибоїни на поверхні автодороги від дії контактних напружень у небезпечних зонах покриття під рушіями транспортних засобів у залежності від різних рівнів зовнішніх навантажень P_1 та P_2 , як це наведено на рис. 12, які мають певну специфіку своїх негативних проявів [3; 7]. Особливо небезпечними

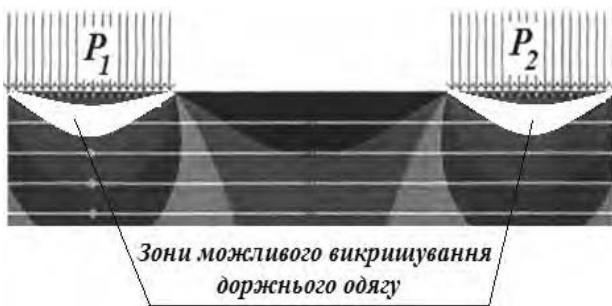


Рис. 12. Зони можливого крихкого утворення каверн на поверхні автомобільної дороги під дією рушіїв транспортних засобів

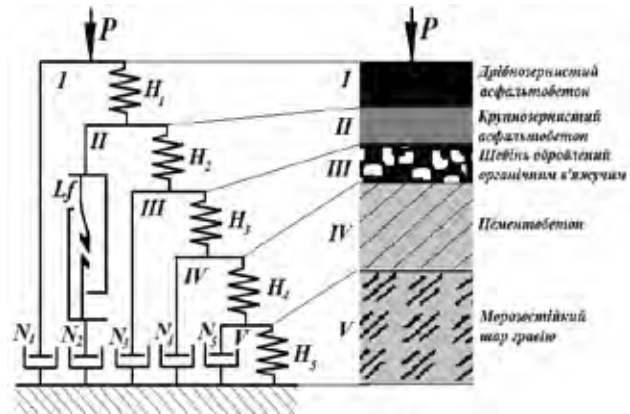


Рис. 11. Модель-імітатор реологічних властивостей багатшарової конструкції автомобільної дороги з вертикальною анізотропією

випадками є моменти, коли максимальні значення виникають на границі двох шарів дорожнього покриття з різними реологічними властивостями.

Висновок. Отже, під дією рушіїв транспортних засобів у зонах концентрації контактних напружень, а саме поверхневих шарах дорожнього покриття відбувається утворення вибоїн, які суттєво погіршують експлуатаційні показники

автомобільних доріг, призводять до швидкого зношування транспортних засобів та негативно впливають на довкілля. Саме тому покращення експлуатаційних, еколого-безпечних та економічно-доцільних показників автодоріг повинні базуватися на попередньому вивченні специфіки руйнування шляхом застосування вище перерахованих моделей-імітаторів.

Список літератури:

1. Державні будівельні норми України ДБН В.2.3-4.2015 «Автомобільні дороги. Споруди транспорту. Частина I. Частина II». URL: <http://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/1-1-0-197>
2. Інтернет ресурс: Как в США строят дороги, которые стоят 100 лет без ремонта и ям. URL: <https://censor.net.ua/r257965>.
3. Концепція реформування системи державного управління автомобільними дорогами загального користування в Україні: Розпорядження №432-р Кабінету Міністрів України від 31.03.2015 р. URL: <https://www.kmu.gov.ua/ua/npas/248144997>.
4. Арсеньєва Н.О. Аналіз напружено-деформованого стану асфальтобетонних шарів нежорсткого дорожнього одягу під час моделювання його конструкції. Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Том 29 (68) № 4, Київ, 2018. С. 167-171.
5. Кандауров И.И. Механика зернистых сред и ее применение в строительстве. М.: Стройиздат, 1966. 318 с.
6. Луканин В.Н., Трофименко Ю.В. Промышленно-транспортная экология. М.: Высшая школа, 2001. 296 с.
7. URL: http://femto.com.ua/articles/part_2/3431.html. Энциклопедия физики и техники.
8. Шелудченко Л.С. Динаміка емісії пилових аерозолів внаслідок трибологічного зношування дорожнього покриття автомобільної дороги рушієм автотранспортних засобів. Науковий журнал «Екологічна безпека», випуск 1/2018 (25). Кременчук, 2018. С. 69-74.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ КОНСТРУКЦИИ АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГИ ПУТЕМ ИССЛЕДОВАНИЯ ЕЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

Автомобильные дороги подлежат быстрому разрушению их дорожного покрытия, которые возникают в результате сложного напряженно-деформированного состояния в вертикальном профиле конструкции автомобильной дороги при постоянном динамическом нагружении, осуществляемое автотранспортными средствами. В данной работе рассмотрены вопросы повышения технического ресурса автомобильных дорог путем использования физических моделей-имитаторов, которые направлены на изучение механизма деформирования конструкции автомобильной дороги и ее разрушения. Результаты исследований приведут к поиску и использованию новых конструкционных решений и строительных материалов с учетом конкретных условий эксплуатации дороги.

Ключевые слова: автомобильная дорога, дорожное покрытие, напряженно-деформированное состояние, эксплуатационная надежность дорог, модель-имитатор.

**PROVIDING THE OPERATING RELIABILITY OF THE CONSTRUCTION OF THE
AUTOMOTIVE ROAD BY THE INVESTIGATION OF ITS RHEOLOGICAL PROPERTIES**

Roads are subject to the rapid destruction of the road surface, which arise as a result of the complex stress-strain state in the transverse sections of the construction of the highway as a result of the constant dynamic load caused by motor vehicles. In this paper, the issues of increasing the technical resource of highways by using physical models-simulators, which are aimed at studying the mechanism of deformation of the design of the highway and its destruction, are considered. This will lead to the search for new structural and building materials and methods for justifying the progressive parameters of road constructions, taking into account specific operating conditions.

Key words: *automotive road, road surface, stress-strain state, operational reliability of roads, model-simulator.*