

Національний транспортний університет
Міністерства освіти і науки України

Національний транспортний університет
Міністерства освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ГУСТЕЛЄВ ОЛЕКСАНДР ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 625.7/.8

ДИСЕРТАЦІЯ

ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ НЕЖОРСТКОГО ДОРОЖНЬОГО ОДЯГУ З ПОПЕРЕЧНИМИ ТРІЩИНАМИ В АСФАЛЬТОБЕТОННОМУ ПОКРИТТІ

05.22.11 – автомобільні шляхи та аеродроми

Архітектура та будівництво

Подается на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень.

Використання ідей, результатів і текстів інших
авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ О. О. Густелєв

Науковий керівник –
Мозговий Володимир Васильович
доктор технічних наук,
професор

Ідентичність усіх примірників дисертації

Засвідчую

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради Д 26.059.02

_____ В. І. Каськів

Київ – 2019

АНОТАЦІЯ

Густєлев О. О. Підвищення довговічності нежорсткого дорожнього одягу з поперечними тріщинами в асфальтобетонному покритті – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.11 «Автомобільні шляхи та аеродроми». (192 – Будівництво та цивільна інженерія). – Національний транспортний університет, Київ, 2019.

Актуальність роботи. Відомо, що одним із найбільш розповсюджених матеріалів покриття як на автомобільних дорогах загального користування, так і на комунальних вулицях і дорогах з нежорстким дорожнім одягом є асфальтобетон. Це пов'язано з рядом його переваг: доступність компонентів, технологічність у приготуванні і застосуванні, широкий спектр різновидів, можливість направленої регулювання властивостей, високі атмосферостійкість, міцність і довговічність тощо.

Однак не зважаючи на велику кількість проведених досліджень і розроблених практичних заходів для запобігання й уникнення поперечних температурних тріщин, ці види руйнувань ще залишаються одними із найбільш розповсюджених дефектів асфальтобетонного покриття. Ці поперечні тріщини температурно-усадного походження утворюються з певним кроком по довжині покриття у результаті як сезонних, так і добових коливань температури. У процесі експлуатації утворюються нові поперечні температурні тріщини і відстань між ними зменшується від десятків до декількох метрів. Їх поява призводить до багатьох негативних наслідків.

Зокрема, через тріщини потрапляє вода і суттєво знижує несну здатність шарів основи і ґрунту земляного полотна (у тому числі через засоленість при потраплянні протиожедних речовин), як наслідок, у зоні тріщин виникає значне ослаблення дорожньої конструкції. Це призводить до прискорення появи різних видів руйнувань під дією транспортних навантажень і кліматичних факторів як самого асфальтобетонного покриття, так і дорожнього одягу в

цілому. Тому в районах тріщин часто утворюються сколи, викришування, ямковість, вибоїни, просідання, сітка тріщин та колійність. У зв'язку з цим поява поперечних температурних тріщин призводить до передчасного виходу з ладу дорожнього одягу і зниження нормативних строків служби. Утворення температурних тріщини в асфальтобетонному покритті вимагає значних додаткових витрат на їх ремонти. Ремонт асфальтобетонного покриття з поперечними температурними тріщинами є складним, трудомістким і дорогим процесом, що містить багато ручної праці і супроводжується витратою великої кількості енергії і високоякісних дефіцитних матеріалів, погіршенням умов і безпеки руху. У той же час, застосовані ремонтні заходи не завжди досягають бажаного результату.

Слід відмітити, що однією із причин передчасного утворення поперечних температурних тріщин є відсутність нормативних методів розрахунку асфальтобетонного покриття на температурну тріщиностійкість, що на практиці намагаються компенсувати заходами з регулювання властивостей асфальтобетону та удосконаленням конструкцій дорожнього одягу. Однак ці заходи не дають очікуваних результатів. Крім того, також відсутні методи, що враховують зміну напружено-деформованого стану нежорсткого дорожнього одягу та прогнозування його довговічності протягом життєвого циклу з урахуванням появи поперечних температурних тріщин в асфальтобетонному покритті. При цьому для забезпечення необхідного експлуатаційного стану автомобільних доріг в існуючій практиці виконують певні ремонтні заходи. Однак при призначенні видів ремонту не враховується фактична зміна напружено-деформованого стану дорожнього одягу і як ця зміна у процесі експлуатації буде впливати на його довговічність.

Таким чином, вище наведене свідчить про актуальність дисертаційних досліджень.

У першому розділі розглянуто стан питання забезпечення довговічності дорожнього одягу з асфальтобетонним покриттям, що має поперечні температурні тріщини, проаналізовано особливості експлуатації дорожнього

одягу з поперечними тріщинами в асфальтобетонному покритті, показано існуючі заходи підвищення його довговічності, висвітлено відомі підходи до оцінювання довговічності дорожнього одягу з поперечними тріщинами в асфальтобетонному покритті, а також мету і задачі досліджень.

Аналіз існуючих рішень стосовно прогнозування температурного тріщиноутворення свідчить, що у ранніх підходах використовувались рішення теорії пружності, які не дозволяли відображати реальну поведінку в'язко-пружних властивостей матеріалів. Останніми роками в багатьох дослідженнях почали використовувати методи, що ураховують термо-реологічні властивості матеріалів конструкцій дорожнього одягу. Існуючі методи досліджень впливу поперечних тріщин на довговічність асфальтобетонного покриття у більшості випадків застосовують методи скінченних елементів для прогнозування термо-напруженого стану дорожнього одягу. Підходи, що направлені на забезпечення довговічності дорожнього одягу з поперечними тріщинами в асфальтобетонному покритті, головним чином, ґрунтуються на застосуванні армуючих матеріалів, герметизації покриття за рахунок заробки тріщин герметиками, а також при влаштуванні захисних шарів з литих емульсійно-мінеральних сумішей або поверхневої обробки. Однак питання підвищення довговічності дорожнього одягу з поперечними тріщинами в асфальтобетонному покритті було вивчено недостатньо.

У другому розділі виконані теоретичні дослідження асфальтобетонного покриття нежорсткого дорожнього одягу з поперечними тріщинами. Ці дослідження базуються на застосуванні основних положень теорії термо-в'язко-пружності та положень кінетичної теорії міцності твердих тіл, що застосовуються у дослідженні довговічності дорожнього одягу науковою школою проф. Б.С Радовського.

Взято до уваги той факт, що у зоні поперечних тріщин підвищуються напруження у найбільш слабких елементах дорожньої конструкції – ґрунтовій основі та шарах з незв'язних і малозв'язних матеріалів. Тому, запропоновано оцінювати вплив поперечних температурних тріщин в асфальтобетонному

покритті на довговічність дорожнього одягу, аналізуючи зміну у часі міри пошкодженості за Бейлі як міри вичерпування його довговічності від дії чинників, що впливають на критерій граничного стану за першою групою (несною здатністю) для ґрунтової основи і шарів з незв'язних та малозв'язних матеріалів – за опором зсуву. Даний підхід полягає у використанні цього показника як домінуючої інтегральної характеристики втрати довговічності дорожнього одягу і встановлюється шляхом підсумовування його значень на кожному характерному етапі експлуатації з урахуванням «історії» ремонтних заходів.

Розглянуті основні розрахункові схеми роботи асфальтобетонного покриття до та після утворення поперечних температурних тріщин. На основі теоретичних досліджень розвинуто метод оцінювання ефективності герметизуючих матеріалів при ремонті асфальтобетонного покриття з поперечними тріщинами.

Для дослідження комплексного впливу транспортних навантажень та коливань температури на напружено-деформований стан конструкції дорожнього одягу з асфальтобетонним покриттям, що має поперечні тріщини використано методологію, розроблену професором В.І. Гуляєвим, що базується на методі скінченних елементів.

На основі застосованих теоретичних аспектів дослідження, розроблено метод оцінювання впливу поперечних температурних тріщин в асфальтобетонному покритті на довговічність дорожнього одягу від комплексного впливу чинників з урахуванням термо-реологічних властивостей асфальтобетону. Цей метод полягає у використанні показника міри вичерпування довговічності протягом усього строку експлуатації за критерієм граничного стану для ґрунтової основи і шарів з незв'язних та малозв'язних матеріалів – за опором зсуву.

У третьому розділі наведені результати експериментальних досліджень щодо довговічності дорожнього одягу з поперечними тріщинами в

асфальтобетонному покритті. Дослідження полягають у проведенні натурних і лабораторних випробувань та числового експерименту.

На основі натурних досліджень розроблено класифікацію поперечних температурних тріщин за найбільш характерними їх ознаками, наведено характерні різновиди поперечних температурних тріщин, а також види та кінетики руйнувань дорожнього одягу з поперечними температурними тріщинами в асфальтобетонному покритті. Здійснено натурне дослідження стосовно укріплення щебеневої основи шляхом її просочування у зоні тріщин, а також стосовно підвищення технологічності при армуванні асфальтобетонних шарів під час капітального ремонту вулиць і доріг м. Києва. Було виконано дослідження щодо впливу армуючих синтетичних матеріалів на підвищення тріщиностійкості асфальтобетонних шарів.

На основі проведених експериментів та літературних даних були встановлені фізико-механічні та реологічні характеристики дорожньо-будівельних матеріалів і ґрунтів, необхідних для виконання розрахунків при дослідженні впливу різних чинників на довговічність дорожнього одягу, що має асфальтобетонне покриття з температурними тріщинами.

Для експериментальних досліджень термо-реологічних і термо-механічних властивостей матеріалів, що застосовуються для ремонту асфальтобетонного покриття з поперечними температурними тріщинами застосовано як стандартні методи та прилади, так і оригінальні, для визначення термо-механічних характеристик асфальтобетону та герметиків, розроблених в НТУ. Також було здійснено оцінку достовірності результатів теоретичних досліджень, яка підтверджує достатню їх збіжність із експериментальними даними.

За допомогою числового аналізу при використанні методу скінченних елементів досліджено напружено-деформований стан дорожнього одягу з асфальтобетонним покриттям, що має температурні тріщини, а також вплив укріплення основи під поперечною тріщиною на напружено-деформований стан дорожнього одягу.

У четвертому розділі наведена практична реалізація результатів дослідження щодо підвищення довговічності дорожнього одягу з асфальтобетонним покриттям, що має поперечні температурні тріщини.

Розроблено заходи для практичного застосування результатів дослідження. До них відносяться:

- рекомендації з комплексного підвищення міцності дорожнього одягу з асфальтобетонним покриттям, що має поперечні тріщини;
- методика оцінювання характеру розтріскування та обґрунтування вибору технології і механізмів для відновлення несної здатності конструкції дорожнього одягу;
- методика розрахунку нежорсткого дорожнього одягу з поперечними температурними тріщинами в асфальтобетонному покритті.

Застосування результатів досліджень підтверджено відповідними довідками про впровадження. Результати досліджень також знайшли своє відображення у навчальному процесі НТУ на факультеті транспортного будівництва при читанні лекцій, проведенні практичних занять, виробничих практик та написанні дипломних проєктів.

Ключові слова: асфальтобетонне покриття, довговічність, напружено-деформований стан, нежорсткий дорожній одяг, поперечні температурні тріщини.

Список публікацій здобувача

Монографії:

1. Густелєв О.О., Гуляєв В.І., Гайдачук В.В., Мозговий В.В., Заєць Ю.О., Шевчук Л.В., Шлюнь Н.В. Термопружний стан багатошарових дорожніх покриттів : монографія. К.: НТУ, 2019. 252 с.

Статті у виданнях іноземних держав або у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз:

2. Густелєв О.О., Гайдачук В.В., Радкевич А.В., Шевчук Л.В., Шлюнь Н.В. Термонапружене деформування шаруватого покриття на вгнутій ділянці

дороги // Опір матеріалів і теорія споруд : наук.-техн. збірник. 2019. Вип. № 102. С. 180-190.

3. Густелев А.А., Мозговой В.В., Шевчук Л.В. Анализ механизма подкрепления армирующей сеткой многослойного покрытия // Вестник КаздорНИИ : научно-практ. журнал. 2019. №1-2 (61-62). С. 141-148.

4. Густелєв О.О. Оцінювання ефективності герметизуючих матеріалів при ремонті асфальтобетонного покриття з поперечними тріщинами // Галузеве машинобудування, будівництво : зб. наук. праць. 2019. Вип. № 1 (52). С. 166-169.

Статті у фахових виданнях:

5. Густелєв О.О., Осипов В.О. До питання вибору матеріалів для влаштування горизонтальної дорожньої розмітки на окремих ділянках вулично-дорожньої мережі // Нові технології в будівництві : наук.-техн. журнал. 2018. Вип. № 34. С. 47-49.

6. Густелєв О.О., Мозговий В.В., Гайдайчук В.В., Заєць Ю.О., Шевчук Л.В., Куцман О.М. Механічні ефекти і парадокси явищ термопружного напруження в конструкціях дорожніх одягів // Дороги і мости : зб. наук. праць. 2018. Вип. № 18. С. 128-145.

7. Густелєв О.О., Гайдайчук В.В., Мозговий В.В., Шевчук Л.В. Аналіз деформування дорожнього покриття на металевій плиті Південного моста // Промислове будівництво та інженерні споруди : наук.-виробн. журнал. 2019. № 1. С. 31-38.

8. Густелєв О.О., Гуляєв В.І., Мозговий В.В., Шлюнь Н.В., Куцман О.М., Баран С.А. Дослідження напружено-деформованого стану дорожнього одягу з укріпленою основою під поперечними тріщинами і швами // Вісник НТУ. Серія «Технічні науки»: наук.-техн. збірник. 2019. Вип. № 1 (43). С. 26-38.

Опубліковані праці апробаційного характеру:

9. Густелев А.А., Кияшко И.В. Концепция совершенствования технологии ремонтов слоев дорожных одежд на основе органических вяжущих. Современные технологии и материалы в дорожном строительстве: материалы международной научно-практической конференции. Харьков: 2006. С. 68-70.

10. Густелєв О.О., Жданюк В.К. On the issue of repair technique of asphalt pavements with through-the-thickness temperature cracks (04.10.2006 – 06.10.2006). Warszawa : I Polski kongres dogowy, 2006. С. 485-490.

11. Густелєв А.А., Титарь В.С., Мартымянов С.В. Основные причины трещинообразования на асфальтобетонных покрытиях и пути их устранения. Научные исследования наносистемы и ресурсосберегающие технологии в стройиндустрии : мат. XVIII междун. наук.-практ. конф. (18.09.2007 – 19.09.2007 р.). Белгород, 2007. С. 144-149.

12. Густелєв А.А., Кияшко И.В., Минаков О.С. Повышение трещиностойкости асфальтобетонных дорожных покрытий. Эффективные материалы, технологии, машины и оборудование для строительства и эксплуатации современных транспортных сооружений : мат. междун. наук.-практ. конф. молодых ученых (03 – 04 декабря 2009 г.). Белгород, 2009. С. 144-149.

13. Густелєв О.О., Осипов В.О. Вивчення впливу підвищених пішохідних переходів на курсову стійкість автомобілів. Новітні технології в автомобілебудуванні, транспорті і при підготовці фахівців : наук. праці міжн. наук.-практ. та наук.-метод. конф., присв. 85-річчю кафедри автомобілів з Дня народж. проф. А. Б. Гредескула (20 – 21 жовтня 2016 р., м. Харків). Харків, 2016. С.76.

14. Густелєв О.О., Осипов В.О. Щодо впливу штучних нерівностей покриття автодоріг на курсову стійкість автомобілів. Створення, експлуатація і ремонт автомобільного транспорту та будівельної техніки : мат. всеукр. наук.-техн. конф. (26 – 27 квітня 2017 р., м. Полтава). Полтава, 2017.

15. Густелєв О.О., Осипов В.О. Огляд інженерних рішень, які спроможні мінімізувати аварійність за участю автомобільного транспорту. Автомобільний транспорт і автомобілебудування. Новітні технології і методи підготовки фахівців (19 – 20 жовтня 2017 р., м. Харків). Харків, 2017. С. 81-82.

16. Густелєв А.А., Гайдайчук В.В., Мозговой В.В., Шевчук Л.В., Шлюнь Н.В. Термонапряженное состояние дорожных покрытий. Сучасні методи і

проблемно-орієнтовані комплекси розрахунку конструкцій і їх застосування у проектуванні і навчальному процесі : III міжн. наук.-практ. конф. (24 – 25 вересня 2019 р., м. Київ). Київ, 2019.

Свідоцтва та патенти:

17. Патент України на корисну модель № 113145 Україна, МПК (2017.01), E01F9/00. Спосіб влаштування горизонтальної дорожньої розмітки на проїзdnій частині доріг та вулиць / Густелєв О.О. Дата реєстрації 10.01.2017 р.

18. Патент України на корисну модель № 118040 Україна, МПК (2017.07), E01C23/14. Спосіб плавлення снігу на стаціонарному снігоплавильному пункті за допомогою умовно теплих господарсько-побутових вод/ Густелєв О.О. Дата реєстрації 25.07.2017 р.

Опубліковані праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

19. Густелєв А.А., Кияшко І.В., Стороженко М.С. Влияние сквозных поперечных трещин на условия службы дорожных конструкций // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво: наук.-техн. збірник. 2004. Вип. № 71. С. 36-39.

20. Густелєв О.О., Стороженко М.С., Кияшко І.В. Формування однорідної якості асфальтобетону в залежності від параметрів і режимів технологічного процесу // Дороги і мости : зб. наук. праць. 2006. Вип. № 5. С. 305-311.

SUMMARY

Gustelev O. O. Increasing the Durability of Flexible Pavement with Transverse Cracks in Asphalt Concrete Wearing. - Manuscript.

Thesis for a Candidate Degree in Technical Sciences. Specialty 05.22.11 - Highways and Airfields. (192 - Construction and Civil Engineering). – National Transport University of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2019.

Relevance of the work. Asphalt concrete wearing is known to be one of the most common pavement materials on both public and communal streets and roads with rough road pavement. This has several advantages: component availability, adaptability and preparation, a wide variety of indicators, directional properties control, high weather resistance, durability and endurance, etc.

However, despite the large number of conducted studies and researched practical measures to prevent cracking and avoid the embrittlement temperature, these types of destruction remain one of the most common defects in asphalt concrete wearing. These transverse cracks of thermal and shrinkage origin in concrete pavement are formed with a certain step along the length of the pavement as a result of both seasonal and daily temperature fluctuations. During operation, new transverse thermal cracks are formed and the distance between them decreases from tens to several meters. Their appearance has many negative consequences.

In particular, water leaves through the cracks and significantly reduces the bearing capacity of the base layers and soil of the earthen wearing (including due to salinity during the ingress of anti-icing chemicals on concrete pavement), as a consequence, in the zone of cracks there is a significant weakening of the road construction. This leads to the acceleration of the occurrence of various types of destruction under the transport loads influence and climatic factors as the asphalt concrete wearing and the road pavement as a whole. Therefore, in areas of cracks, chips, chipping, pits, potholes, subsidence, cracks and tracks are often formed. In this regard, the appearance of transverse thermal cracks leads to premature failure of the road pavement and reduce the regulatory service terms. The formation of thermal

cracks in the asphalt concrete wearing requires significant additional costs for their repair. The repair of asphalt concrete wearing with transverse thermal cracks is a complex, time-consuming and expensive process that involves a lot of manual labor and is accompanied by the consumption of a large amount of energy and high quality scarce materials, deteriorating conditions and traffic safety. At the same time, the applied repair measures do not always achieve the desired result.

It should be noted that one of the reasons for the premature formation of transverse thermal cracks is the lack of normative regulatory methods of asphalt concrete wearing calculating for thermal crack resistance, which in practice try to compensate for measures to regulate the properties of asphalt and improving the design. However, these measures do not produce the expected results. In addition, there are no methods that take into account the change in the stress-strain state of flexible pavement and the prediction of its durability over the life cycle, the appearance of transverse thermal cracks in the asphalt concrete wearing is taken into account. At the same time, in order to ensure the necessary operational status of roads in the existing practice, certain repairs are performed. However, using the design of the repair types the actual change in the stress-strain state of the road pavement and how this change in the maintenance course will affect its durability is not taken into account.

Thus, the above mentioned material testifies to the of thesis research relevance.

The problem and the background of ensuring the pavement durability with asphalt wearing having transverse thermal cracks is represented **in the first chapter of the thesis**, the pavement maintenance peculiarities with transverse cracks in asphalt concrete wearing is analyzed, the existing measures to increase asphalt concrete endurance is shown, known approaches to the estimation of cross-sectional road durability with cracks in asphalt concrete wearing are highlighted, as well as the purpose and objectives of the research.

An analysis of existing solutions on the problem of the thermal cracking prediction shows that solutions to the theory of elasticity, which did not allow to reflect the real behavior of the viscoelastic properties of materials have been used in early approaches. In recent years, many investigations have begun to use methods that take

into account the thermo-rheological properties of materials in road construction pavement. Existing methods of investigating the effect of transverse cracks on the durability of asphalt concrete wearing in most cases use finite element methods to predict the thermal stress of road pavement. Approaches aimed at ensuring the durability of cross-section road cracks in asphalt concrete wearing are mainly based on the application of reinforcing materials, sealing the wearing due to the cracking of sealants, as well as the arrangement of protective layers from cast emulsion or mineral tops. However, the issue of increasing the durability of cross-sectional road cracking in asphalt concrete wearing has not been sufficiently studied.

Theoretical background of asphalt concrete wearing of flexible pavement with transverse cracking is created **in the second chapter of the thesis**. These researches are based on the application of the basic principles of the thermo-viscosity and elasticity theory and the kinetic molecular theory of solids strength postulates used in the study of the durability of road pavement have been made by the scientific school of Professor B.S. Radovsky.

Taking into account the fact that in the zone of transverse cracking the weakest elements of the road construction such as soil base and layers of loose and non-bonded materials are increasing. Therefore, the effect of transverse thermal cracking in asphalt concrete wearing on the durability of road pavement, analyzing the change in apparent time has been made by Bailey, damage rate as a measure of the exhaustion of its durability from the effects of factors affecting the criterion of the boundary state for the first group, layers of non-bonded and low-bonded materials by shear resistance is proposed to evaluate. This approach is to use this indicator as the dominant integral characteristic of the durability loss of road pavement and is established by summing its values at each characteristic stage of maintenance, taking into account the "history" of repair activities.

The basic calculation schemes of the asphalt concrete wearing course before and after the formation of transverse thermal cracks are considered. Theoretical studies were performed to develop a method for evaluating the effectiveness of sealing materials in the repair of asphalt concrete wearing with cross cracks.

The methodology has been made by Professor V.I. Gulyayev based on finite element method is used to study the complex effect of transport loads and temperature fluctuations on the stress-strain state of road construction with transverse cracks of asphalt concrete wearing.

Based on the applied theoretical background of the study, a method of estimating the effect of transverse thermal cracks in the asphalt concrete wearing on the durability of road pavement from the complex influence of factors is taken into account, the thermo-rheological properties of asphalt concrete wearing is also considered. This method is to use an indicator of the durability degree over the life course of the limit state criterion for the soil base and layers of non-bonded and low-bonded materials which is called by shear resistance.

The results of experimental studies on the durability of cross-cracked roads in asphalt concrete wearing is highlighted **in the third chapter of the thesis**. The studies consist of field and laboratory tests and a numerical experiment.

Due to the basis for field research the classification of transverse thermal cracks according to their most characteristic features has been developed, characteristic types of transverse thermal cracks, as well as types and destruction kinetics of road pavement with transverse thermal cracks in asphalt concrete wearing have been substantiated. A full-scale study to strengthen the rubble base by impregnating it in the zone of cracks, as well as to increase the adaptability of asphalt concrete layers during major repairs of streets and roads in Kyiv has been carried out. A study on the effect of reinforcing synthetic materials on increasing the fracture toughness of asphalt concrete layers was conducted.

The physical, mechanical and rheological characteristics of road-building materials and soils necessary for calculations in the study of the various factors influence on the durability of road pavement having asphalt concrete with thermal cracks were determined on the basis of the researched experiments and literature data.

For experimental studies of thermo-rheological and thermo-mechanical properties of materials used for the repair of asphalt concrete wearing with transverse thermal cracks, developed at NTU both standard and original methods have been

applied to determine the thermomechanical characteristics of asphalt concrete and sealants. The results of theoretical studies which confirm its consistency with the experimental data have also been evaluated.

Due to the numerical analysis using the finite element method, the tensile-deformed condition of the road pavement with the asphalt concrete wearing having thermal cracks, as well as the effect of strengthening the base under the transverse crack on the tensely deformed condition of the road pavement have been investigated.

The practical implementation of the research results to improve the durability of asphalt pavements with transverse thermal cracks has been described **in the fourth chapter of the thesis.**

Measures for practical application of the research results have been developed. These include:

- recommendations for the comprehensive enhancement of the strength of asphalt pavements with cross cracks;
- a technique for assessing the nature of cracking and justifying the choice of technology and mechanisms for restoring the bearing capacity of road construction wearing;
- method of calculation of flexible pavement with transverse thermal cracks in asphalt concrete wearing.

The application of the research results was confirmed by the relevant implementation notes. The research results were also implemented at NTU's educational process at the Faculty of Transport Construction while lecturing, conducting practical classes, enterprise practices and writing diploma projects.

Key words: asphalt pavement, durability, stress-strain state, flexible pavement, transverse temperature cracks.

Список публікацій здобувача

Монографії:

1. Густелєв О.О., Гуляєв В.І., Гайдачук В.В., Мозговий В.В., Заєць Ю.О., Шевчук Л.В., Шлюнь Н.В. Термопружний стан багатошарових дорожніх покриттів : монографія. К.: НТУ, 2019. 252 с.

Статті у виданнях іноземних держав або у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз:

2. Густелєв О.О., Гайдачук В.В., Радкевич А.В., Шевчук Л.В., Шлюнь Н.В. Термонапружене деформування шаруватого покриття на вгнутій ділянці дороги // Опір матеріалів і теорія споруд : наук.-техн. збірник. 2019. Вип. № 102. С. 180-190.

3. Густелєв А.А., Мозговой В.В., Шевчук Л.В. Анализ механизма подкрепления армирующей сеткой многослойного покрытия // Вестник КаздорНИИ : научно-практ. журнал. 2019. №1-2 (61-62). С. 141-148.

4. Густелєв О.О. Оцінювання ефективності герметизуючих матеріалів при ремонті асфальтобетонного покриття з поперечними тріщинами // Галузеве машинобудування, будівництво : зб. наук. праць. 2019. Вип. № 1 (52). С. 166-169.

Статті у фахових виданнях:

5. Густелєв О.О., Осипов В.О. До питання вибору матеріалів для влаштування горизонтальної дорожньої розмітки на окремих ділянках вулично-дорожньої мережі // Нові технології в будівництві : наук.-техн. журнал. 2018. Вип. № 34. С. 47-49.

6. Густелєв О.О., Мозговий В.В., Гайдачук В.В., Заєць Ю.О., Шевчук Л.В., Куцман О.М. Механічні ефекти і парадокси явищ термопружного напруження в конструкціях дорожніх одягів // Дороги і мости : зб. наук. праць. 2018. Вип. № 18. С. 128-145.

7. Густелєв О.О., Гайдачук В.В., Мозговий В.В., Шевчук Л.В. Аналіз деформування дорожнього покриття на металевій плиті Південного моста // Промислове будівництво та інженерні споруди : наук.-виробн. журнал. 2019. № 1. С. 31-38.

8. Густелєв О.О., Гуляєв В.І., Мозговий В.В., Шлюнь Н.В., Куцман О.М., Баран С.А. Дослідження напружено-деформованого стану дорожнього одягу з

укріпленою основою під поперечними тріщинами і швами // Вісник НТУ. Серія «Технічні науки»: наук.-техн. збірник. 2019. Вип. № 1 (43). С. 26-38.

Опубліковані праці апробаційного характеру:

9. Густелев А.А., Кияшко И.В. Концепция совершенствования технологии ремонтов слоев дорожных одежд на основе органических вяжущих. Современные технологии и материалы в дорожном строительстве : материалы международной научно-практической конференции. Харьков: 2006. С. 68-70.

10. Густелєв О.О., Жданюк В.К. On the issue of repair technique of asphalt pavements with through-the-thickness temperature cracks (04.10.2006 – 06.10.2006). Warszawa : I Polski kongres dogowy, 2006. С. 485-490.

11. Густелев А.А., Титарь В.С., Мартымянов С.В. Основные причины трещинообразования на асфальтобетонных покрытиях и пути их устранения. Научные исследования наносистемы и ресурсосберегающие технологии в стройиндустрии : мат. XVIII междун. наук.-практ. конф. (18.09.2007 – 19.09.2007 р.). Белгород, 2007. С. 144-149.

12. Густелев А.А., Кияшко И.В., Минаков О.С. Повышение трещиностойкости асфальтобетонных дорожных покрытий. Эффективные материалы, технологии, машины и оборудование для строительства и эксплуатации современных транспортных сооружений : мат. междун. наук.-практ. конф. молодых ученых (03 – 04 декабря 2009 г.). Белгород, 2009. С. 144-149.

13. Густелєв О.О., Осипов В.О. Вивчення впливу підвищених пішохідних переходів на курсову стійкість автомобілів. Новітні технології в автомобілебудуванні, транспорті і при підготовці фахівців : наук. праці міжн. наук.-практ. та наук.-метод. конф., присв. 85-річчю кафедри автомобілів з Дня народж. проф. А. Б. Гредескула (20 – 21 жовтня 2016 р., м. Харків). Харків, 2016. С.76.

14. Густелєв О.О., Осипов В.О. Щодо впливу штучних нерівностей покриття автодоріг на курсову стійкість автомобілів. Створення, експлуатація і ремонт автомобільного транспорту та будівельної техніки : мат. всеукр. наук.-техн. конф. (26 – 27 квітня 2017 р., м. Полтава). Полтава, 2017.

15. Густелев О.О., Осипов В.О. Огляд інженерних рішень, які спроможні мінімізувати аварійність за участю автомобільного транспорту. Автомобільний транспорт і автомобілебудування. Новітні технології і методи підготовки фахівців (19 – 20 жовтня 2017 р., м. Харків). Харків, 2017. С. 81-82.

16. Густелев А.А., Гайдайчук В.В., Мозговой В.В., Шевчук Л.В., Шлюнь Н.В. Термонапряженное состояние дорожных покрытий. Сучасні методи і проблемно-орієнтовані комплекси розрахунку конструкцій і їх застосування у проектуванні і навчальному процесі: III міжн. наук.-практ. конф. (24 – 25 вересня 2019 р., м. Київ). Київ, 2019.

Свідоцтва та патенти:

17. Патент України на корисну модель № 113145 Україна, МПК (2017.01), E01F9/00. Спосіб влаштування горизонтальної дорожньої розмітки на проїзdnій частині доріг та вулиць / Густелев О.О. Дата реєстрації 10.01.2017 р.

18. Патент України на корисну модель № 118040 Україна, МПК (2017.07), E01C23/14. Спосіб плавлення снігу на стаціонарному снігоплавильному пункті за допомогою умовно теплих господарсько-побутових вод/ Густелев О.О. Дата реєстрації 25.07.2017 р.

Опубліковані праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

19. Густелев А.А., Кияшко И.В., Стороженко М.С. Влияние сквозных поперечных трещин на условия службы дорожных конструкций // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво: наук.-техн. збірник. 2004. Вип. № 71. С. 36-39.

20. Густелев О.О., Стороженко М.С., Кияшко І.В. Формування однорідної якості асфальтобетону в залежності від параметрів і режимів технологічного процесу // Дороги і мости : зб. наук. праць. 2006. Вип. № 5. С. 305-311.

ЗМІСТ

	Стор.
ВСТУП	22
РОЗДІЛ 1 СТАН ПИТАННЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ДОРОЖНЬОГО ОДЯГУ З АСФАЛЬТОБЕТОННИМ ПОКРИТТЯМ, ЩО МАЄ ПОПЕРЕЧНІ ТЕМПЕРАТУРНІ ТРІЩИНИ	27
1.1 Особливості експлуатації дорожнього одягу з поперечними тріщинами в асфальтобетонному покритті	27
1.2 Існуючі заходи підвищення довговічності дорожнього одягу з поперечними тріщинами в асфальтобетонному покритті	29
1.3 Існуючі методи оцінювання тріщиноутворення в асфальтобетонному покритті	35
1.4 Короткі висновки	47
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ АСФАЛЬТОБЕТОННОГО ПОКРИТТЯ НЕЖОРСТКОГО ДОРОЖНЬОГО ОДЯГУ З ПОПЕРЕЧНИМИ ТРІЩИНАМИ	48
2.1 Постановка задачі щодо дослідження довговічності асфальтобетонного покриття нежорсткого дорожнього одягу з поперечними тріщинами	48
2.2 Метод розрахунку нежорсткого дорожнього одягу з асфальтобетонним покриттям, що має поперечні температурні тріщини	49
2.3 Оцінювання ефективності герметизуючих матеріалів при ремонті асфальтобетонного покриття з поперечними тріщинами	55

2.4	Дослідження напружено-деформованого стану від дії транспортного навантаження конструкції дорожнього одягу з асфальтобетонним покриттям, що має поперечні тріщини	60
2.5	Короткі висновки	63
РОЗДІЛ 3	ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ДОРОЖНЬОГО ОДЯГУ З ПОПЕРЕЧНИМИ ТРІЩИНАМИ В АСФАЛЬТОБЕТОННОМУ ПОКРИТТІ	65
3.1	Натурне дослідження стану асфальтобетонного покриття з температурними поперечними тріщинами	65
3.2	Експериментальне дослідження терморелогічних і термомеханічних властивостей матеріалів, що застосовуються для ремонту асфальтобетонного покриття з поперечними температурними тріщинами	69
3.3	Чисельний аналіз підвищення довговічності нежорсткого дорожнього одягу з поперечними тріщинами в асфальтобетонному покритті	81
3.4	Короткі висновки.....	90
РОЗДІЛ 4.	ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	93
4.1	Рекомендації з комплексного підвищення міцності дорожнього одягу з асфальтобетонним покриттям, що мають поперечні тріщини	93
4.2	Методика оцінювання характеру розтріскування та обґрунтування вибору технології і механізмів для відновлення несної здатності конструкції дорожнього одягу	94
4.3	Загальні положення методики розрахунку нежорсткого дорожнього одягу з асфальтобетонним покриттям, що має поперечні температурні тріщини	95
4.4	Вдосконалення технології армування асфальтобетонного покриття з поперечними температурними тріщинами	101

4.5	Технологія ремонту асфальтобетонних покриттів в зоні каналізаційних люків	105
4.6	Оцінювання економічної ефективності герметизації тріщин	109
4.7	Короткі висновки	115
ВИСНОВКИ		116
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ		119
Додаток А	Методологія визначення напружено-деформованого стану конструкції дорожнього одягу з асфальтобетонним покриттям, що має поперечні тріщини	135
Додаток Б	Приклади результатів обстежень руйнувань нежорсткого дорожнього одягу з поперечними тріщинами в асфальтобетонному покритті та застосування самоклеючих армуючих синтетичних матеріалів на об'єктах м. Києва	159
Додаток В	Заходи щодо підвищення довговічності дорожнього одягу з поперечними тріщинами в асфальтобетонному покритті	180
Додаток Г	Довідки про впровадження результатів розробок	187
Додаток Д	Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації	196

ВСТУП

Актуальність роботи. Відомо, що одним із найбільш розповсюджених матеріалів покриття як на автомобільних дорогах загального користування, так і на комунальних вулицях і дорогах з нежорстким дорожнім одягом є асфальтобетон. Це пов'язано з рядом його переваг: доступність компонентів, технологічність у приготуванні і застосуванні, широкий спектр різновидів, можливість направленою регулювання властивостей, високі атмосферостійкість, міцність і довговічність тощо.

Однак не зважаючи на велику кількість проведених досліджень і розроблених практичних заходів для запобігання й уникнення поперечних температурних тріщин, ці види руйнувань ще залишаються одними із найбільш розповсюджених дефектів асфальтобетонного покриття. Ці поперечні тріщини температурно-усадного походження утворюються з певним кроком по довжині покриття у результаті як сезонних, так і добових коливань температури. У процесі експлуатації утворюються нові поперечні температурні тріщини і відстань між ними зменшується від десятків до декількох метрів. Їх поява призводить до багатьох негативних наслідків.

Зокрема, через тріщини потрапляє вода і суттєво знижує несну здатність шарів основи і ґрунту земляного полотна (у тому числі через засоленість при потраплянні протиожедних речовин), як наслідок, у зоні тріщин виникає значне ослаблення дорожньої конструкції. Це призводить до прискорення появи різних видів руйнувань під дією транспортних навантажень і кліматичних факторів як самого асфальтобетонного покриття, так і дорожнього одягу в цілому. Тому в районах тріщин часто утворюються сколи, викришування, ямковість, вибоїни, просідання, сітка тріщин та колійність. У зв'язку з цим поява поперечних температурних тріщин призводить до передчасного виходу з ладу дорожнього одягу і зниження нормативних строків служби. Утворення температурних тріщини в асфальтобетонному покритті вимагає значних додаткових витрат на їх ремонт. Ремонт асфальтобетонного покриття з

поперечними температурними тріщинами є складним, трудомістким і дорогим процесом, що містить багато ручної праці і супроводжується витратою великої кількості енергії і високоякісних дефіцитних матеріалів, погіршення умов і безпеки руху. У той же час, застосовані ремонтні заходи не завжди досягають бажаного результату.

Слід відмітити, що однією із причин передчасного утворення поперечних температурних тріщин є відсутність нормативних методів розрахунку асфальтобетонного покриття на температурну тріщиностійкість, що на практиці намагаються компенсувати заходами з регулювання властивостей асфальтобетону та удосконаленням конструкцій дорожнього одягу. Однак ці заходи не дають очікуваних результатів. Крім того, також відсутні методи, що враховують зміну напружено-деформованого стану нежорсткого дорожнього одягу та прогнозування його довговічності протягом життєвого циклу з урахуванням появи поперечних температурних тріщин в асфальтобетонному покритті. При цьому для забезпечення необхідного експлуатаційного стану автомобільних доріг в існуючій практиці виконують певні ремонтні заходи. Однак при призначенні видів ремонту не враховується фактична зміна напружено-деформованого стану дорожнього одягу і як ця зміна у процесі експлуатації буде впливати на його довговічність.

Таким чином, вище наведене свідчить про актуальність дисертаційних досліджень.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Наукові результати, отримані в роботі, пов'язані з напрямками плану науково-дослідної роботи Національного транспортного університету «Математичне моделювання напружено-деформованого стану дорожнього одягу з температурними швами і тріщинами» (д/б № 53, номер державної реєстрації 0119U101797), а також за планом науково-дослідних робіт Державного агентства автомобільних доріг України, а саме: «Провести дослідження, удосконалити методику визначення зчеплення між асфальтобетонними шарами дорожнього одягу та

експериментальний зразок приладу для його визначення» (д/б № 53-19, номер державної реєстрації 0119U101525).

Мета і задачі досліджень. *Мета* досліджень – підвищення довговічності нежорсткого дорожнього одягу з поперечними температурними тріщинами в асфальтобетонному покритті.

Для досягнення мети роботи необхідно було вирішити наступні *задачі*:

- проаналізувати стан питання забезпечення довговічності дорожнього одягу з асфальтобетонним покриттям, що має поперечні температурні тріщини;
- розробити метод оцінювання впливу поперечних температурних тріщин в асфальтобетонному покритті на довговічність дорожнього одягу від комплексного впливу чинників з урахуванням реологічних властивостей дорожньо-будівельних матеріалів і ґрунту земляного полотна;
- розробити математичні моделі оцінювання стійкості герметиків для ремонту покриття з поперечними тріщинами до дії коливань температури;
- розробити методики і провести експериментальні та числові дослідження впливу чинників на підвищення довговічності дорожнього одягу з поперечними тріщинами в асфальтобетонному покритті;
- розробити практичні заходи щодо підвищення довговічності дорожнього одягу з асфальтобетонним покриттям, що має поперечні температурні тріщини.

Об'єкт дослідження – нежорсткий дорожній одяг з асфальтобетонним покриттям.

Предмет дослідження – довговічність дорожнього одягу з асфальтобетонним покриттям, що має поперечні температурні тріщини.

Методи дослідження – експериментально-аналітичні.

Наукова новизна отриманих результатів:

- *вперше розроблено:* метод оцінювання впливу поперечних температурних тріщин в асфальтобетонному покритті на довговічність

дорожнього одягу від комплексного впливу чинників з урахуванням реологічних властивостей дорожньо-будівельних матеріалів і ґрунту земляного полотна;

- *удосконалено:* метод перевірки стійкості герметиків для ремонту покриття з поперечними тріщинами до дії коливань температури.

Практичне значення одержаних результатів:

- *розроблено:* методику розрахунку нежорсткого дорожнього одягу з поперечними тріщинами в асфальтобетонному покритті;
- *удосконалено:* заходи щодо підвищення довговічності дорожнього одягу з поперечними тріщинами в асфальтобетонному покритті; технології виконання робіт при ремонті асфальтобетонного покриття з температурними поперечними тріщинами.

Результати роботи використані:

При удосконаленні методики обстеження стану автомобільних доріг з асфальтобетонним покриттям, що має поперечні тріщини, зокрема, було враховано запропоновану класифікацію тріщин. Розроблені вимоги до герметизуючих матеріалів для ремонту асфальтобетонного покриття, що має поперечні тріщини; при опрацюванні верифікаційних звітів Ініціативи з прозорості інфраструктури CoST, у межах яких були проведені дослідження і оцінювання якості проектних рішень та підрядних робіт на автомобільних дорогах з асфальтобетонним покриттям; в діяльності фірми BUCHER Municipal, зокрема, під час випробування обладнання для герметизації тріщин.

Особистий внесок здобувача. У спільних публікаціях автором сформульовані особливості напружено-деформованого стану дорожнього одягу з поперечними тріщинами в асфальтобетонному покритті та його вплив на довговічність дорожньої конструкції [1, 12, 15], проаналізовано та узагальнено причини тріщиноутворення асфальтобетонного покриття і обґрунтовані шляхи їх усунення [7-8, 10-11, 16]. За результатами досліджень [5, 6, 9] була розроблена концепція удосконалення технології ремонту дорожнього одягу з асфальтобетонним покриттям, що має поперечні тріщини.

Теоретичні та експериментальні результати досліджень, які виносяться на захист, отримані автором самостійно та полягають у тому, що за результатами оцінювання характеру розтріскування було виконано обґрунтування вибору технології і механізмів для відновлення несної здатності конструкції дорожнього одягу [2-4].

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на міжнародних науково-практичних конференціях: «Сучасні технології і матеріали в дорожньому будівництві» 2006 р., Харків, Україна; «I Polski kongres dogowy» 04 – 06 жовтня 2006 р., Варшава, Польща; «Наукові дослідження щодо наносистем і ресурсозберігаючі технології у великих індустріях» 18 – 19 вересня 2007 р., Белгород, Росія; на міжнародній науково-практичній конференції молодих вчених «Ефективні матеріали, технології, машини та обладнання для будівництва та експлуатації сучасних транспортних підприємств» 03 – 04 грудня 2009 р., Белгород, Росія; «Новітні технології в автомобілебудуванні, транспорті і при підготовці фахівців» 20 – 21 жовтня 2016 р., Харків, Україна; «Створення, експлуатація і ремонт автомобільного транспорту та будівельної техніки» 26 – 27 квітня 2017 р., Полтава, Україна; «Автомобільний транспорт і автомобілебудування. Новітні технології і методи підготовки фахівців» 19 – 20 жовтня 2017 р., Харків, Україна; «Сучасні методи і проблемно-орієнтовані комплекси розрахунку конструкцій і їх застосування у проектуванні і навчальному процесі» 24 – 25 вересня 2019 р., Київ, Україна.

Публікації. Основний зміст дисертаційної роботи викладено у 20 публікаціях: з них 1 монографія, 3 статті у виданнях іноземних держав або у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз (у тому числі одна одноосібна), 4 статей у фахових виданнях, 8 праць апробаційного характеру, 2 праці, які додатково відображають наукові результати дисертації. За матеріалами дисертаційних досліджень отримано 2 патенти України.

Структура дисертації. Дисертація включає вступ, чотири розділи, загальні висновки, список використаних джерел із 155 найменувань та п'ять додатків. Основний текст викладений на 120 сторінках. Текст ілюструється 27 рисунками і містить 9 таблиць.

РОЗДІЛ 1

СТАН ПИТАННЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ДОРОЖНЬОГО ОДЯГУ З АСФАЛЬТОБЕТОННИМ ПОКРИТТЯМ, ЩО МАЄ ПОПЕРЕЧНІ ТЕМПЕРАТУРНІ ТРІЩИНИ

1.1 Особливості експлуатації дорожнього одягу з поперечними тріщинами в асфальтобетонному покритті

Дослідженню довговічності нежорсткого дорожнього одягу з асфальтобетонним покриттям присвячені роботи багатьох учених: І. Айзенмана, О.Т. Батракова, А.Г. Батракової, Г.С. Бахраха, А.М. Богуславського, О.К. Бірулі, Е. Бевінг, С. Браун, В.І. Братчуна, В.А. Варенько, О.П. Васільєва, І.П. Гамеляка, Л.Б. Гезенцвея, М.В. Горелишева, Л.М. Гохмана, Л.С. Губача, В.І. Гуляєва, М.М. Дмитрієва, В.К. Жданюка, В.О. Золотарьова, М.М. Іванова, В.В. Ільченка, І.В. Кіяшка, І.В. Корольова, Б.І. Ладигіна, К. Маклуфа, О.Ю. Мерзлікіна, В.В. Мозгового, А. Молінар, К. Монісміта, Ю.Є. Нікольського, А.М. Онищенко, Д.О. Павлюка, Б.Г. Печеного, В.Г. Піскунова, Б.С. Радовського, І.М. Руденської, А.В. Руденського, В.Я. Савенка, А.О. Салля, В.М. Сіденка, Г.К. Сюньї, Б.Б. Телтаєва, Л. Франкен та інших дослідників [1-103].

Як свідчить аналіз розповсюдженості матеріалів покриття, асфальтобетон є найбільш поширеним матеріалом, як на автомобільних дорогах загального користування, так і на комунальних вулицях і дорогах з нежорстким дорожнім одягом. Так, за даними Б.С. Радовського [79] в більшості країн він складає близько 95% від протяжності доріг з вдосконаленим покриттями капітального типу. Так, наприклад, в США приблизно 94% доріг мають асфальтобетонне покриття, у країнах Західної Європи – більше 97 %. Це пов'язано з рядом переваг: доступність компонентів, технологічність у приготуванні і застосуванні, широкий спектр різновидів, можливість направленої регулювання властивостей, високі атмосферостійкість, міцність, довговічність та ін.

Асфальтобетонне покриття в процесі служби піддається дії багатьох несприятливих факторів [4, 6-7, 12-18, 27-28, 32-35, 40-54, 57-102, 110, 141-144]: атмосферні опади, добові та сезонні коливання температури, поперемінне заморожування і відтавання води в порах та пошкоджених місцях, антиожедні реагенти, циклічні навантаження від транспортних засобів та ін.

Дослідження багатьох вчених [8-9, 28, 54, 63-67, 77, 82, 95-101, 133-144] показують, що найбільш поширеним видом руйнування асфальтобетонного покриття є температурні поперечні тріщини. Однією з причин передчасного утворення поперечних температурних тріщин є відсутність нормативних методів розрахунку асфальтобетонного покриття на температурну тріщиностійкість, що на практиці намагаються компенсувати заходами з регулювання властивостей асфальтобетону та удосконаленням конструкцій дорожнього одягу. Однак, не зважаючи на велику кількість проведених досліджень і розроблених практичних заходів для запобігання і уникнення поперечних температурних тріщин ці види руйнувань ще залишаються одними із найбільш розповсюджених дефектів асфальтобетонного покриття, оскільки виникнення температурних поперечних тріщин часто є першопричиною руйнування самого асфальтобетонного покриття і значно прискорює його. Такі тріщини можуть складати більшу частину від усіх руйнувань, що призводить до ослаблення всієї конструкції дорожнього одягу [4, 6-7, 12-18, 27-28, 32-35, 40-54, 57-102, 110, 141-144]. При цьому порушується суцільність покриття у зоні тріщин і в результаті значного зниження несної здатності шарів покриття виникає перенапруження шарів основи і ґрунту земляного полотна. До них через тріщини потрапляє вода, при наявності якої в місці руйнування під дією швидкого проїзду великовантажних транспортних засобів відбувається швидке переміщення води під покриттям, що викликає ефект гідравлічного удару, який в свою чергу суттєво зменшує міцність цих шарів (у тому числі через засоленість при потраплянні антиожедних речовин). Це призводить до прискорення появи різних видів руйнувань під дією транспортних навантажень і кліматичних факторів як самого асфальтобетонного покриття, так і дорожнього одягу в цілому. Тому в зоні тріщин часто

утворюються сколи, викришування, ямковість, вибоїни, просідання, сітка тріщин, колійність. У зв'язку з цим поява поперечних температурних тріщин призводить до передчасного виходу з ладу дорожнього одягу і зниження нормативних термінів служби [4, 6-7, 12-18, 27-28, 32-35, 40-54, 57-102, 110, 141-144].

З виникненням тріщин поступово погіршується рівність покриття, що суттєво знижує комфортність руху, підвищуються транспортні витрати.

Руйнування суттєво впливають на погіршення керування транспортними засобами, негативно впливають на реакцію водіїв, створюють аварійно-небезпечні умови [4-7, 12-14, 28, 51-54, 60, 70-71, 77, 90, 94, 104-106, 109-114]. Все це потребує частого виконання ремонтних робіт і створює незручність для проїзду транспортних засобів.

Утворення температурних тріщини в асфальтобетонному покритті вимагає значних додаткових витрат на їх ремонт. Ремонт асфальтобетонного покриття з поперечними температурними тріщинами є складним, трудомістким і дорогим процесом, що потребує багато ручної праці і супроводжується витратою великої кількості енергії і високоякісних дефіцитних матеріалів, погіршення умов і безпеки руху. У той же час, застосовані ремонтні заходи не завжди досягають бажаного результату.

Таким чином, підвищення довговічності нежорсткого дорожнього одягу з поперечними тріщинами в асфальтобетонному покритті є досить актуальним питанням.

1.2 Існуючі заходи підвищення довговічності дорожнього одягу з поперечними тріщинами в асфальтобетонному покритті

Для підвищення температурної тріщиностійкості в асфальтобетонному покритті застосовують матеріалознавчі, конструктивні та технологічні заходи.

До основних пропозицій матеріалознавчого напрямку відносять: застосування бітуму третього структурно-реологічного типу; використання

бітумів, модифікованих добавками у вигляді полімерів, синтетичних каучуків, відходів гумової промисловості, адгезивів; мікроармування дисперсними мікроармуючими мінеральними або полімерними волокнами; макроармування синтетичними армуючими матеріалами.

До заходів щодо вдосконалення конструкцій дорожнього одягу для підвищення температурної тріщиностійкості асфальтобетонного покриття, відносять: збільшення товщини покриття; влаштування верхніх шарів покриття у підвищеної температурної тріщиностійкості; влаштування в покритті температурних швів, влаштування тріщиноперериваючих та армуючих швів на тріщинувато-блочній основі.

До технологічних заходів відносять: зменшення температури влаштування основи з матеріалів, укріплених неорганічними в'язучими з подальшою нарізкою і влаштуванням температурних швів; зниження температури укладання асфальтобетонного шару; зменшення швидкості охолодження шару при його влаштуванні (при знижених температурах) шляхом застосування тимчасової теплоізоляції; підвищення однорідності асфальтобетонних сумішей (застосування перевантажувачів) та підвищення однорідності товщини асфальтобетонного покриття при його влаштуванні.

Підходи, що направлені на забезпечення довговічності дорожнього одягу з поперечними тріщинами в асфальтобетонному покритті, головним чином, ґрунтуються на застосуванні армуючих матеріалів, герметизації покриття за рахунок заробки тріщин герметиками, а також при влаштуванні захисних шарів з литих емульсійно-мінеральних сумішей або поверхневої обробки.

На практиці для армування асфальтобетонних шарів автомобільних доріг України широке застосування армуючими синтетичними матеріалами (АСМ) розпочалося з 90-х років минулого століття [110, 118, 132-133]. На початку їх застосування базувалося на досвіді зарубіжних країн і рекомендацій зарубіжних виробників АСМ [129]. З появою першого практичного досвіду і отриманих результатів досліджень з'явилися вітчизняні нормативні документи і

рекомендації [122-129], а згодом і будівельні нормативи на основі гармонізації європейських стандартів.

АСМ застосовують для: перерозподілу зусиль в конструкції дорожнього одягу; підвищення довговічності та запобігання тріщиноутворенню в асфальтобетонних шарах; підвищення несучої здатності та збільшення терміну служби конструкції в цілому; запобігання утворенню відображених тріщин в покритті на тріщинувато-блочній основі. Завдяки застосуванню АСМ в пакеті асфальтобетонних шарів досягають зменшення колійності, тріщиноутворення від втоми, товщини шарів підсилення, кількості відображених тріщин.

У роботі [131] наведені результати впливу параметрів технології армування асфальтобетону армуючими сітками на його механічні властивості та оцінювання ефективності роботи в асфальтобетонних композиціях армуючих сіток, яка в значній мірі залежить від параметрів технології їх застосування. Для цього проводились експериментальні дослідження по встановленню оптимальних витрат матеріалу підґрунтовки, впливу температури основи на механічні характеристики, оптимальної температури суміші асфальтобетону в залежності від температурних умов виконання робіт, раціональних умов застосування сітки та армуючого ефекту при застосуванні полімерної і базальтової сіток.

Отримані результати по визначенню міцності свідчать, що при армуванні асфальтобетону сітками його міцність збільшується, причому це збільшення залежить від швидкості навантаження V_{σ} . Коефіцієнт збільшення міцності K_{m_i} зростає при зменшенні V_{σ} не залежно від виду сітки. Але абсолютне значення цих показників завжди більше у зразків армованих полімерними сітками, порівнюючи із зразками, армованими базальтовою сіткою в середньому в 1,4 рази [131, 144]. За отриманими результатами автори роблять висновки, що для досягнення найкращих показників міцності і довговічності армованого синтетичними сітками асфальтобетону, необхідно індивідуально встановлювати оптимальні технологічні параметри для врахування всіх особливостей роботи дорожнього покриття армованого синтетичними сітками з урахуванням: складу

і властивостей асфальтобетону, властивостей його компонентів; властивостей і складу в'язучого, що використовується для підgruntовки; температури основи, повітря, асфальтобетонної суміші; витрат підgruntовки та ін.

Крім армування асфальтобетонних шарів для зменшення негативного впливу температурних тріщин на довговічність дорожнього одягу набули широкого застосування технології герметизації асфальтобетонного покриття [116 - 126].

В існуючій практиці для забезпечення водонепроникності асфальтобетонного покриття і зменшення негативних впливів наслідків від цього на міцність та довговічність всієї конструкції дорожнього одягу, здійснюють герметизацію температурних поперечних тріщин за допомогою різних герметиків. Багатьма дослідниками зроблено висновок, що ефективність їх роботи залежить від адгезивної міцності на контакті «герметик – асфальтобетонне покриття» та забезпечення суцільності герметизуючого матеріалу у процесі експлуатації. Найбільш впливовими факторами у цій ситуації є деформування асфальтобетонного покриття при зниженні температури у процесі її зміни при сезонних та добових коливаннях [108, 122].

Одним із способів їх запобігання є влаштування "організованих тріщин", які утворюють шляхом нарізання швів у новому покритті над швами існуючого покриття, а потім проводиться їх герметизація [118, 122, 124, 125]. Одним із поширених варіантів технології герметизації передбачається, що перед початком ремонтних робіт проводять ретельну обробку швів: видаляють матеріал, що використовувався для заливання шва. Глибину шва роблять не меншою, ніж половина сумарної товщини асфальтобетонних шарів, а ширину – не більшою ніж 10 мм.

Застосовують наступну схему влаштування шва в асфальтобетонному покритті:

- нарізка шва механічним нарізчиком;
- очищення шва механічною щіткою;
- продування, просушування, прогрівання шва;

- заливання шва розігрітим герметиком.

Для нарізання швів використовують механічні машини або ручні наріжчики швів, які оснащені спеціальними алмазними дисками діаметром не менше ніж 180 мм. Якщо заливка швів ускладнена, то припускається влаштування фасок на верхніх кромках шва. Прочищення нарізаних швів здійснюють механічними щітками. Нарізані та прочищені шви продувають стиснутим гарячим повітрям через тепловий спис. Стінки швів у асфальтобетонних покриттях допускається не обробляти полімерною ґрунтовкою, якщо їх очищення здійснюється з використанням теплового списа безпосередньо перед заливкою мастики. Застосування теплового списа забезпечує видалення вологи і нагрівання стінок шва. Тріщини герметизують відразу після їх очищення та просушування. Герметизацію швів виконують за допомогою полімерно-бітумних мастик гарячого застосування. Ці герметики поставляються на об'єкт у вигляді брикетів. Брикети розігрівають у спеціальній двокотловій плавильній установці, яка оснащена підігрівом та лопасною мішалкою. Температура розігрівання герметика повинна знаходитись в межах від робочої температури заливки до температури безпечного розігріву, що зазначені в інструкції виготовлювача. Герметизацію швів здійснюють за допомогою механічних заливщиків, які мають обігрів ємкості, що запобігає загущенню мастики. Забороняється розігрів герметика до температури вище ніж 200 °C або максимальної температури, що зазначена в інструкції по експлуатації, а також зберігання більше ніж 8 годин у розігрітому стані. Подача герметика в шов здійснюється за допомогою насоса по мастикопроводу через сопло діаметром від 5 мм до 8 мм. Шов заповнюється гарячим герметиком за один або два проходи. Рівень заповнення здійснюють нижче за кромки шва на (2-4) мм. Зайву кількість герметика, що виступає над поверхнею покриття, видаляють для запобігання його прилипання до коліс автотранспорту.

Роботи з герметизації швів виконують в суху погоду, за температури повітря не нижче ніж 5 °C. У випадках виконання робіт за складних погодних умов слід керуватися [123-124]. За необхідності проїзду автотранспорту по

асфальтобетонному покриттю з герметизованими деформаційними швами, при температурі герметика вище ніж 30 °С, шви присипають борошном доломітовим або крейдою меленою.

Останні 40 років стратегія технічної політики в області ремонтів автомобільних доріг полягає у попередженні руйнувань дорожніх одягів. Такі профілактичні заходи все частіше здійснюються шляхом влаштування тонкошарових покриттів із монолітних матеріалів, які розвивалися поступово у напрямку зменшення товщини: тонкі (35-50 мм); особливо тонкі (20-35 мм); надтонкі (менше 20 мм). З точки зору дорожньо-будівельного матеріалу застосування особливо тонких і надтонких покриттів пов'язано з литими емульсійно-мінеральними сумішами [135 - 140].

На сьогоднішній день розроблено методику проектування тонкошарових емульсійно-мінеральних покриттів на основі методів лабораторного моделювання, яка дозволяє визначити оптимальний склад суміші. Визначення товщини ТЕМП методами лабораторного моделювання обумовлено максимальним розміром кам'яного матеріалу. [137]. Дані методи проектування не дозволяють враховувати величину навантаження, жорсткість та рівність основи, тощо. Провідна роль у їх розробці і поширенні належить Міжнародній асоціації будівельників шламових покриттів (ISSA). Вагомий внесок зроблено також німецькою Асоціацією контролю якості холодних сумішей, Центральною лабораторією доріг і мостів Франції та іншими.

Тому, сучасні підходи забезпечення температурної тріщиностійкості асфальтобетонних шарів мають широкий арсенал заходів, направлених як на врегулювання властивостей асфальтобетону за рахунок раціонального підбору його складу, так і застосування ефективних модифікуючих матеріалів у сполученні із застосуванням армуючих сіток. Застосування тих чи інших заходів підвищення температурної тріщиностійкості асфальтобетонного покриття може бути ефективним тільки у тому разі, коли є можливість виконати кількісний аналіз їх дієвості. Нижче приводяться існуючі методики оцінки температурної тріщиностійкості асфальтобетонного покриття.

1.3 Існуючі методи оцінювання тріщиноутворення в асфальтобетонному покритті

Завдяки дослідженням багатьох вчених [1-103] встановлено, що температурні тріщини виникають від діючих в матеріалі, головним чином, розтягуючих напружень, обумовлених зміною температури. Вони сприяють розриву зв'язків у асфальтобетоні аж до утворення макротріщин.

Аналіз робіт, присвячених дослідженню тріщиностійкості дорожніх покриттів, свідчить, що на утворення тріщин в покритті при коливаннях температури найбільш істотно впливають такі чинники: невільна зміна розмірів покриття; розтяг матеріалу покриття над швами або тріщинами тріщиновато-блокових підстав; неоднакова температурна зміна розмірів складових компонентів асфальтобетону через розходження їхніх термо-механічних властивостей.

До теперішнього часу розроблений ряд пропозицій щодо підвищення температурної тріщиностійкості асфальтобетонних покриттів. Ці пропозиції можна розділити на дві основні групи: заходи, пов'язані з регулюванням властивостей матеріалу шару, та заходи, спрямовані на раціональне конструювання дорожнього одягу з метою поліпшення умов роботи шару при зміні температури.

Серед заходів першої групи найбільш поширені такі: збільшення релаксації напружень і деформативної здатності при низьких температурах (використання менш в'язких в'язучих, застосування полімерних добавок, гумової крихти, сірки та ін.), збільшення механічної міцності (за рахунок оптимальних складів, мікроармування синтетичними, металевими, азбестовими волокнами, а також за рахунок макроармування металевими і синтетичними сітками і нетканими матеріалами та ін) [2, 4, 11, 16, 22, 23 – 25, 32 – 39, 41, 47 – 50, 60 – 65, 69, 77 – 83, 91 – 97, 141- 144.].

Заходи, віднесені до другої групи зазвичай переслідують такі цілі: зменшення або усунення горизонтальної взаємодії між покриттям і розташованою під ним тріщинувато-блочною основою (за рахунок застосування різних прошарків між покриттям і основою з вискоеластичних і деформативних матеріалів, з зернистих або високоміцних матеріалів, а також з матеріалів, що зменшують тертя між покриттям і основою) [58 - 60, 78]; зменшення горизонтального температурного деформування плит тріщинувато-блочної основи (за рахунок збільшення товщини покриття, зменшення довжини плит основи і жорсткості його матеріалу), зменшення швидкості поширення тріщини до поверхні покриття (за рахунок збільшення товщини покриття, застосування армованих матеріалів у покритті) [12, 60, 78, 101].

Однак багато з запропонованих методів підвищення температурної тріщиностійкості не дозволяють отримати очікувані результати [60, 78, 122, 143 - 144]. У ряді випадків спосіб, що добре зарекомендував себе в одних умовах не робить істотного впливу на тріщиностійкість в інших подібних умовах експлуатації покриття.

Одним з ефективних шляхів забезпечення температурної тріщиностійкості, мабуть, є пред'явлення певних вимог до показників властивостей асфальтобетону при підборі складу суміші.

Тому зусилля багатьох дослідників були спрямовані на встановлення таких показників і способів оцінки температурної тріщиностійкості, які дозволили б правильніше відобразити фізичну сутність процесів руйнування покриття при зниженні температури, а також максимально врахувати властивості асфальтобетону.

Зокрема, ряд дослідників пропонували для забезпечення температурної тріщиностійкості асфальтобетону виходити з вимоги про те, щоб виникаючі в покритті розтягують температурні напруження або деформації не перевищували допустимих [40, 46, 60, 68, 73, 91]:

$$\sigma_T \leq [\sigma]; \quad \varepsilon_T \leq [\varepsilon]. \quad (1.1)$$

При цьому для визначення виникаючих від зміни температури напружень σ_m або деформацій ε_m дослідники використовували відомі рішення теорії термопружності та опору матеріалів:

$$\sigma_T = E \cdot \alpha \cdot (T_1 - T_2), \quad (1.2)$$

$$\varepsilon_T = \alpha \cdot (T_1 - T_2). \quad (1.3)$$

При визначенні температурної відносної деформації покриття з врахуванням температурної деформації:

$$\varepsilon_T = (\alpha_n - \alpha_0) \cdot (T_1 - T_2), \quad (1.4)$$

де α_n , α_0 – коефіцієнти лінійного температурного деформування покриття та основи відповідно.

де μ – коефіцієнт Пуассона.

При цьому $T_1 - T_2$ пропонувалося прийняти весь інтервал негативних температур. М.М. Іванов вказав, що нерівномірності розподілу температури по товщині покриття може бути враховано шляхом визначення відносного подовження від вигину за формулою:

$$\varepsilon = \alpha_1 \cdot \Delta T / 2 \cdot (1 - \mu^2), \quad (1.5)$$

де ΔT – різниця температур поверхні і підшви покриття.

Допустимі відносні подовження М.М. Іванов рекомендував визначати при швидкості деформування порядку $0,5 \cdot 10^5$ Л в мм/хв (Л – довжина зразка) і встановити для них значення не менше $4 - 8 \times 10^{-3}$ при 0°C .

Наступний крок на шляху більш повного врахування умов взаємодії покриття з основою був зроблений Г.К. Сюньї [91 - 93], який сформулював умову стійкості покриття до утворення макротріщин в наступному вигляді:

$$P_{\Pi} \geq P_T \geq P_C, \quad (1.6)$$

де P_{Π} – сила тертя і зчеплення покриття по основі;

P_T – температурне зусилля;

P_C – граничне зусилля, витримується асфальтобетоном при розриві.

Умова (1.6) більш детально Г.К. Сюньї представлені у формі

$$\sigma_{nf} \geq (\alpha_{\Pi} - \alpha_0) \cdot E \cdot (T_{\min} - T_x) \geq \sigma_C, \quad (1.7)$$

де n – вага покриття в межах одиниці площі його поверхні;

f – коефіцієнт тертя покриття по основі;

$T_{\min}$ – мінімальна температура, характерна для даної місцевості;

T_x – температура, при якій асфальтобетон переходить в крихкий стан;

σ_C – межа міцності асфальтобетону на розтягування.

З врахуванням особливостей реологій асфальтобетону і умов його роботи в покритті при охолоджуванні Б.І. Ладигінін була розроблена методика оцінки температурної тріщиностійкості, виходячи з рівняння моделі реології Максвелла [54]. Умова тріщиностійкості записується у вигляді:

$$\eta_0 = \frac{|\sigma_p|}{3\alpha \cdot \frac{dT}{dt}}, \quad (1.8)$$

де η_0 – фактична в'язкість непорушеної структури для конкретного інтервалу температури;

$[\sigma_p]$ – розрахунковий опір асфальтобетону розриву в області критичної температури;

dT/dt – критична швидкість охолодження покриття.

А.М. Богуславським для опису в'язко-пружно-пластичних властивостей асфальтобетону була використана модель реології, що включає паралельно зв'язані між собою тіла Кельвіна і Максвелла, які послідовно сполучені з елементом тертя Сен-Венана [5]:

$$R \geq \frac{(\alpha_{II} - \alpha_0) \cdot (T_1 - T_2) E \cdot V_1 \cdot \lg \tau_p(-)}{(1 - \mu) \cdot V \cdot \lg(1/(P_2 - P_1)) a}, \quad (1.9)$$

де R – міцність на стиск при -10°C і швидкості деформування 3 мм/хв;

P_1 і P_2 – кінетичні характеристики;

a – коефіцієнт (рівний 4);

E – модуль пружності асфальтобетону;

τ_p – тривалість знаходження асфальтобетону в напруженому стані (залежить від швидкості охолодження; при $V_1 = 10$ град/год – 3600 с, при $V_1 = 1$ град/год – 360 с).

Однак слід відмітити, що модельний підхід до опису в'язко-пружних властивостей асфальтобетону має певні недоліки. Прості моделі не дозволяють врахувати ряд важливих особливостей в'язко-пружної поведінки асфальтобетону, що як показано в роботах [25, 60, 78] та ін., може призводити до значних похибок в розрахунках.

Слід підкреслити, що в більшості розглянутих робіт, присвячених оцінці температурної тріщиностійкості покриттів, для визначення температурних напружень використовувалися рішення, які не враховують або недостатньо враховують зміну реологічних властивостей матеріалів із зміною температури. Тому закономірно, що за останні роки багатьма дослідниками були експериментально розкриті основні закономірності поведінки реології асфальтобетону з врахуванням зміни температури і показана можливість

використання теорії термо-в'язко-пружності для вивчення напружено-деформованого стану покриттів [41, 46, 47, 51, 60, 64, 73, 89, 114, 123, 125, 130, 142].

Як показано в роботах Б.С. Радовського [76 - 78] у багатьох випадках для опису в'язко-пружної поведінки дослідники застосовували функцію релаксації чи повзучості. Функцію релаксації та повзучості можна представити також і співвідношення Больцмана - Вольтера, де є можливість показати зв'язок між напруженням σ , деформацією ε і часом t для лінійно в'язко-пружних тіл

$$\sigma(t) = \int_0^t R(t-\tau) d\varepsilon(\tau) \text{ або } \varepsilon(t) = \int_0^t \Pi(t-\tau) d\sigma(\tau), \quad (1.10)$$

де t – момент часу, для якого визначається σ чи ε ;

τ – попередній момент часу ($0 < \tau < t$).

Функція релаксації $R(t)$ грає в співвідношенні (1.10) ту ж роль, що і модуль пружності E в законі Гука, але залежить від проміжку часу $(t-\tau)$, а функція повзучості $\Pi(t)$ аналогічна пружній податливості $1/E$, але так само залежить від часу $(t-\tau)$. Для однозначного формулювання зв'язку між напруженням, деформацією і часом досить мати будь-яку з функцій $R(t)$ чи $\Pi(t)$, тому що з (1.20) випливає, що вони зв'язані між собою точною рівністю

$$\int_0^t R(t-\tau) \Pi(\tau) d(\tau) = 1. \quad (1.11)$$

Функція релаксації являє собою відношення напруження, що змінюється в часі, $\sigma(t)$ до деформації, ε_0 , що підтримується постійною, а функція повзучості - відношення деформації, що змінюється в часі, $\varepsilon(t)$ до постійного напруження σ_0

$$R(t) = \sigma(t) / \varepsilon_0, \quad (1.12)$$

$$\Pi(t) = \varepsilon(t) / \sigma_0. \quad (1.13)$$

Для розв'язання задач про напруження у в'язко-пружних тілах, зокрема, про вплив тривалості дії навантаження на асфальтобетоні покриття, у ряді випадків як показано в роботах Б.С. Радовського [76 - 78] зручніше використовувати функцію релаксації. Однак випробування на повзучість простіше за випробування на релаксацію, тому що легше підтримувати постійним прикладене навантаження, ніж прикладену деформацію. Тому практично важливо мати простий і досить точний спосіб визначення $R(t)$ по експериментальних даних $\Pi(t)$. Застосовувати для цього точне співвідношення незручно у зв'язку з математичними труднощами. Тому представляє практичний інтерес наближена рівність

$$R(t) \cdot \Pi(t) \approx 1. \quad (1.14)$$

Це співвідношення вперше було помічено А.П. Бронським на основі зіставлення експериментальних кривих повзучості та релаксації. Потім Ю.Н. Работнов вказав, що має місце нерівність

$$R(t) \cdot \Pi(t) \leq 1. \quad (1.15)$$

На основі різних підходів Д.Феррі та Р.Шепері встановили наближену рівність

$$R(t) \cdot \Pi(t) \approx \sin(n\pi) / n\pi, \quad (1.16)$$

де n - параметр, що може бути виражений через кут зсуву фаз між напруженням і деформацією при випробуваннях матеріалу гармонійним навантаженням

$$n = 2\varphi / \pi . \quad (1.17)$$

За експериментальними даними В.А.Золотарьова, і Г.Добсона для асфальтобетонів тангенс кута втрат не перевищує 0,50: $tg\varphi < 0,50$, тобто $\varphi < 0,47$ і $n < 0,94/\pi$. Отже, найбільша можлива похибка наближеної рівності (1.18) для цих матеріалів складає до 14% (коли $R(t)/\Pi(t) = \sin 0,94/0,94 = 0.86$), причому для малих ($t \rightarrow 0$) і великих ($t \rightarrow \infty$) часів рівність (1.15) є точною. Таким чином, для асфальтобетонів можна визначати функцію релаксації з достатньою точністю за даними випробувань на повзучість, використовуючи формулу

$$R(t) \approx 1 / \Pi(t) . \quad (1.18)$$

Були розглянуті випробування зразка асфальтобетону на одноосьовий розтяг з розвантаженням. Припускали, що практично миттєво прикладене напруження σ_0 через проміжок часу t_n знято. Тоді деформація в момент, що безпосередньо передує розвантаженню, згідно (1.14) буде дорівнювати $\varepsilon(t_n) = \sigma_0 / \Pi(t_n)$. З іншого боку, можна записати

$$\varepsilon(t_n) = \sigma_0 / E(t_n) , \quad (1.19)$$

де $E(t_n)$ - значення "модуля пружності" асфальтобетону при тривалості дії навантаження t_n .

$$\Pi(t_n) = 1 / E(t_n) . \quad (1.20)$$

Порівнявши (1.18) і (1.20), бачимо, що

$$R(t_n) = E(t_n) . \quad (1.21)$$

Тобто, функцію релаксації $R(t)$ можна з достатньою точністю визначати по відомих апробованих методиках, розроблених для визначення модуля пружності $E(t)$, і використовувати отримані експериментальні дані про значення $E(t)$ для асфальтобетонів різних складів. З цією метою можуть бути також використані результати випробувань зразків при сталих гармонійних коливаннях, якщо застосовувати наступне наближене співвідношення, що зв'язує $E(t)$ з дійсною E' і уявною E'' складовими комплексного модуля в дослідях з різними круговими частотами ω

$$E(t) = E'(\omega) - 0.4\omega + 0.014E''(10\omega). \quad (1.22)$$

Таким чином, можна одержати за експериментальними даними числові значення функції релаксації $R(t)$.

Високої точності опису експериментально встановленої функції $R(t)$ досягаємо представленням її у виді суми експонент

$$R(t) = H + \sum_{i=1}^n a_i \exp(-t / b_i), \quad (1.23)$$

де H, a_i, b_i – постійні.

Однак, для більш точної апроксимації доводиться у виразі (1.23) використовувати суму з 10-15 членів, тобто застосування 21-31 постійної є досить складним.

Більш простим і досить точним є модифікований степеневий закон, що успішно застосовують для опису функцій релаксації аморфних полімерів і композитів на їхній основі

$$R(t) = H + (B - H)(1 + t / r)^{-m}, \quad (1.24)$$

де m і r – постійні;

H і B – тривалий і миттєвий модулі пружності відповідно.

Як відомо, в'язко-пружні властивості асфальтобетону істотно залежать від температури. Тому функція релаксації асфальтобетону при даному його складі повинна бути функцією двох аргументів $R(t, T)$: часу t і температури T .

Характеристики, що залежать від температури.

З усіх залежних від температури характеристик асфальтобетону найбільшої уваги заслуговує аналітичний вираз для коефіцієнта зміщення a_T . При $T < T_g$ як правило приймається відоме співвідношення

$$\lg a_T = \frac{\Delta F}{2,303R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_R} \right), \quad (1.25)$$

де ΔF – постійна енергія активації (на моль), а $R=1,987$ кал/моль, K – універсальна газова постійна.

Таким чином, графік залежності функції $\lg a_T$ від змінної $1/T$ являє собою пряму.

При $T > T_g$ застосовується так зване рівняння ВЛФ (рівняння Вільямса - Ландела - Феррі)

$$\lg a_T = c_1(T - T_R)/(c_2 + T - T_R), \quad (1.26)$$

де c_1 і c_2 – постійні.

Інший вид залежності коефіцієнта a_T від температури при $T > T_g$ запропонував Шепері:

$$a_T = [(T_R - T_a)/(T - T_a)]^\mu, \quad (1.27)$$

де T_a і μ – постійні величини.

Цей вираз добре погоджується з рівнянням ВЛФ у широкому інтервалі температур при $\mu = 12$; як правило, $T_a = T_g - 10$ °С.

Виходячи із існуючих положень про термореологічні показники властивостей асфальтобетону, що відображають вплив часу дії навантаження, зрозуміло, що для забезпечення його суцільності необхідно мати умову міцності, що враховує часовий характер руйнування при напруженні і температурі, які змінюються в часі – так званою умовою довговічності.

На базі сучасних уявлень про міцність і довговічність в'язко-пружних матеріалів у ряді робіт були отримані експериментальні дані про характер процесів руйнування асфальтобетонів і теоретичні залежності для оцінки їх довговічності з урахуванням температури і режимів навантаження. Так, у дослідженнях [60, 69, 77, 97, 101, 144] на основі використання теорії термо-в'язко-пружності та кінетичної теорії твердих тіл були розглянуті задачі прогнозування утворення температурних тріщин на тріщинувато-блочній основі. Для визначення температурних напружень розглядали асфальтобетонні шари як горизонтальний суцільний шар товщиною h_1 , шириною b_1 і необмеженою довжиною, розташований на основі, що складається з плит товщиною h_2 , шириною b_2 і довжиною l_{nl} кожна. Матеріал покриття має пружні або в'язко-пружні властивості і є лінійним термо-реологічно простим тілом. Матеріал основи є також в'язко-пружним або пружним. Контакт покриття з основою може бути гладким, шорстким або спаяним, а основи з підстильним шаром – гладким або шорсткуватим. Приймаючи до уваги вагу покриття і основи та їх опирання на нижчележачі шари, згинальними температурними напруженнями нехтували. Вирішували задачу з визначення подовжних нормальних температурних напружень в найбільш несприятливому перерізі по довжині покриття (над стиком між плитами основи) у будь-який момент часу при довільній зміні температури. При визначенні температурних напружень при зниженні температури в асфальтобетонних шарах на тріщинувато-блочній основі розглядали випадок, коли шари з основою міцно зчеплені і відсутнє тертя на підстиляючому матеріалі основи. Представляли роботу асфальтобетонного покриття моделлю, зображеною на (рис. 1.1). Це випадок, коли є сила тертя між тріщинувато-блочною основою і підстиляючим матеріалом основи та асфальтобетонними шарами і тріщинувато-блочною основою.

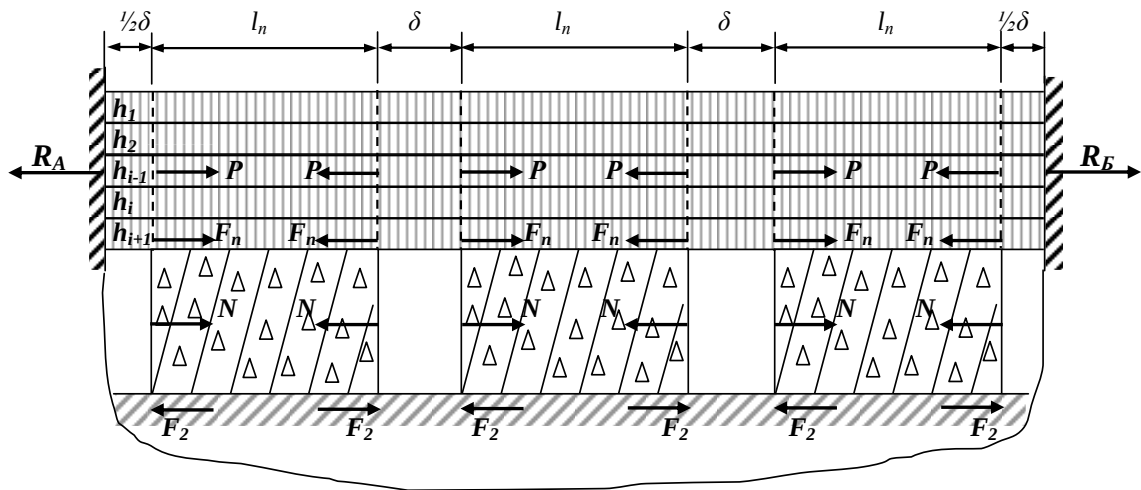


Рисунок 1.1 – Модель роботи асфальтобетонних шарів (I) при зниженні температури на основі з плит (II), коли існує сила тертя між шарами покриття з основою і тріщинувато-блочною основою і підстиляючим матеріалом основи

Знаючи приведений час, що отримується на основі положень теорії термо-в'язко-пружності і застосовуючи функцію релаксації та інтегральне рівняння лінійної в'язко-пружності спадкового типу Больцмана-Вольтера, знаходили температурні напруження в асфальтобетонних шарах у вигляді

$$\sigma_{T,ai}(t) = \int_0^t \left[H_i + (B_i - H_i) \left(1 + \frac{e^{P_{1,i}(T_{0,i} - T_{S,i} + K_i \cdot t)}}{P_{1,i} K_i r_i} (1 - e^{-P_{1,i} K_i (t - \tau)}) \right)^{-m_i} \right] \cdot Y(\tau) d(\tau), \quad (1.28)$$

$$\text{де } Y(\tau) = \left(\alpha_{ai} K_i \tau + \frac{h_i \cdot l_n \cdot \gamma_{a,cep} \cdot f_{mp,n}}{2 \cdot \left(H + (B - H) \cdot \left(1 + \frac{\tau}{r} \right)^m \right) \sum_{i=1}^n h_i} \right)', \quad (\text{при } N_{\max} > F_n^{\max} + F_2^{\max}).$$

Застосовуючи критерій Бейлі для встановлення міри пошкодженості армованих асфальтобетонних шарів отримували умову утворення поперечних температурних тріщин в асфальтобетонному покритті у вигляді

$$M_\delta = \int_{t_{p,\delta-1}}^{t_{p,\delta}} \left(\frac{h_i l_n}{S} \frac{\gamma_{a,cep} f_{mp,n} + \alpha_{a,i} \Delta T_{a,i} E_{a,i}}{2} + \frac{h_i}{S^2} \sum_{\kappa=1}^m \frac{\alpha_\kappa \Delta T_\kappa E_\kappa h_\kappa}{\left(1 + \frac{E_\kappa h_\kappa}{Q} \right)} \right)^{b_\tau(T)} dt \leq 1. \quad (1.29)$$

1.4 Короткі висновки

Розглянуто стан питання забезпечення довговічності дорожнього одягу з асфальтобетонним покриттям, що має поперечні температурні тріщини, проаналізовано особливості експлуатації дорожнього одягу з поперечними тріщинами в асфальтобетонному покритті, показано існуючі заходи підвищення його довговічності, висвітлено відомі підходи до оцінювання довговічності дорожнього одягу з поперечними тріщинами в асфальтобетонному покритті.

Аналіз існуючих рішень стосовно прогнозування температурного тріщиноутворення свідчить, що у ранніх підходах використовувались рішення теорії пружності, які не дозволяли відображати реальну поведінку в'язко-пружних властивостей матеріалів. Останніми роками в багатьох дослідженнях почали використовувати методи, що ураховують термо-реологічні властивості матеріалів конструкцій дорожнього одягу. Існуючі методи досліджень впливу транспортних навантажень на довговічність конструкції дорожнього одягу з асфальтобетонним покриттям, що має поперечні тріщини, у більшості випадків застосовують методи скінченних елементів для прогнозування термо-напруженого стану дорожнього одягу. Підходи, що направлені на забезпечення довговічності дорожнього одягу з поперечними тріщинами в асфальтобетонному покритті, головним чином, ґрунтуються на застосуванні армуючих матеріалів, герметизації покриття за рахунок заробки тріщин герметиками, а також при влаштуванні захисних шарів з литих емульсійно-мінеральних сумішей або поверхневої обробки.

Однак питання підвищення довговічності дорожнього одягу з поперечними тріщинами в асфальтобетонному покритті було вивчено не достатньо.

Основні результати досліджень першого розділу висвітлено в роботах автора: [28, 47 – 50, 110 – 115].

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ АСФАЛЬТОБЕТОННОГО ПОКРИТТЯ НЕЖОРСТКОГО ДОРОЖНЬОГО ОДЯГУ З ПОПЕРЕЧНИМИ ТРІЩИНАМИ

2.1 Постановка задачі щодо дослідження довговічності асфальтобетонного покриття нежорсткого дорожнього одягу з поперечними тріщинами

В рамках задачі підвищення довговічності асфальтобетонного покриття нежорсткого дорожнього одягу з поперечними тріщинами, одним із найважливіших питань є погіршення його розподільчої здатності. Це питання викликане збільшенням напружень у найбільш слабких елементах дорожньої конструкції – ґрунтовій основі та шарах з незв'язних і малозв'язних матеріалів. Таке збільшення напружень виникає внаслідок надмірного зволоження шарів дорожнього одягу із незв'язних і малозв'язних матеріалів.

Із урахуванням вище наведеного, запропоновано робочу гіпотезу, яка передбачає оцінювання впливу поперечних температурних тріщин в асфальтобетонному покритті на довговічність дорожнього одягу, аналізуючи зміну у часі міри пошкодженості за Бейлі як міри вичерпування його довговічності від дії чинників, що впливають на критерій граничного стану за першою групою (несною здатністю) для ґрунтової основи і шарів з незв'язних та малозв'язних матеріалів – за опором зсуву. Даний підхід полягає у використанні цього показника як домінуючої інтегральної характеристики втрати довговічності дорожнього одягу і встановлюється шляхом підсумовування його значень на кожному характерному етапі експлуатації з урахуванням «історії» ремонтних заходів.

2.2 Метод розрахунку нежорсткого дорожнього одягу з асфальтобетонним покриттям, що має поперечні температурні тріщини

Ідеєю методу є підсумовування міри вичерпування довговічності нежорсткого дорожнього одягу з асфальтобетонним покриттям, що має поперечні температурні тріщини із врахуванням мір вичерпування довговічності: до моменту утворення поперечних температурних тріщин; після моменту утворення поперечних температурних тріщин (при перезволоженні ґрунту земляного полотна та незв'язних шарів у період від моменту тріщиноутворення до моменту зменшення вологості за рахунок герметизації тріщин); від моменту зменшення вологості за рахунок герметизації тріщин t_2 до моменту відновлення несної здатності дорожнього одягу за рахунок відповідних ремонтних заходів у зоні тріщини; у період від моменту відновлення несної здатності дорожнього одягу за рахунок відповідних ремонтних заходів у зоні тріщини t_3 до настання порушення критеріїв граничного стану за довговічністю.

Міра вичерпування довговічності розглядається для найбільш загального випадку, коли після утворення поперечних температурних тріщин певний час асфальтобетонне покриття буде експлуатуватися без їх герметизації, що призведе до підвищення вологості ґрунту і збільшення розрахункового періоду з несприятливими умовами для опору зсуву. Потім через певний період може бути проведена герметизація тріщин, що буде сприяти поступовому зменшенню вологості ґрунту та розрахункового періоду до початкових їх значень. Після цього покриття може експлуатуватися певний період до моменту відновлення несної здатності дорожнього одягу в зоні тріщин та буде продовжувати експлуатуватися до настання порушення критеріїв граничного стану за довговічністю. У цьому випадку критерій граничного стану для забезпечення довговічності дорожнього одягу має вигляд:

$$M((T),t) = M_1((T),t) + M_2((T),t) + M_3((T),t) + M_4((T),t) \leq 1, \quad (2.1)$$

де $M_1((T), t)$ – міра вичерпування довговічності від дії активного напруження зсуву $T(t)$ протягом часу спостереження t до моменту утворення поперечних температурних тріщин в асфальтобетонному покритті t_1 ;

$M_2((T), t)$ – міра вичерпування довговічності від дії активного напруження зсуву $T(t)$ протягом часу спостереження t при перезволоженні ґрунту земляного полотна та незв’язних шарів у період від моменту тріщиноутворення до моменту зменшення вологості за рахунок герметизації тріщин t_2 ;

$M_3((T), t)$ – міра вичерпування довговічності від дії активного напруження зсуву $T(t)$ протягом часу спостереження t у період від моменту зменшення вологості за рахунок герметизації тріщин t_2 до моменту відновлення несної здатності дорожнього одягу за рахунок відповідних ремонтних заходів у зоні тріщини t_3 ;

$M_4((T), t)$ – міра вичерпування довговічності від дії активного напруження зсуву $T(t)$ протягом часу спостереження t у період від моменту відновлення несної здатності дорожнього одягу за рахунок відповідних ремонтних заходів у зоні тріщини t_3 до настання порушення критеріїв граничного стану за довговічністю.

Значення активного напруження зсуву $T(t)$ визначають за формулою (6.17) ГБН В.2.3-37641918-559:

$$T = \tau_n + \tau_g, \quad (2.2)$$

де τ_n – активне напруження зсуву від тимчасового навантаження, МПа, знаходиться за формулою:

$$\tau_n = \tau_a \cdot p, \quad (2.3)$$

де τ_a – визначається відповідно до 6.4.4 ГБН В.2.3-37641918-559;

τ_g – активне напруження зсуву від власної ваги дорожнього одягу, МПа.

Активне напруження зсуву в ґрунті від тимчасового навантаження обчислюється за формулою:

$$\tau_n = [(\sigma_1 - \sigma_3) - (\sigma_1 + \sigma_3) \sin \varphi] / (2 \cos \varphi), \quad (2.4)$$

де φ – кут внутрішнього тертя ґрунту, град.;

σ_1 – максимальне головне напруження, МПа;

σ_3 – мінімальне головне напруження, МПа.

Головні напруження σ_1 і σ_3 необхідно розраховувати за теорією пружності для багатошарових середовищ.

Міра вичерпування довговічності за критерієм опору зсуву являє собою міру пошкодженості за Бейлі

$$M_i = \int_{t_i^{\Pi}}^{t_i^{\kappa}} \frac{dt}{t_p^*(T(t))}, \quad (2.5)$$

де t_i^{Π} – початковий час спостереження на i -му періоді;

t_i^{κ} – кінцевий час спостереження на i -му періоді (на останньому періоді

$t_i^{\kappa} = T_{cl}$);

t_p^* – функція довговічності, що визначається за формулою Б.Г. Бартенєва:

$$t_p^*(T(t)) = B_T \cdot T^{-\beta}, \quad (2.6)$$

де B_T та β параметри функції довговічності при дії дотичних напружень, визначаються з урахуванням нижченаведених даних.

Граничне напруження зсуву в ґрунті T_p , у МПа, згідно чинних нормативних документів визначають за формулою (2.7):

$$T_{\text{зр}} = c_{\text{зр}} \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3, \quad (2.7)$$

де $c_{\text{зр}}$ – зчеплення в ґрунті активної зони земляного полотна в розрахунковий період, МПа, встановлюють експериментально або за довідниковими даними;

k_1 – коефіцієнт, який враховує вплив навантажень на опір зсуву ґрунту; при розрахунку на вплив динамічного навантаження;

k_2 – коефіцієнт запасу на втому при розрахунку на тривалу дію навантаження, при розрахунку на динамічну дію навантаження коефіцієнт k_2 ;

k_3 – коефіцієнт, що враховує особливості роботи ґрунту у конструкції.

На основі проведених досліджень встановлено зв'язок коефіцієнта k_2 з сумарною кількістю проїздів розрахункового навантаження за строк експлуатації дорожнього одягу:

$$k_2 = \gamma_{\text{нр}} \cdot (\sum N_{\text{р}})^{\frac{1}{\beta}}, \quad (2.8)$$

де $\gamma_{\text{нр}}$ і β – параметри, що встановлюються експериментально або за довідковими даними.

Тоді (2.7) можна переписати у вигляді (2.9):

$$T_{\text{гр}} = [c_{\text{гр}}] \cdot (\sum N_{\text{р}})^{\frac{1}{\beta}}, \quad (2.9)$$

Вираз (2.9) свідчить про степеневу закономірність руйнування ґрунтової основи і шарів з незв'язних та малозв'язних матеріалів при дії дотичних напружень.

З урахуванням циклічного навантаження дотичними напруженнями T протягом часу навантаження t_n на основі (2.4) параметр B_T визначається за виразом (2.10):

$$B_T = \frac{[C_{\varepsilon p}]^{-\beta}}{t_n}. \quad (2.10)$$

Для визначення часу до утворення температурних поперечних тріщин в асфальтобетонному покритті застосовуються відомі рішення НТУ для прогнозування температурного тріщиноутворення в асфальтобетонному покритті з урахуванням впливу коливань температур та транспортних навантажень. У даному випадку умова температурної тріщиностійкості асфальтобетонного покриття має вигляд:

$$M = M_T + M_{TP} \leq 1, \quad (2.11)$$

де M – сумарна міра вичерпування довговічності асфальтобетонного покриття, що складається із міри вичерпування довговічності від температурних напружень при коливанні температури (M_T) та міри пошкодженості від дії транспортного навантаження (M_{TP}).

Міра вичерпування довговічності від температурних напружень при коливанні температури визначається за аналітичною залежністю

$$M_T = \int_0^{t_{ca}} \frac{\sigma_T(t)^{b(t,T)}}{B_t(t,T)} dt. \quad (2.12)$$

В цих формулах позначено: r , m , B , H – параметри функції релаксації степенево-модифікованого закону (визначаються експериментально);

B , b – параметри функції довговічності (визначаються експериментально).

Міра вичерпування довговічності від дії транспортного навантаження визначається за аналітичною залежністю

$$M_{TP} = \frac{\sum N}{[N]}, \quad (2.13)$$

де $\sum N$ – сумарна інтенсивність руху.

$[N]$ – гранично допустима кількість розрахункового навантаження, що може витримати асфальтобетонне покриття при дії горизонтального розтягуючого нормального напруження σ_r .

Значення $[N]$ встановлюється за аналітичною залежністю

$$[N] = \left(\frac{R_{\text{лаб}} \cdot k_m \cdot k_{np}}{R_p} \right)^{\frac{1}{m}}, \quad (2.14)$$

де $R_{\text{лаб}}$ – лабораторне значення границі міцності на розтяг при згині від одноразового прикладання;

k_m – коефіцієнт, що враховує зниження міцності в часі від дії погодно-кліматичних умов;

m – показник втоми;

k_{np} – коефіцієнт, що враховує вплив повторних навантажень у нерозрахунковий період.

$$R_p = K_{\text{мц}} \cdot \sigma_r, \quad (2.15)$$

де $K_{\text{мц}}$ – коефіцієнт міцності з урахуванням заданого рівня надійності;

σ_r – найбільше напруження розтягу при згині від дії розрахункового транспортного навантаження в асфальтобетонному покритті.

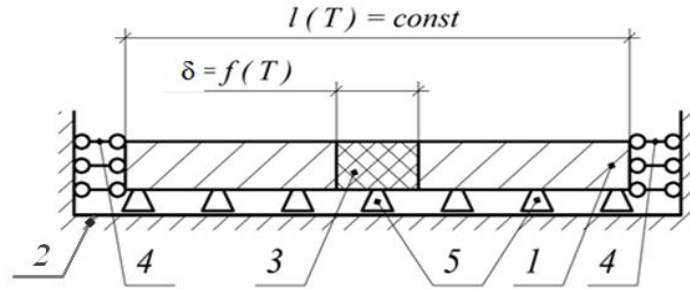
Параметри виразів (2.13)-(2.15) визначаються за методикою чинного нормативного документа ГБН В.2.3-218-186.

2.3 Оцінювання ефективності герметизуючих матеріалів при ремонті асфальтобетонного покриття з поперечними тріщинами.

Як було показано раніше, у багатьох дослідженнях поперечні температурні тріщини на асфальтобетонному покритті нежорсткого дорожнього одягу з'являються в результаті впливу основних факторів: розтягуючі температурні напруження при зниженнях температури в результаті невірного скорочення покриття у поздовжньому напрямку за рахунок сили тертя між покриттям і основою. У даному випадку розрахункова схема являє собою одношарову плиту, що на , яка не передає її відчутних деформацій. Через певний період експлуатації на асфальтобетонному покритті утворюються поперечні температурні тріщини від багаторазового впливу температурних напружень, що викликані відміченими факторами, у результаті знижень температури при її коливаннях. Після утворення поперечних температурних тріщин змінюються умови роботи асфальтобетонного покриття. У залежності від відстані поперечної тріщини утворені плити покриття можуть частково скорочуватись, долаючи опір тертя покриття по основі, а ширина тріщин при зниженні температури при цьому може збільшуватися.

Для герметизації поперечних температурних тріщин в асфальтобетонному покритті необхідно здійснювати вибір матеріалу і технології в залежності від геометричних параметрів покриття і тріщини та властивостей асфальтобетону та герметизуючих матеріалів. Для оцінювання їх ефективності слід розглянути розрахункову схему роботи цих матеріалів у покритті з поперечними тріщинами (рисунок 2.1).

Для герметизації поперечних тріщин шириною δ в асфальтобетонному покритті l між блоками з початковою довжиною $l_{\text{бл}}$. Тоді зниження температури призведе до скорочення блоків покриття, які набудуть розмірів $l'_{\text{бл}}$.



1 – асфальтобетонне покриття, 2 – основа дорожнього одягу, 3 – герметик, 4 – схема зв'язку з суміжними ділянками покриття; 5 – теж, з підстильними шарами конструкції одягу, що забезпечує горизонтальне переміщення через тертя

Рисунок 2.1 – Розрахункова схеми роботи асфальтобетонного покриття після утворення в ньому поперечної температурної тріщини та її герметизації

При повній адгезії матеріалу 3 з покриттям 1 відбудеться його розтягування до ширини δ' . В такому випадку температурні розтягуючі напруження σ_T в герметизуючому матеріалі, а також на контакті з асфальтобетонним покриттям будуть складатись із двох складових: власних температурних напружень від неможливості скорочення розмірів σ_{T1} та напружень за рахунок скорочення суміжних блоків покриття σ_{T2} :

$$\sigma_{T1} = \alpha_1 E_1 \Delta T; \quad \sigma_{T2} = E_1 \cdot \frac{\Delta \delta(T(t))}{\delta(T_0)}. \quad (2.16)$$

Тоді після відповідних перетворень отримаємо:

$$\sigma_T = E_1 \cdot \alpha_1 \cdot \Delta T \cdot \left(1 + \frac{\alpha_2 \cdot l_{\delta l}}{\alpha_1 \cdot \delta} \right), \quad (2.17)$$

де α_1, α_2 – коефіцієнти лінійного розширення відповідно матеріалів 3 та 2.

Отриманий компактний вираз (2.17) на основі точного рішення дозволяє встановити рівень термонапруженого стану герметика та адгезійного контакту у залежності від його характеристик та характеристик асфальтобетону, а також

початкових розмірів блоків покриття між тріщинами та їх ширини на момент заповнення їх герметиком. Однак ця залежність справедлива для випадків, коли матеріали проявляють пружні властивості, і може бути застосована тільки для від'ємних температур.

Для більш загального випадку з урахуванням термо-в'язко-пружних властивостей на основі положень теорії термо-в'язко-пружності температурні напруження, що виникають в герметику, можуть бути визначені за рішенням Больцмана-Вольтерра:

$$\sigma_T(t, T) = \int_0^t R(\xi(t) - \xi(\tau)) d\varepsilon_T(\tau), \quad (2.18)$$

$$\text{де} \quad \xi(t) = \int_0^t \frac{dt}{a_T(T(t), Q)}, \quad \xi(\tau) = \int_0^\tau \frac{dt}{a_T(T(t), Q)},$$

де $R(t)$ – функція релаксації герметичного матеріалу;

ε_T – відносна температурна деформація;

t – момент часу, при якому визначається напруження;

τ – момент часу, що передує t ;

ξ – час, що приведений на основі принципу температурно-часової аналогії (ТЧА) до тієї температури Q , при якій експериментально встановлюються параметри функції релаксації $R(t)$;

a_T – функція ТЧА.

Функція релаксації герметика може бути описана у вигляді модифікованого степеневому закону [60, 77, 97]:

$$R(t) = H + (B - H) \cdot \left(1 + \frac{t}{r}\right)^{-m}, \quad (2.19)$$

де m і r – постійні, що визначаються із експерименту на релаксацію;

H і B – довготривалий і миттєвий модулі пружності відповідно.

Функцію ТЧА можна описати виразом

$$a_T(T(t), Q) = e^{-p(T-Q)}, \quad (2.20)$$

де p – постійна, що визначається експериментально.

Відносна температурна деформація визначається за виразом:

$$\varepsilon_T = \alpha_1 \cdot (T_0 - T(t)) \cdot \left(1 + \frac{\alpha_2}{\alpha_1} \cdot \frac{l_{\delta l}}{\delta} \right). \quad (2.21)$$

З урахуванням гармонійної зміни температури річні і добові коливання середньої по товщині покриття температури можна записати у вигляді:

$$T(t) = T_{cp} + \overline{A_c} \cos \frac{2\pi}{t_c} t + \overline{A_r} \cos \frac{2\pi}{t_r} t, \quad (2.22)$$

де T_{cp} – усереднена по товщині середньорічна температура покриття;

$\overline{A_c}$, $\overline{A_r}$ і t_c , t_r – відповідно амплітуда і період коливань усередненої по товщині температури покриття в добовому і річному циклі.

Амплітуду коливань усередненої по товщині температури покриття ($\overline{A_c}$ або $\overline{A_r}$) можна вважати приблизно рівною середньому по товщині значенню амплітуди коливань температури на різних глибинах:

$$\overline{A} \approx \frac{1}{h} \int_0^h A(z) dz = \frac{A(z=0)}{h\sqrt{\pi/t_n a}} (1 - e^{-h\sqrt{\pi/t_n a}}), \quad (2.23)$$

де a – коефіцієнт температуропровідності матеріалу покриття;

t_n – період коливання температури.

На основі вище описаних виразів є можливість прогнозувати температурні напруження в будь-який час t . Однак, оскільки характеристики міцності також залежать як від температури, так і від часу дії навантаження, проявляючи кінетичний характер руйнувань, то є необхідність визначитися з показником довговічності герметизуючих матеріалів та умовою граничного стану. Маючи рішення для визначення температурних напружень в покритті, умови міцності і вираз для функції довговічності, можна розрахувати показник температурної тріщиностійкості M_{mp} до кінця терміну служби t_{cl} .

$$M_{mp} = \int_0^{t_{cl}} \frac{\sigma_T(t)^{b_T(t,T)}}{B_T(t,T)} dt. \quad (2.24)$$

При цьому, має виконуватися умова забезпечення температурної тріщиностійкості:

$$M_{mp} \leq C_{mp}. \quad (2.25)$$

При цьому, виходячи з відомих результатів досліджень C_{mp} дорівнює граничному значенню міри пошкодження C_H , тобто $C_{mp}=C_H=1$ [60, 77].

2.4 Дослідження напружено-деформованого стану від дії транспортного навантаження конструкції дорожнього одягу з асфальтобетонним покриттям, що має поперечні тріщини

При дослідженні транспортних навантажень на напружено-деформований стан конструкції дорожнього одягу з асфальтобетонним покриттям, що має

поперечні тріщини (рис. 2.2), використовували методологію (Додаток А), розроблену під керівництвом професора В.І. Гуляєва, що базується на методі скінченних елементів [145 – 147].

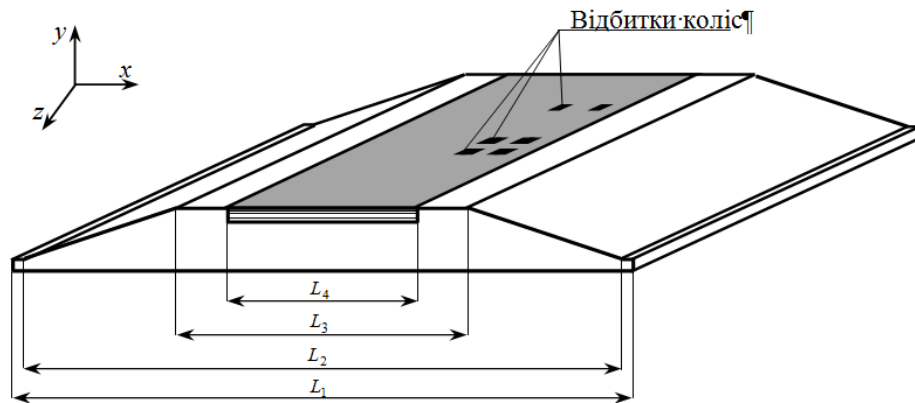


Рисунок 2.2 – Схема дорожньої конструкції

Для розв’язання задачі за допомогою площин $x = const$, $y = const$, $z = const$ виділяється із загального неоднорідного шаруватого масиву конструкції дорожнього одягу прямокутний паралелепіпед і, задаючи відповідні граничні умови на відповідних граничних площинах, розв’язуються відповідні рівняння теорії пружності числовим методом. Урахування термо-в’язко-пружних властивостей дорожньо-будівельних матеріалів здійснюється за допомогою застосування спрощеного методу квазіпружної апроксимації, використовуючи метод Р. Шеппері. При цьому, як було показано у дослідженнях Б.С. Радовського, результати розрахунків мають достатньо гарну збіжність при заміні термо-в’язко-пружних характеристик на пружні, що визначені при відповідних розрахункових температурах та часі дії навантаження [77, 97].

Класичний підхід до розгляду напружено-деформованого стану певної ділянки споруди потребує аналізу нескінченно малого елемента цієї системи. В цьому випадку задача зводиться до диференціального рівняння в частинних похідних. У замкненому вигляді розв’язання диференціального рівняння не завжди можливе, тому застосовують різні наближені методи. Одним із таких методів є метод скінченних елементів (СЕ) [147 – 149]. Такий підхід розв’язання

задач будівельної механіки називають методом скінченних елементів (МСЕ). Розглядаючи об'єкт, як сукупність елементів скінченних розмірів, здійснюється перехід від системи з розподіленими параметрами до системи зі скінченною кількістю параметрів. У цьому випадку, суцільна область W , яку займає конструкція апроксимується дискретною моделлю, яка складається з сукупності підобластей (скінченних елементів), що мають скінченне число ступенів вільності та взаємодіють між собою тільки в вузлових точках.

Для прикладу, при використанні скінченно-елементної апроксимації основних співвідношень теорії пружності (Додаток А), на рис 2.3 – 2.6 представлені результати дослідження концентрації напружень у зонах наявності тріщин шаруватої конструкції дорожнього одягу.

На рис. 2.3 і рис. 2.4 наведені результати скінченно-елементного аналізу впливу тріщин в одному з нижніх (третьому) шарів при перерозподілі нормальних напружень σ_{xx} від дії вертикального навантаження P на відбиток контакту колеса з дорогою. Максимальні за модулем значення цих напружень позначені зафарбованими і незафарбованими кружечками. На кольоровому зображенні цього поля кожному відтінку кольорової палітри відповідає значення напруження, що наведені справа на стовпчику кольорової шкали. Характер розподілу σ_{xx} у вертикальному перерізі, що проходить через площину тріщини, наведений на рис. 2.3. Як видно з даних рис. 2.3, спостерігається різка концентрація цих напружень в гирлі тріщини, з віддаленням від цієї зони напруження σ_{xx} швидко зменшуються.

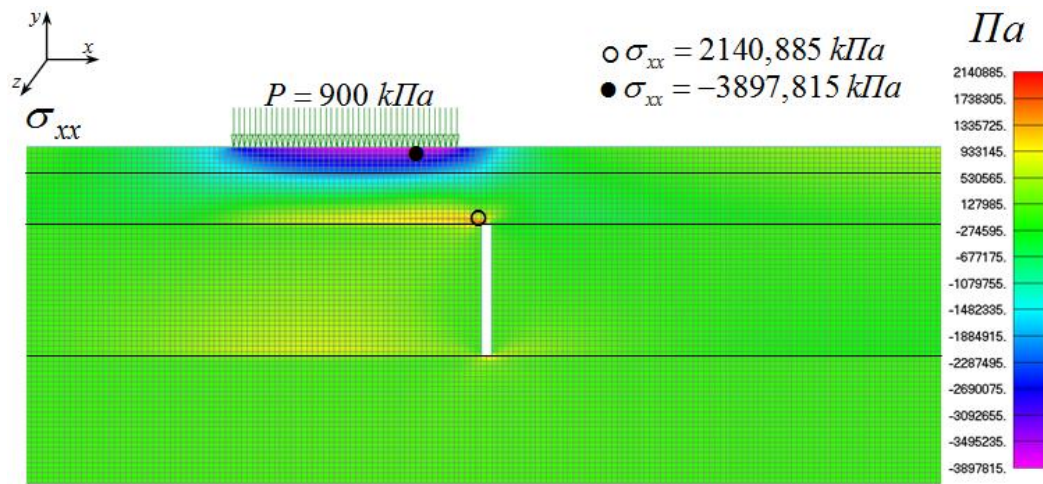


Рисунок 2.3 – Поле розподілення нормальних напружень σ_{xx} (випадок $h1 = 0,04$ м, $h2 = 0,08$ м, $h3 = 0,21$ м, $h4 = 0,2$ м, $h5 = 1,47$ м, $P = 900$ кПа)

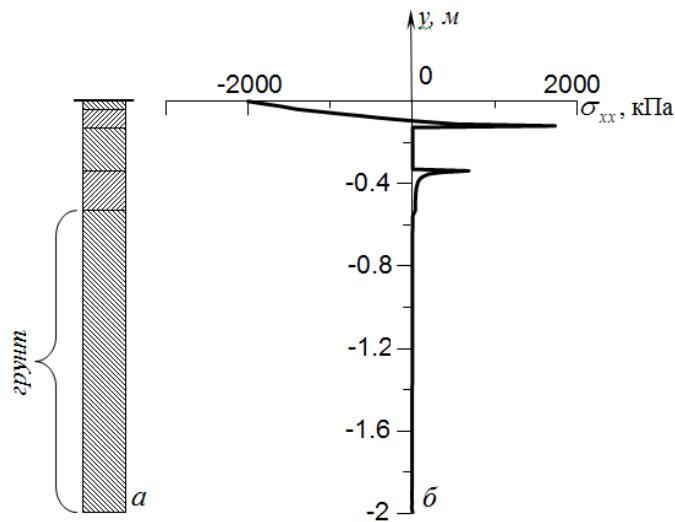


Рисунок 2.4 – Схема розташування шарів покриття (а) і графік функції в центральному перерізі (б)

Внутрішня тріщина суттєво вплинула також на розподіл і концентрацію дотичних напружень τ_{xy} . Як видно з даних, що наведені на рис. 2.5 і рис. 2.6, значні величини τ_{xy} мають місце під крайовою зоною розподілення навантаження P (рис. 2.5). Однак найбільша концентрація цієї функції має місце у верхньому гирлі тріщини (рис. 2.5 і рис. 2.6). У нижньому гирлі тріщини ця концентрація є відчутно меншою. У той же час, необхідно врахувати, що підвищені значення

цієї функції досягли поверхні ґрунтового масиву, що має понижену міцність на зсув.

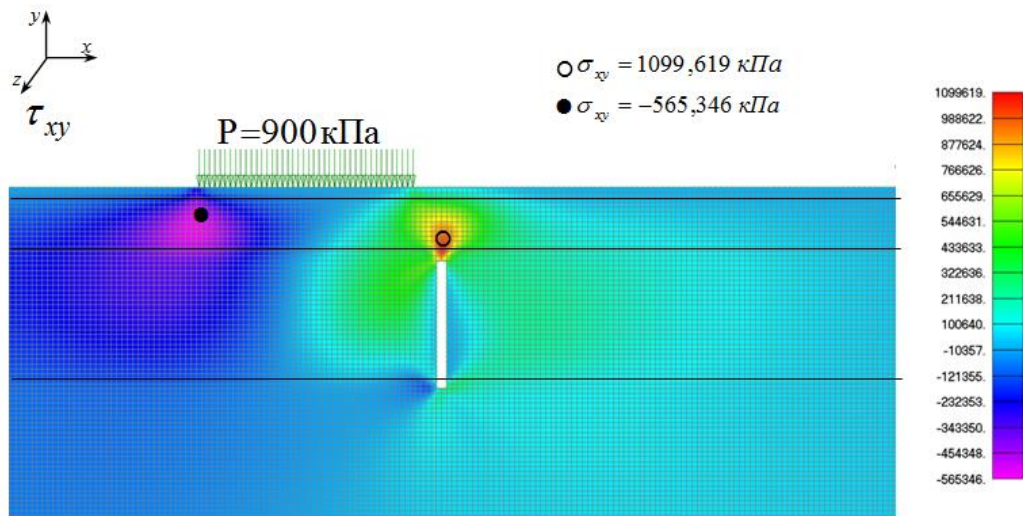


Рисунок 2.5 – Поле розподілення дотичних напружень τ_{xy} (випадок $h1 = 0,04 \text{ м}$, $h2 = 0,08 \text{ м}$, $h3 = 0,21 \text{ м}$, $h4 = 0,2 \text{ м}$, $h5 = 1,47 \text{ м}$, $P = 900 \text{ кПа}$)

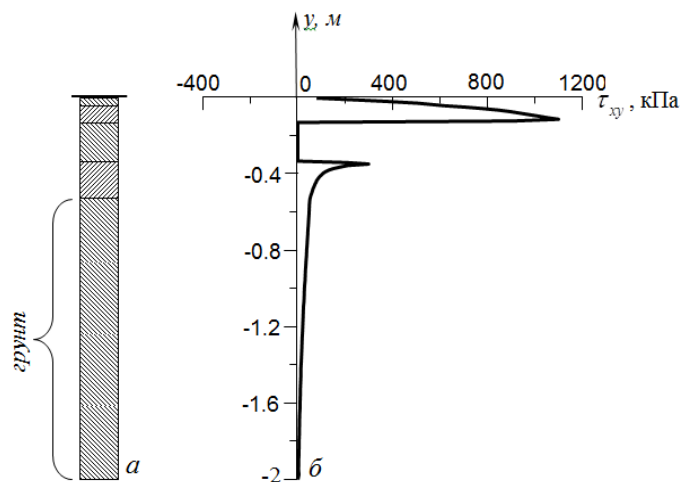


Рисунок 2.6 – Схема розташування шарів покриття (а) та графік функції $\tau_{xy}(y)$ в центральному перерізі (б)

2.5 Короткі висновки

1. На основі застосованих теоретичних аспектів дослідження, розроблено метод оцінювання впливу поперечних температурних тріщин в асфальтобетонному покритті на довговічність дорожнього одягу від

комплексного впливу чинників з урахуванням термо-реологічних властивостей асфальтобетону. Цей метод полягає у використанні показника міри вичерпування довговічності протягом усього строку експлуатації за критерієм граничного стану для ґрунтової основи і шарів з незв'язних та малозв'язних матеріалів – за опором зсуву.

2. Удосконалено метод розрахунку нежорсткого дорожнього одягу з поперечними тріщинами в асфальтобетонному покритті. Удосконалення методу розрахунку нежорсткого дорожнього одягу полягає у врахуванні зменшення розподільчої здатності покриття у зоні тріщин та несної здатності ґрунту земляного полотна і шарів з незв'язних та малозв'язних матеріалів через їх перезволоження, внаслідок потрапляння інфільтраційної вологи. Удосконалено метод оцінювання ефективності герметизуючих матеріалів при ремонті асфальтобетонного покриття з поперечними тріщинами, що полягає у визначенні горизонтальних температурних напружень, які спричиняють розрив когезійних зв'язків герметика та/або адгезійних зв'язків герметика з покриттям.

3. Обґрунтовано застосування методу скінчених елементів при дослідженні транспортних навантажень на напружено-деформований стан конструкції дорожнього одягу з асфальтобетонним покриттям, що має поперечні тріщини. Ураховуючи, що в методі скінчених елементів розв'язуються відповідні рівняння теорії пружності числовим методом, то для урахування термо-в'язко-пружних властивостей дорожньо-будівельних матеріалів застосувували спрощений метод квазіпружної апроксимації.

Основні результати досліджень другого розділу висвітлено в роботах автора: [62-66, 107, 108].

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ДОРОЖНЬОГО ОДЯГУ З ПОПЕРЕЧНИМИ ТРІЩИНАМИ В АСФАЛЬТОБЕТОННОМУ ПОКРИТТІ

3.1 Натурне дослідження стану асфальтобетонного покриття з температурними поперечними тріщинами

При натурному дослідженні стану асфальтобетонного покриття з температурними поперечними тріщинами здійснювали візуальне обстеження покриття з фотофіксацією характеру утворення температурних поперечних тріщин (Додаток Б), встановлювали ширину розкриття тріщин, визначали вид і характер деформації та руйнувань покриття дорожнього одягу. Також визначали відстань між поперечними тріщинами, відбирали зразки-керни і вирубку для лабораторних досліджень.

Характер розтріскування асфальтобетонного покриття при утворенні поперечних температурних тріщин свідчить, що вони можуть бути прямі, слабо або сильно звивисті. Перші тріщини з'являються через 40 – 100 метрів на автомобільних дорогах і вулицях високих категорій з двома-трьома шарами асфальтобетону в конструкції дорожнього одягу. Для доріг і вулиць з одношаровим асфальтобетонним покриттям нижчих категорій перші тріщини з'являються через 10 – 40 метрів. У процесі експлуатації між першими тріщинами з'являються тріщини другого покоління, а у перспективі виникають тріщини наступних поколінь зі зменшенням відстані між ними до 1 – 3 метрів. Тому, в зоні тріщин, які довгий час не герметизують, утворюються сколи, викришування, ямковість, вибоїни, просідання, поздовжні тріщини на полосах накату, сітка тріщин, колійність.

Крім того, обстеження показують, що поперечні температурні тріщини, як одні із найбільш поширених, є відображені вертикальні від тріщинувано-блочної основи. Рідше виникають температурні тріщини горизонтальні від суміжних

волокон покриття, а також відображені комбіновані, як відображені вертикальні від блочної основи, так і відображені горизонтальні від суміжних волокон покриття.

За результатами натурних досліджень розроблена класифікація поперечних температурних тріщин з урахуванням найбільш характерних їх ознак (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 – Класифікація поперечних температурних тріщин в асфальтобетонному покритті за найбільш характерними їх ознаками

Ознаки класифікації	Види тріщин
За шириною розкриття	волосяні до 3 мм
	дрібні 4–7 мм
	середні 8–15 мм
	крупні 16 мм і більше
За характером завивистості	прямі
	слабо звивисті
	сильно звивисті (зигзагоподібні)
За відстанню між тріщинами	рідкі (середня відстань між тріщинами 50 – 100 м)
	часті (середня відстань між тріщинами 20 – 50 м)
	густі (середня відстань між тріщинами 0,5 – 20 м)
За довжиною	що перетинають всю ширину проїзної частини
	що перетинають одну праву або ліву проїзну частину
	які становлять $\frac{1}{4}$ – $\frac{1}{2}$ ширини проїзної частини в одному напрямку
	первинні (перші тріщини, що утворились з приблизно однаковим кроком)
За моментом утворення	вторинні (тріщини, що утворились між первинними тріщинами)
	послідуючі (тріщини, що утворились між вторинними та послідуючими тріщинами)
	температурні невідображені (власні)
За причинами утворення	температурні відображені вертикальні від блочної основи
	температурні відображені горизонтальні від суміжних блоків покриття
	температурні відображені комбіновані від блочної основи та суміжних блоків покриття

Крім того, були проведені натурні дослідження щодо впливу поперечних тріщин на прогини поверхні асфальтобетонного покриття. Дослідження підтвердили відомі результати про те, що в зонах поперечних тріщин має місце «клавішний ефект». При цьому, різниця в переміщеннях країв тріщини залежить як від ширини розкриття тріщини, так і від стану шарів основи і ґрунту земляного полотна, і може бути в межах від 10% до 40%, або більше. Прогини конструкції дорожнього одягу вимірювали за допомогою важільних прогиномірів:

- між спареними балонами автомобіля, що мав навантаження 100 кН на задню вісь в точці 1 біля краю тріщини (рис. 3.1);
- на другому краю тріщини, у точці 2, де відсутнє навантаження.

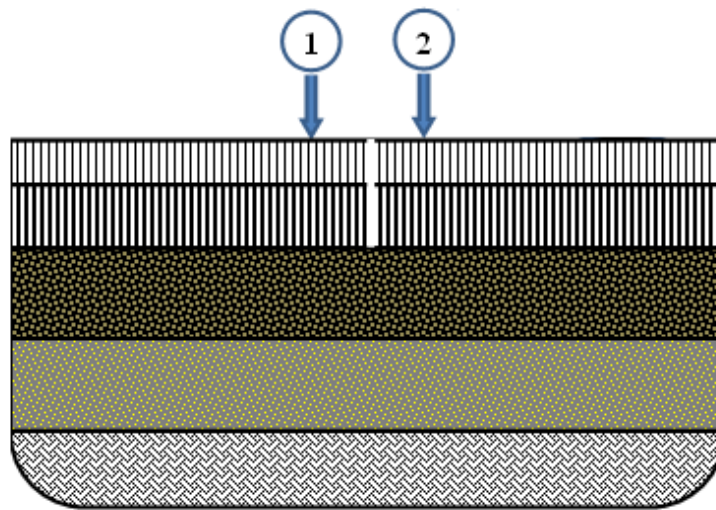


Рисунок 3.1 – Схема вимірювання пружного прогину поверхні асфальтобетонного покриття під колесом автомобіля в зоні тріщини (точка 1) та на другому краю тріщини, у точці 2, де відсутнє навантаження

Результати дослідження підтвердили відомі дані про те, що в зонах поперечних тріщин має місце «клавішний ефект». При цьому, різниця в переміщеннях країв тріщини залежить як від ширини розкриття тріщини, так і від стану шарів основи і ґрунту земляного полотна, та становить в межах від 15% до 40%, або більше (рис. 3.2).

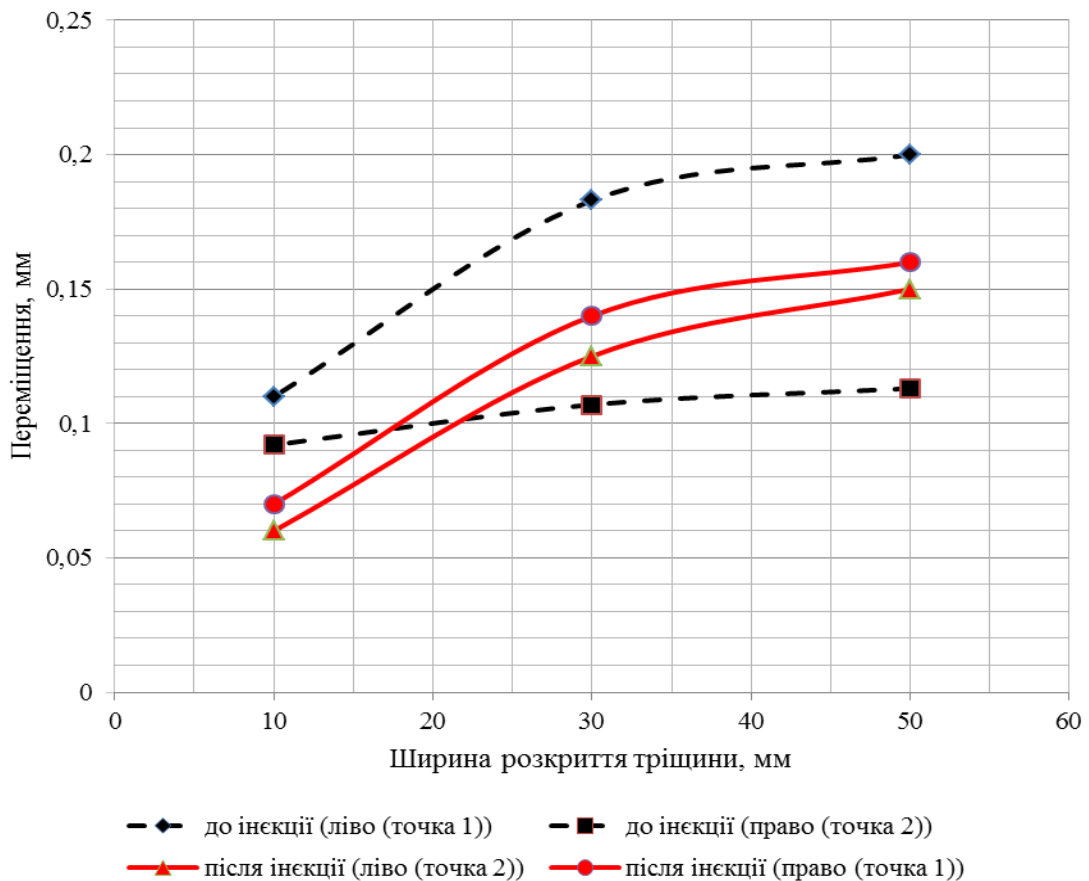


Рисунок 3.2 – Результати вимірювання перемішень країв тріщини до та після ін'єктування піщано-цементним розчином щебеневої основи під асфальтобетонним покриттям

Крім того, були виконані натурні експерименти з підкріпленням щебеневої основи під асфальтобетонним покриттям в зоні поперечних тріщин у межах полоси накату для зменшення перенапруження земляного полотна.

Як видно із результатів випробувань (рис. 3.3), дане рішення дає можливість майже повністю виключити «клавішний ефект». В результаті виконаних випробувань, встановлено, що за рахунок ін'єктування малозв'язних шарів основи «клавішний ефект» зменшився. Так, при ширині розкриття тріщини до 10 мм, «клавішний ефект» не перевищує 7%. Загалом, введення в роботу підкріплюючої плити, за рахунок ін'єктування малозв'язних шарів основи дає можливість отримати відчутний ефект.

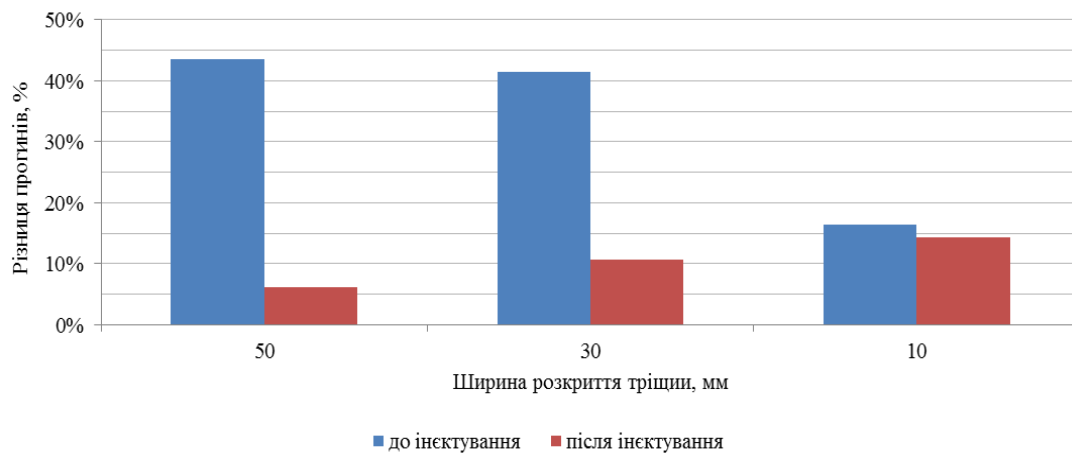


Рисунок 3.3 – Зміна «клавішного ефекту», встановлена за результатами вимірювання перемішень країв тріщини до та після інєктування

Результати дослідження свідчать, що утворення тріщин в конструкції дорожнього одягу різноманітні, і залежать, як правило, від матеріалоємних та технологічних факторів.

3.2 Експериментальне дослідження терморелогічних і термомеханічних властивостей матеріалів, що застосовуються для ремонту асфальтобетонного покриття з поперечними температурними тріщинами

Для експериментальних досліджень термо-реологічних і термомеханічних властивостей матеріалів, що застосовуються для ремонту асфальтобетонного покриття з поперечними температурними тріщинами застосовувалися як стандартні методи та прилади, так і оригінальні, для визначення термомеханічних характеристик асфальтобетону та герметиків, розроблених в НТУ [145 - 151].

На основі проведених експериментів та довідкових і літературних даних [145 - 151] були встановлені фізико-механічні характеристики матеріалів та термомеханічні їх властивості для здійснення чисельного аналізу.

Випробування герметизуючих матеріалів

Для визначення модуля деформації та коефіцієнта температурної деформації спочатку виготовляли зразки балочки розміру 4×4×16 мм шляхом

заливання мастик у відповідні форми. Після чого зразки шифрували і після термостатування проводили випробування.



Рисунок 3.4 – Загальний вигляд зразків балочок з герметизуючих матеріалів

Для проведення дослідів на короткочасну повзучість при згині був використаний прилад маятникового типу (рис. 3.5).

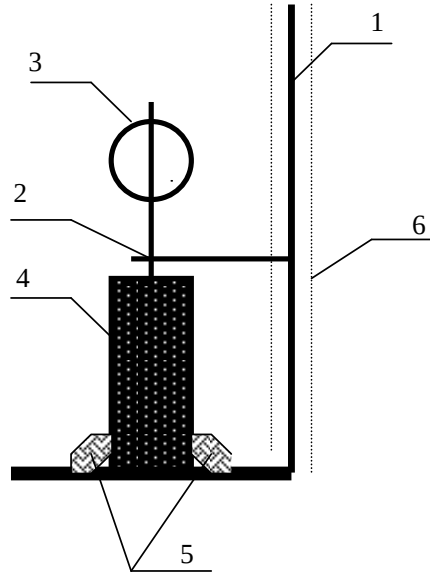


Рисунок 3.5 – Випробування зразків балочок з герметизуючих матеріалів

Визначення коефіцієнта температурного розширення

Методика визначення коефіцієнта розширення асфальтобетону полягала в наступному: за наміченим складом звичайним способом готували

асфальтобетону суміш та формували зразки. На лабораторних штативах (рис. 3.6) встановлювали асфальтобетонні зразки, які закріплювали алебастром. На торець зразків встановлювали індикатор годинникового типу. Після цього зразки, встановлювались в морозильну камеру і охолоджувались зі швидкістю 7°C на годину. При цьому ми спостерігали за зміною відліків на індикаторі годинникового типу, відліки знімали через кожні 15 хв.



1 – штатив, 2 – закріплювач індикатора часового типу, 3 – індикатор часового типу, 4 – балочка, 5 – кріплення балочки до штатива, 6 – ізолювання штатива

Рисунок 3.6 – Прилад для визначення коефіцієнта лінійного розширення

За результатами випробувань визначають коефіцієнт лінійного температурного деформування α з урахуванням температурного деформування вертикальної стійки штативу за формулою:

$$\alpha = \frac{(n_1 - n_2)}{l(T_1 - T_2)} + \alpha_{cm}. \quad (3.1)$$

де n_1 та n_2 – відліки по індикатору (мм) відповідно при температурах T_1 і T_2 ;

l – довжина зразка (мм);

α_{cm} – коефіцієнт температурного деформування стійки штатива ($\alpha_{cm} = 1 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}$).

Визначення функції температурно-часового зміщення $a_T(T)$

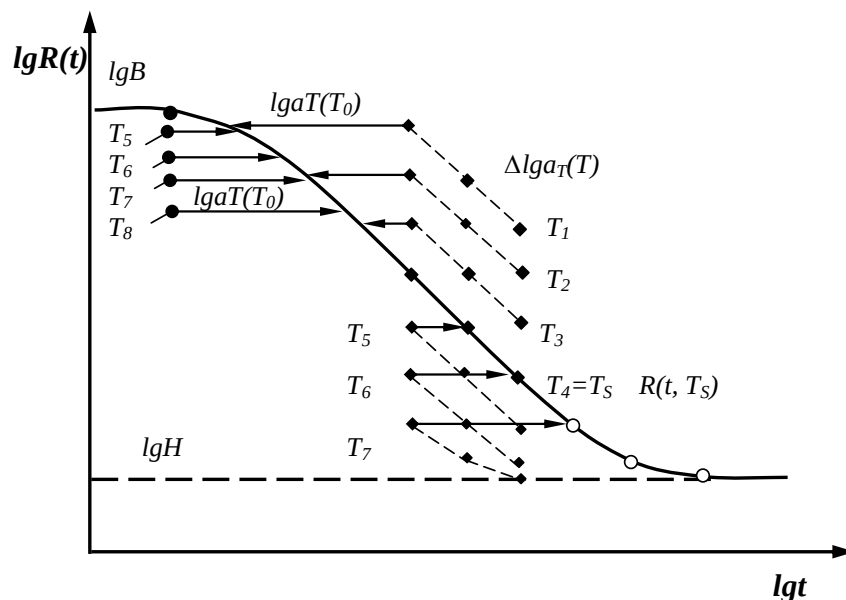
За визначенням функція температурно-часового зміщення $a_T(T)$ відображає температурну чутливість зміни в'язко-пружних властивостей асфальтобетону, а логарифм її значення чисельно дорівнює довжині відрізка вздовж логарифмічної шкали часу, на яку необхідно змістити паралельні між собою криві релаксації (або повзучості) одну відносно іншої, отриманих експериментально при різних постійних температурах T_1 і T_2 до їх суміщення

$$\lg a_T(T) = \lg t(T_1) - \lg t(T_2). \quad (3.2)$$

Схема побудови повної кривої функції релаксації та встановлення значень функції температурно-часового зміщення показана на рис. 3.7.

Для апроксимації експериментальних значень функції температурно-часового зміщення використовували залежність виду

$$a_T(T) = e^{-P_1(T_0 + Kt - T_s)}. \quad (3.3)$$



- - при прозвучуванні ультразвуком; ▣ - при випробуванні в умовах короткочасної повзучості; ○ - те ж в умовах тривалої повзучості

Рисунок 3.7 – Схема побудови повної кривої модуля пружності асфальтобетону на підставі застосування принципу температурно-часової аналогії за результатами експериментів

Крім того, було виконано лабораторні та натурні дослідження щодо впливу армуючих синтетичних матеріалів на підвищення тріщиностійкості асфальтобетонних шарів.

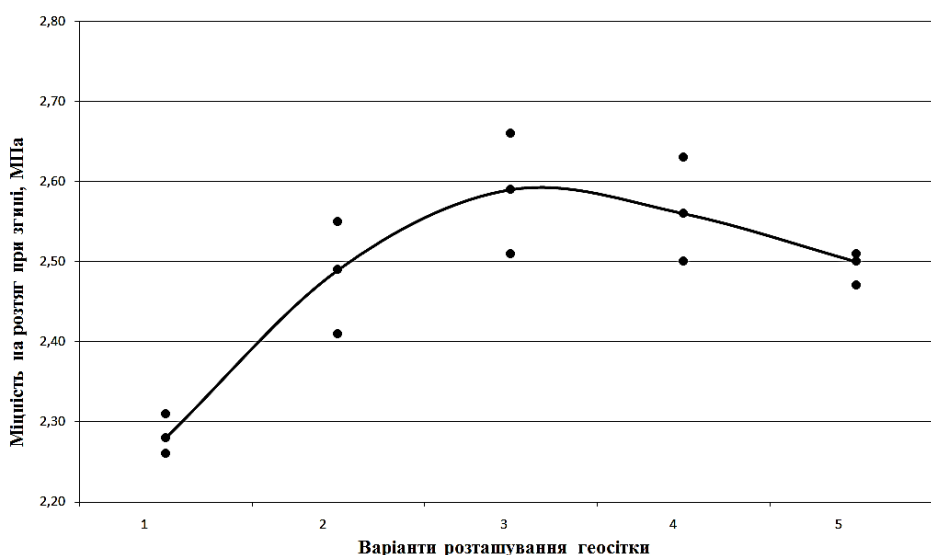
На кафедрі будівництва та експлуатації автомобільних доріг ХНАДУ проведений експеримент з метою визначення міцності на розтяг при згині зразків, в залежності від глибини розміщення армуючої геосітки в шарі підсилення.

Для армування асфальтобетону були використані два типи геосітки: з поліестеру Armatex RS 50/50 та з скловолокна Armapal G 50/50.

Виготовлялися зразки з асфальтобетонної суміші типу А на бітумі БНД 60/90, розміром $40 \times 100 \times 160$ мм. Отримані зразки розламувались посередині на дві частини для імітації тріщини в шарі асфальтобетону. Для нарощування зразка використовувалась дрібнозерниста асфальтобетонна суміш типу В на бітумі БНД 60/90 пошарово, в залежності від глибини закладання сітки в зразок. Геосітка розміщувалась на границі розподілу між асфальтобетонними зразками і в шарі асфальтобетону типу В, який виконував функцію підсилення вказаної конструкції, на глибині 10 мм, 20 мм і 30 мм від низу.

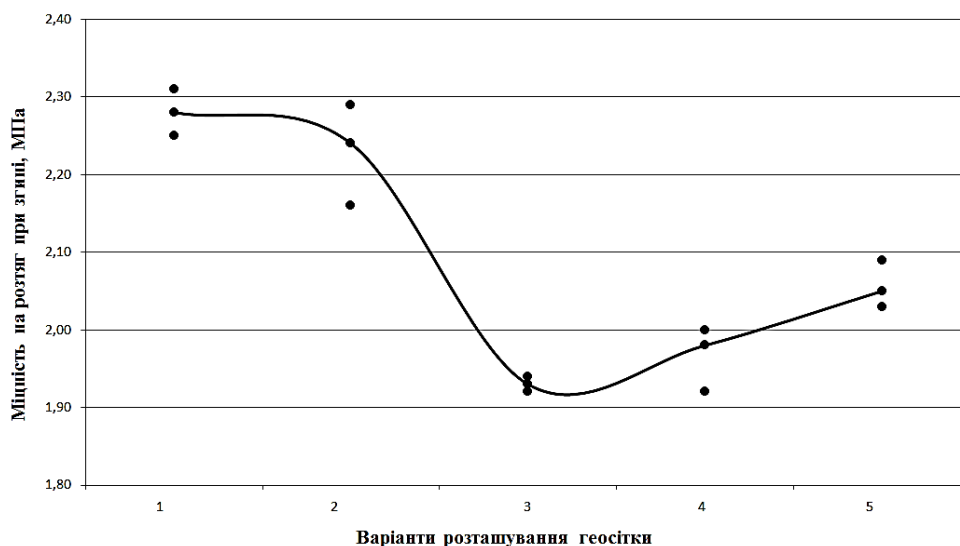
Результати експерименту приведені на рисунках 3.8 і 3.9.

Результати експерименту показали, що для армування асфальтобетонного покриття з тріщинами підходить полімерна геосітка Armatex RS 50/50 з розміщенням її на відстані 1 см від границі розподілу асфальтобетонного шару з тріщинами і шаром підсилення. Міцність на розтяг при згині армованих геосіткою зразків була на 13-15% більша, ніж неармованого. В зразках з геосіткою Armapal G 50/50 з скловолокна міцність на розтяг при згині була навіть менша, ніж в зразках без геосітки на 14-18%.



1 – зразок асфальтобетону без геосітки; 2 – з геосіткою на границі розподілу між асфальтобетонними шарами; 3 – з геосіткою на відстані 1 см від границі розподілу; 4 – з геосіткою на відстані 2 см від границі розподілу; 5 – з геосіткою на відстані 3 см від границі розподілу

Рисунок 3.8 – Залежність міцності на розтяг при згині асфальтобетонних зразків з геосіткою Armatex RS 50/50



1 – зразок асфальтобетону без геосітки; 2 – з геосіткою на границі розподілу між асфальтобетонними шарами; 3 – з геосіткою на відстані 1 см від границі розподілу; 4 – з геосіткою на відстані 2 см від границі розподілу; 5 – з геосіткою на відстані 3 см від границі розподілу

Рисунок 3.9 – Залежність міцності на розтяг при згині асфальтобетонних зразків з геосіткою Armapal G 50/50

На кафедрі дорожньо-будівельних матеріалів і хімії НТУ були проведені лабораторні дослідження з визначення розрахункових характеристик армованого асфальтобетону, які виконували згідно СОУ 45.2-00018112-076.

Зразки виготовлювали за допомогою секторного пресу згідно СОУ 45.02-00018112-020.

Після закінчення ущільнення асфальтобетонний зразок-плиту охолоджували до кімнатної температури і на його поверхню наносили шар підґрунтовки з врахуванням даних виробника армуючого матеріалу. Після нанесення підґрунтовки укладали армуючий матеріал за технологією його виробника (рис. 3.10), та після чого у ж саму форму засипали асфальтобетонну суміш верхнього шару і ущільнювали. Виготовлений і охолоджений зразок-плиту розмічали (рис. 3.10) та розпилювали за допомогою каменерізного станку на зразки необхідних розмірів, що передбачені для випробувань.



Рисунок 3.10 – Виготовлення розмітка та армованих асфальтобетонних плит

Після розпилювання приготовлені зразки очищали та висушували до постійної маси.

На торці асфальтобетонних зразків з обох сторін, за допомогою епоксидного клею наклеювали металеві накладки, розташовуючи їх симетрично і співвісно (рис. 3.11).



Рисунок 3.11 – Зовнішній вигляд зразків підготовлених до випробувань

Визначення показника втоми

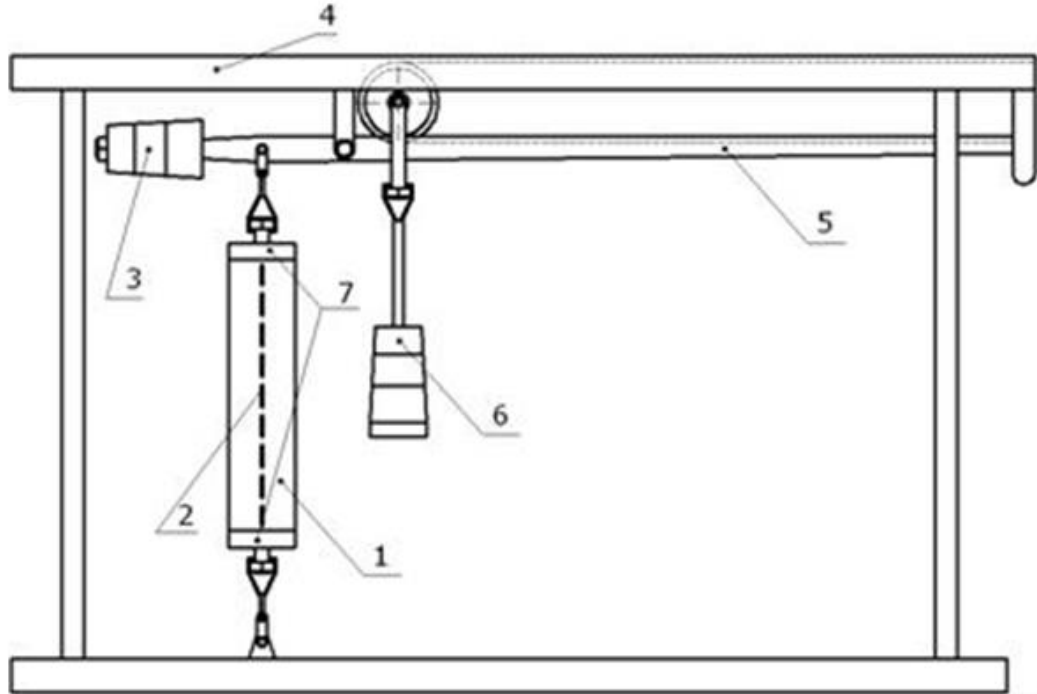
Для визначення показника втоми використовували прилад, схема якого наведена на рисунку 3.12, що дозволяє забезпечувати випробування із зростаючим з постійною швидкістю навантаженням на зразок в умовах осьового розтягу.

Підготовлені зразки термостатували при температурі випробування: Призначали швидкість росту навантаження $V_{\sigma l}$.

Випробування здійснювали при постійній швидкості навантаження V_{σ} . Її значення регулювали за допомогою величини рухомого вантажу b та швидкості його переміщення по консолі 5.

Час до руйнування ввизначали від початку навантаження зразка армованого асфальтобетону до моменту утворення тріщини в тілі

асфальтобетону, момент утворення якої фіксується розривом наклеєної алюмінієвої смужки на бокових гранях зразка, що призводить до розмикання електричного ланцюга та зупинки електроприладу.



1 – зразок з армованого асфальтобетону; 2 – армуючий матеріал;
3 – вантаж для рівноваги консолі; 4 – станина (корпус); 5 – консоль; 6 –
рухомий вантаж; 7 – металеві накладки

Рисунок 3.12 – Схема приладу для випробування зразків з армованого асфальтобетону для визначення параметру втоми

Визначали параметри функції довговічності B_τ , b_τ за аналітичними залежностями:

$$b_\tau = \frac{\lg V_{\sigma_1} / V_{\sigma_2}}{\lg \sigma_1 / \sigma_2} - 1, \quad (3.4)$$

$$B_\tau = \frac{\sigma_1^{b_\tau + 1}}{V_{\sigma_1}(b_\tau + 1)}, \quad (3.5)$$

де $V_{\sigma 1}$, $V_{\sigma 2}$ – перша та друга швидкість наростання навантаження, МПа/с.

Показник втоми армованого асфальтобетону m визначали за формулою:

$$m = \frac{1}{b_{\tau}}. \quad (3.6)$$

Визначення модуля пружності

Прилад для визначення модуля пружності аналогічний приладу для визначення показника втоми (рис. 3.12).

Для розтягу зразків в отвори металевих накладок вгвинчували гвинти, які зачіплювали за шарнірні фіксатори.

Зразки з металевими накладками 7 встановлювали вертикально. Рухомий вантаж 6 (рис. 3.12) встановлювали таким чином, щоб консоль 5 разом із рухомим вантажем 6 була урівноважена з вантажем 3. Фіксували консоль, щоб вона була нерухомою.

Переміщували рухомий вантаж 6 вздовж консолі на певну відстань, щоб створити навантаження F_1 на зразок.

Фіксатор консолі переводили в положення, щоб звільнити консоль. Таким чином навантаження передається на зразок.

Для кожного з відібраних для випробування зразків, вимір відносної деформації ε_i та встановлювали середнє значення $\bar{\varepsilon}$ при навантаженні

та обчислювали значення модуля пружності E у МПа за залежністю:

$$E = \frac{F}{A\varepsilon}, \quad (3.7)$$

де F – довільне значення навантаження, що знаходиться на прямолінійній ділянці, кН;

A – площа зразка, см²;

$\bar{\varepsilon}$ – середнє значення відносної деформації, що відповідає значенню навантаження F на прямолінійній ділянці графічної залежності.

В результаті проведених випробувань ґраток на основі скловолокна обробленого полімер бітумним вяжучим було встановлено, що:

- модуль пружності композиції «асфальтобетон+ґратка+асфальтобетон» порівняно із композицією без застосування ґратки підвищується до 20 - 40 % і збільшується з зростанням температури;
- міцність на розтяг композиції «асфальтобетон+ґратка+асфальтобетон» збільшилась на 20 - 30 %, порівняно із композицією без застосування ґратки;
- показник втоми композиції «асфальтобетон+ґратка+асфальтобетон» також збільшився на 5 - 20 %.

Отримані результати свідчать про достатньо високу стійкість випробуваних геограток до пошкодження при укладанні, що дозволяє отримувати суттєвий армуючий ефект.

Визначення термореологічних характеристик матеріалів покриття за даними параметрів їх рецептів та властивостей компонентів

Крім експериментальних методів застосовували емпіричні залежності для визначення термореологічних характеристик асфальтобетону, отриманих Г.К. Сюньї, Б.С.Радовським і І.М. Щербаковим, В.В. Мозговим [60]. Ці залежності базуються на використанні методів теорії композитів при розгляді комірчатої моделі асфальтобетону стосовно тривалості дії навантаження 0,1 с.

Для модуля пружності асфальтобетону вираз має вигляд:

$$E_{a/\delta}(t = 0.1c; T) \approx \left[\frac{1}{E_M} + \frac{V_{II} + \Pi_M K_{II}}{3E_{a/\delta}(t = 0.1c; T) (t = 0.1c; T)(1 - \Pi_M) K_{II} K_{\delta} K_g} \right]^{-1}, \quad (3.8)$$

$$\text{де } \Pi_M = (b + V_{II}) / (l + b); K_{II} = l - (V_{II} / \Pi_M)^{2/3}$$

$$Kc' = l + 0.7mn(C_1 - 1) / b;$$

$$K_g = \begin{cases} 1, & b > b_0 \\ b/b_0, & b < b_0 \end{cases} \quad K_\sigma = \begin{cases} 4,6 & \text{- для матеріалів з окатаними зернами;} \\ 4,0 & \text{- для матеріалів з гострокутними зернами;} \end{cases}$$

при $V_{II} < 0,02$; $K_\sigma = K_\sigma - (10,02 - V_{II})$; $b_0 = A \cdot \Pi + B \cdot \Pi + C \cdot m_n$;

E_m – модуль пружності кам'яного матеріалу;

b – об'ємна частка бітуму понад одиницю об'єму кам'яного матеріалу;

b_0 – оптимальна кількість бітуму;

T – температура;

Π , Π , m_n – об'ємна частка відповідно щебеню, піску і мінерального порошку в загальному об'ємі кам'яного матеріалу;

A , B , C – емпіричні коефіцієнти, що відображають бітумоемність мінеральної частини;

C' – емпіричний коефіцієнт, який виражається експериментально встановленою залежністю

$$C'(t = 0,1c; T) = a[d(1 + fT) \lg P_{25}]^2 + 1, \quad (3.9)$$

де P_{25} – глибина проникнення голки пенетрометра при 25°C , в $\text{мм} \cdot 10^{-1}$;

a , d , f – емпіричні коефіцієнти, які відповідно дорівнюють $a = 0,05$; $d = 1$ $[\lg(\text{мм} \cdot 10^{-1})]^{-1}$; $f = 0,03^\circ\text{C}^{-1}$.

Наведений вище зв'язок між модулем пружності асфальтобетону і його функцією релаксації дозволяє використовувати вирази наступний вираз для встановлення залежності $R(t)$ від складу матеріалу.

З цією метою замінюючи $E(t)$ на $R(t)$ і вводячи зміст в'язучого (B) в долях одиниці по масі мінерального матеріалу (понад одиницю його маси), отримаємо

$$R_{a/\sigma}(t, T) \approx R_\sigma(t, T) = R_\sigma(t, T) \left(1 + \frac{2,5}{n(t, T)} \frac{C_v K_v}{1 - C_v K_v} \right)^{n(t, T)}, \quad (3.10)$$

де $n(t, N) = 0,831 \lg[4,5 \cdot 10^4 / R_6(t, T)]$; $C_v = \rho_a / (1 + B) \rho_m$, розмірність R_a/b і R_6 в МПа;

ρ_a, ρ_m – середня щільність відповідно асфальтобетону і його мінерального матеріалу.

3.3 Чисельний аналіз підвищення довговічності нежорсткого дорожнього одягу з поперечними тріщинами в асфальтобетонному покритті

Однією із основних причин появи поперечних тріщин у верхньому шарі дорожнього покриття в зимовий час являються температурні розтягуючі напруження в поздовжньому напрямі дороги. Вони викликані тим, що при низьких температурах верхні шари дороги намагаються зменшити свою довжину, проте через практично нескінченну довжину не можуть це здійснити і в верхньому шарі виникають поперечні неупорядковані тріщини, які внаслідок дії транспортних навантажень і сил від води, що замерзла, призводять до подальшого розшарування і руйнування дорожньої конструкції (додаток Б). Тому їх герметизують, заповнюючи спеціальною мастикою, яка перешкоджає проникненню вологи. В той же час такі тріщини знижують загальну згинальну жорсткість конструкції, сприяючи концентрації нормальних і дотичних напружень в розглянутій зоні дорожньої конструкції під дією транспортних навантажень.

Нижче наведені результати дослідження для випадку, коли вертикальна тріщина пронизує два верхні шари (рис. 3.13 – 3.15). Тут напруження σ_{xx} також концентрується в гирлі тріщини, при чому воно відчутно виросло і стало стискующим (рис. 3.13 і рис. 3.14). Суттєва перебудова відбулася і з напруженнями τ_{xy} (рис. 3.15 і рис. 3.16). Їх концентрація також має місце в гирлі тріщини і вона відрізняється відчутним зростанням τ_{xy} в порівнянні з випадком наявності внутрішньої тріщини.

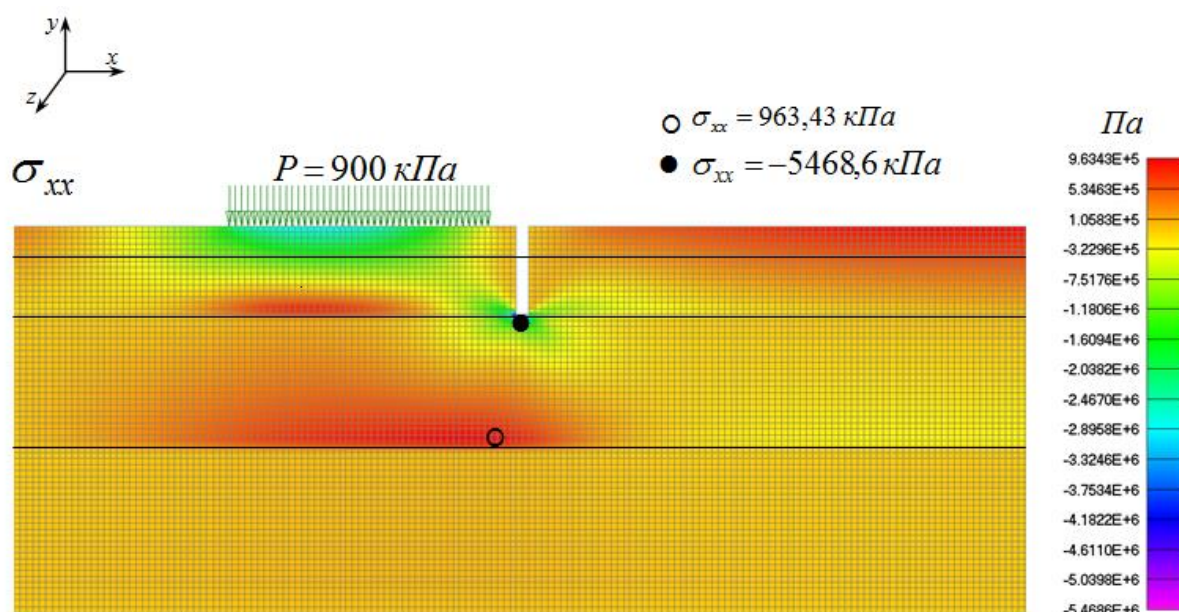


Рисунок 3.13 – Поле розподілення нормальних напружень σ_{xx} (випадок $h1 = 0,04$ м, $h2 = 0,08$ м, $h3 = 0,21$ м, $h4 = 0,2$ м, $h5 = 1,47$ м, $P = 900$ кПа)

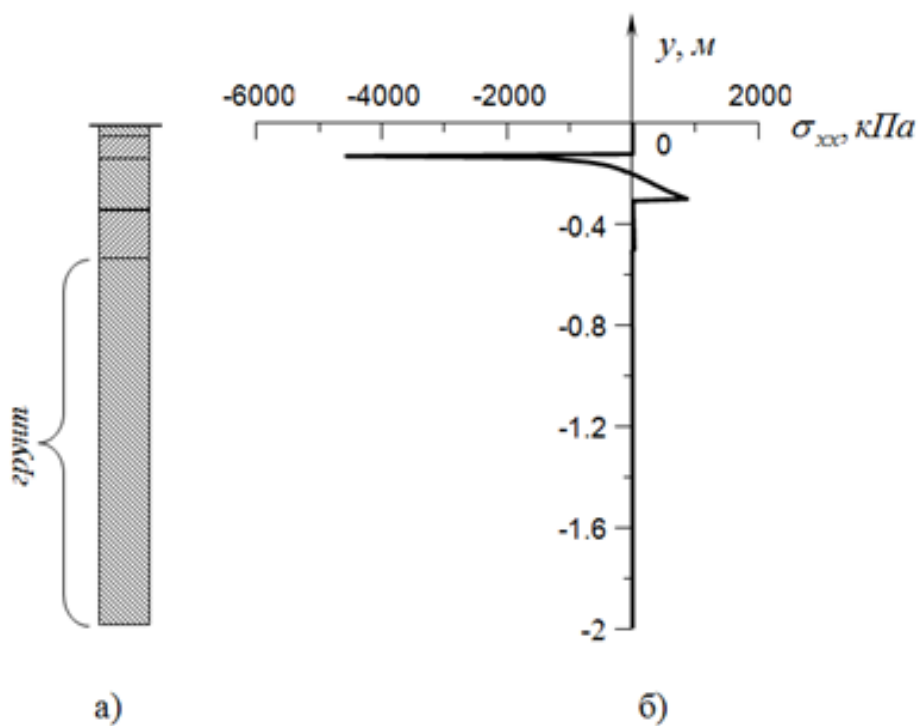


Рисунок 3.14– Схема розташування шарів покриття (а) та графік функції $\sigma_{xx}(y)$ в центральному перерізі (б)

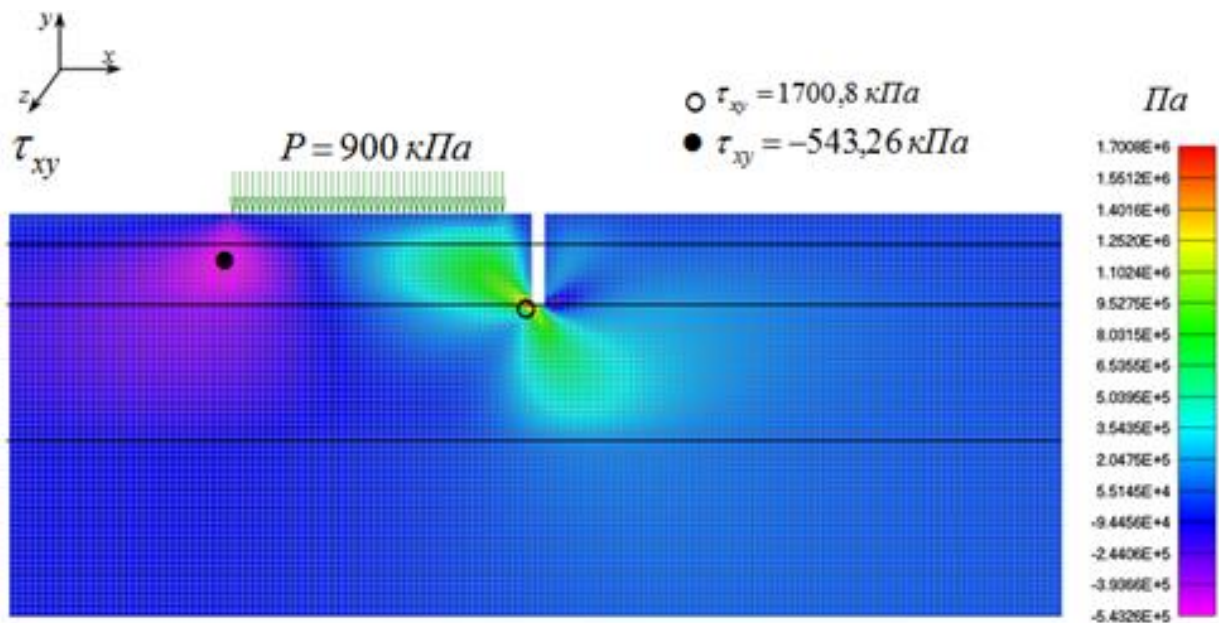


Рисунок 3.15 – Поле розподілення дотичних напружень τ_{xy} (випадок $h1 = 0,04$ м, $h2 = 0,08$ м, $h3 = 0,21$ м, $h4 = 0,2$ м, $h5 = 1,47$ м, $P = 900$ кПа)

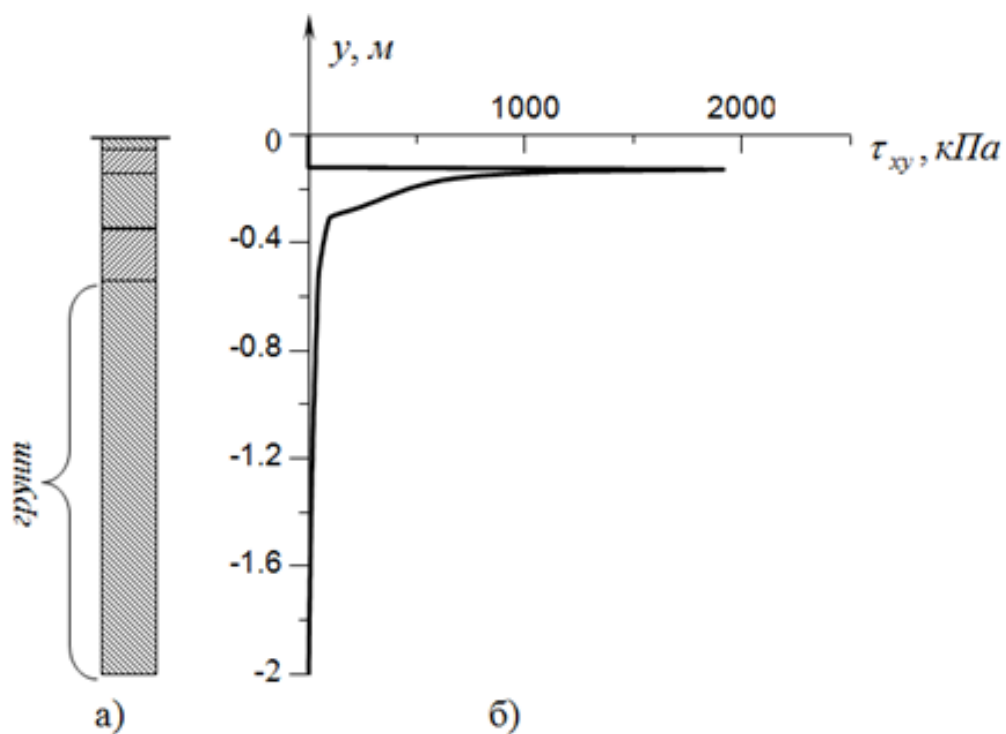


Рисунок 3.16 – Схема розташування шарів покриття (а) та графік функції $\tau_{xy}(y)$ в центральному перерізі (б)

Для зняття цих додаткових напружень, також сприяючих подальшому руйнуванню конструкції, запропоновано безпосередньо під розрізом створювати підкріплюючу плиту, виконану із більш жорсткого і міцного матеріалу, який

здатний сприймати підвищені напруження. В зв'язку з тим, що ця плита розміщена в зоні концентрації напружень, ці напруження стають менше небезпечними.

Нижче наведено скінченно-елементне дослідження перебудови напружень для випадку, коли транспортне навантаження інтенсивністю p розташоване асиметрично з однієї сторони розрізу (рис. 3.19). Вибрані плити різної геометрії і ширини. Розглядалися принципові сторони питання про підкріплення конструкції, тому задача розв'язувалася в постановці плоского напруженого стану. Для розрахунку виділена трьохшарова конструкція (рис. 3.19 а) довжиною 5 м і з товщинами верхніх шарів $h_1=0,23$ м, $h_2=0,22$ м, $h_3=1$ м. Ширина зазору складає 0,03 м.

Транспортне навантаження інтенсивністю $P=8 \cdot 10^5$ Па розподілене на ділянці шириною 0,6 м.

Задача розв'язувалася в пружній постановці.

Спочатку було виконано розрахунок конструкції без розрізу. Він показав, що під вибраним навантаженням найбільші розтягуючі напруження реалізуються на вільній поверхні покриття і складають $\sigma_{zz}=1372618$ Па, найбільші за модулем стискаючі напруження σ_{yy} мають місце в нижній точці розриву й дорівнюють $\sigma_{yy}=-804151$ Па.

Дослідження проведене методом скінченних прямокутних елементів. В поздовжньому напрямі (вздовж координати z) конструкція розбилась на 186 скінченних елементів, при цьому перший шар за товщиною розбивався на 5 скінченних елементів, другий – на 8 скінченних елементів і третій – на 13 скінченних елементів. Для такої дискретизації загальне число скінченних елементів склало 10940, вузлів – 17091, шуканих змінних – 924.

Потім на тій же скінченно-елементній сітці проаналізовано напружено-деформований стан конструкції з зазором. В кольоровому зображенні показані, поля напружень σ_{xx} (а), σ_{yy} (б), σ_{zz} (в) і σ_{yz} (г). Можна помітити, що тут напруження суттєво збільшилися.

На них кожному відтінку кольорової палітри відповідає певне значення відповідного напруження, величина якого подана справа на кольоровій шкалі. Максимальне (за модулем) значення цих величин наведені у таблиці 3.2.

Місця локалізації цих напружень позначені кружечками. Незалиті кружечки відносяться до напружень розтягу, залиті – до напружень стиску.

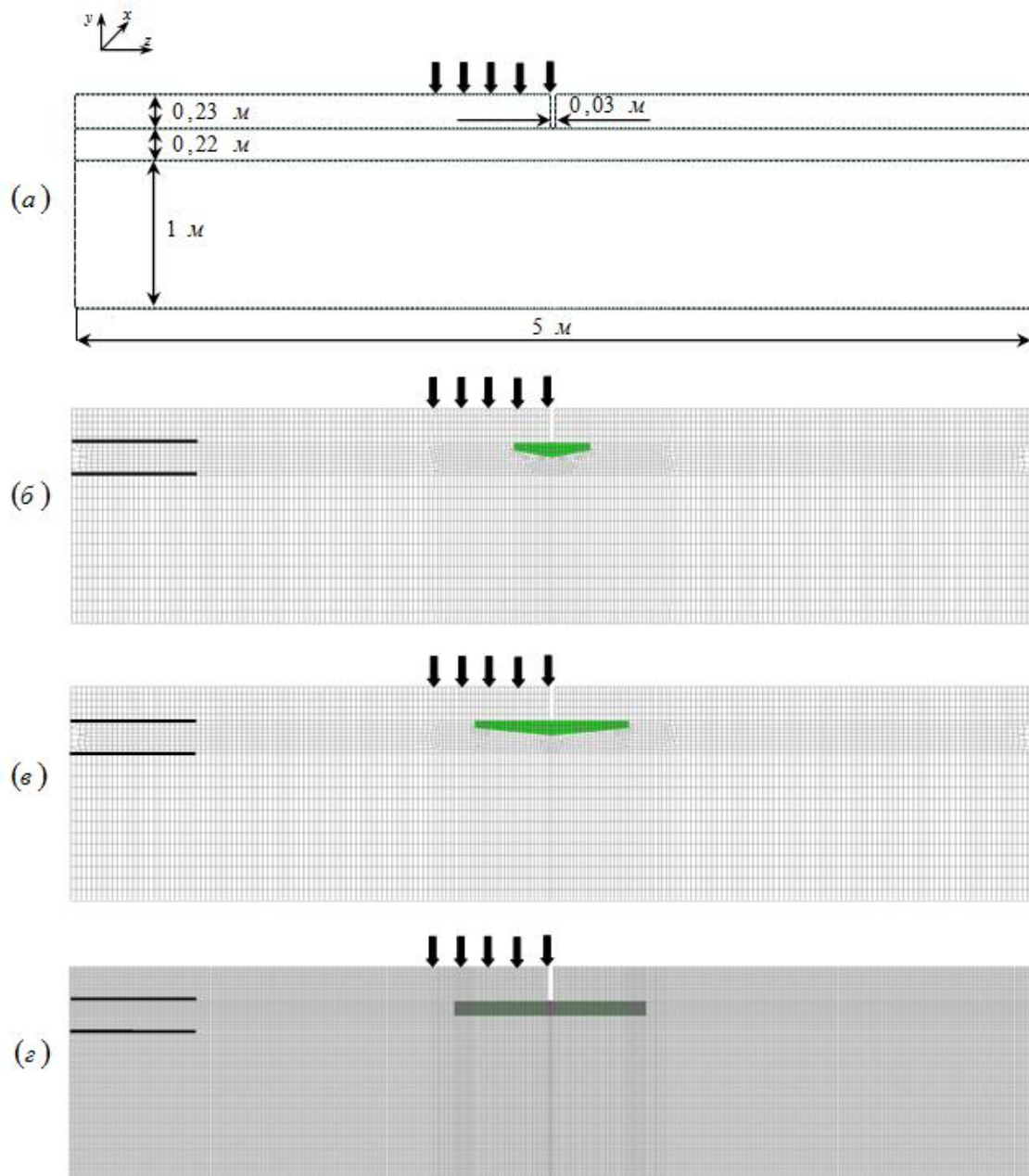


Рисунок 3.17 – Геометричні схеми дорожнього покриття з тріщиною, яка підкріплена плитою: а – вихідна геометрія; б – випадок 1; в– випадок 2;

г – випадок 3

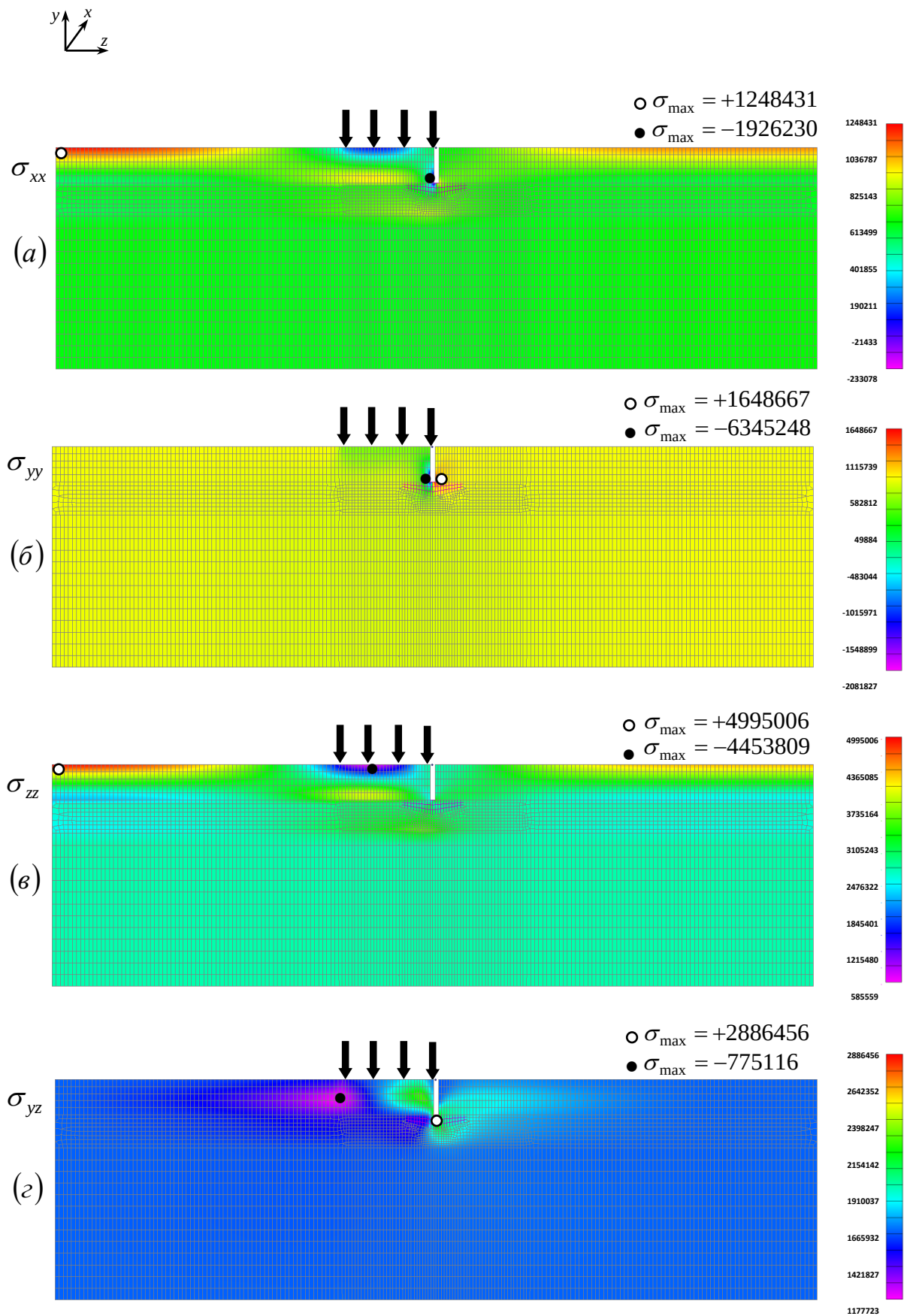
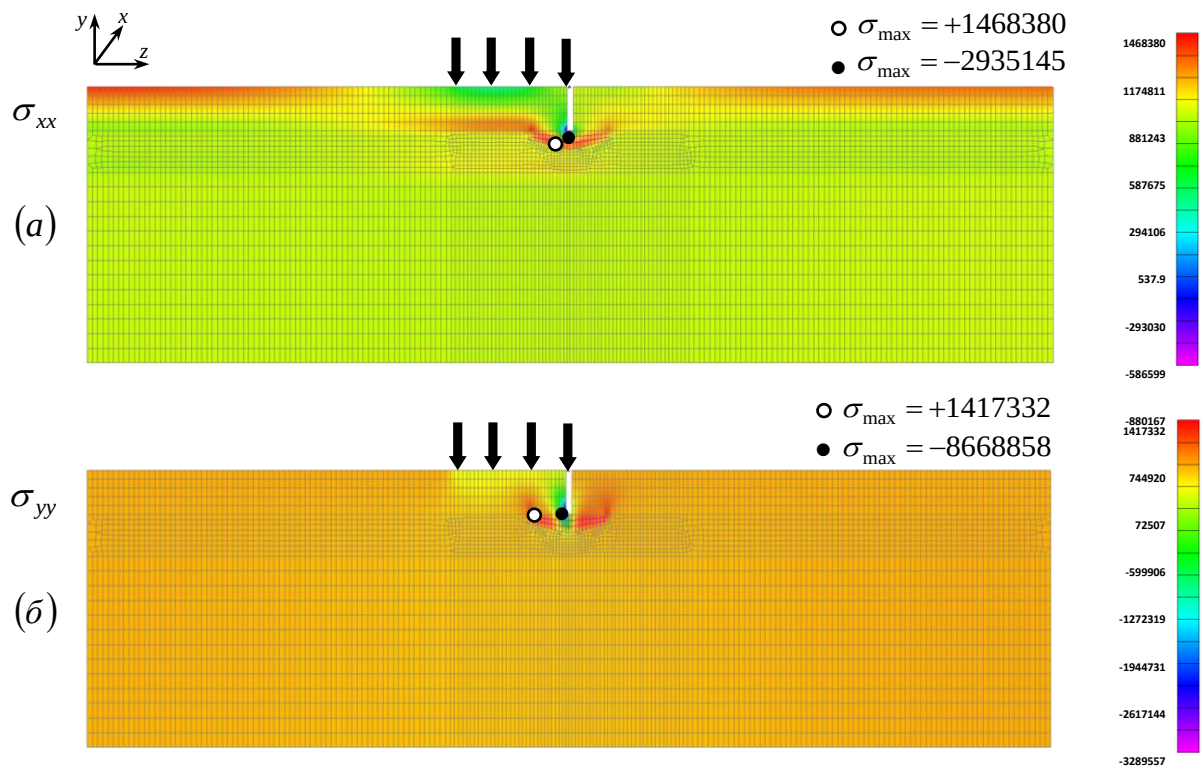


Рисунок 3.18 – Поля напружень σ_{xx} (а), σ_{yy} (б), σ_{zz} (в), σ_{yz} (г) в перерізі без підкріплення (випадок 1)

Таблиця 3.2 – Екстремальні значення розрахункових напружень

П/П	Розрахункова величина	$\sigma_{екстр}$ (розт.), Па	$\sigma_{екстр}$ (стис.), Па
1	σ_{xx}	1248431	1926230
2	σ_{yy}	1648667	6345248
3	σ_{zz}	4995006	4453809
4	σ_{yz}	2886456	75116

Рисунок 3.19 – Поля напружень σ_{xx} (а) і σ_{yy} (б) в перерізі конструкції, яка підкріплена плитою (випадок 1, $E=10^{10}$ Па)

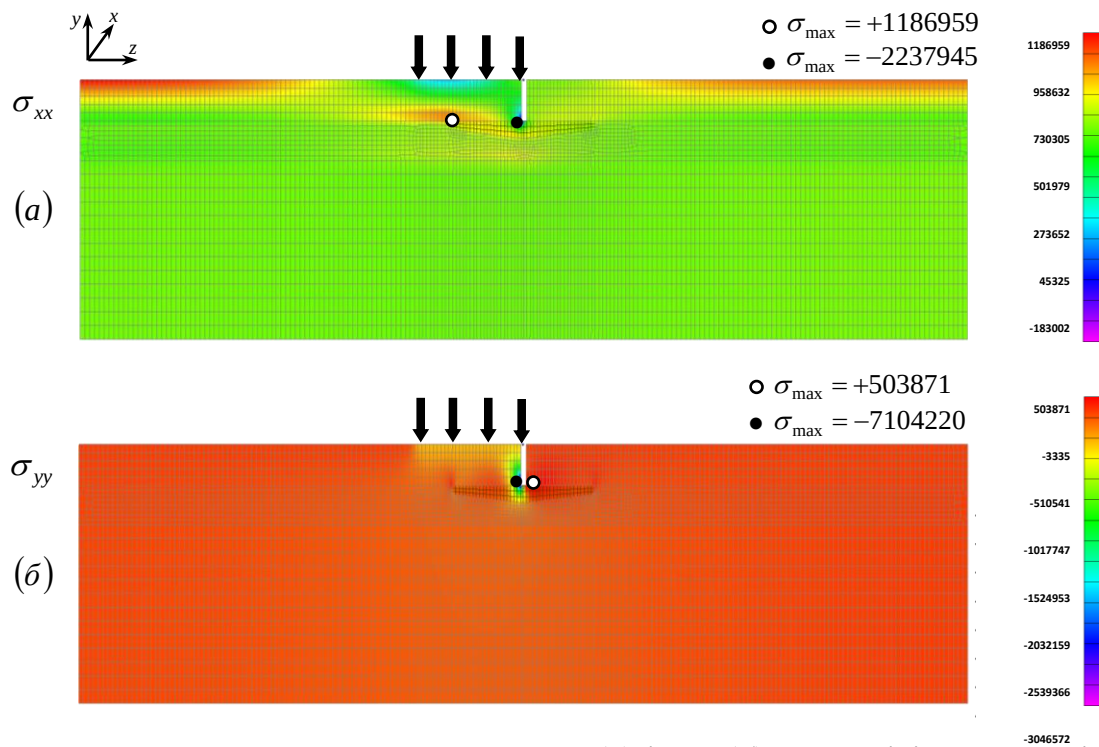
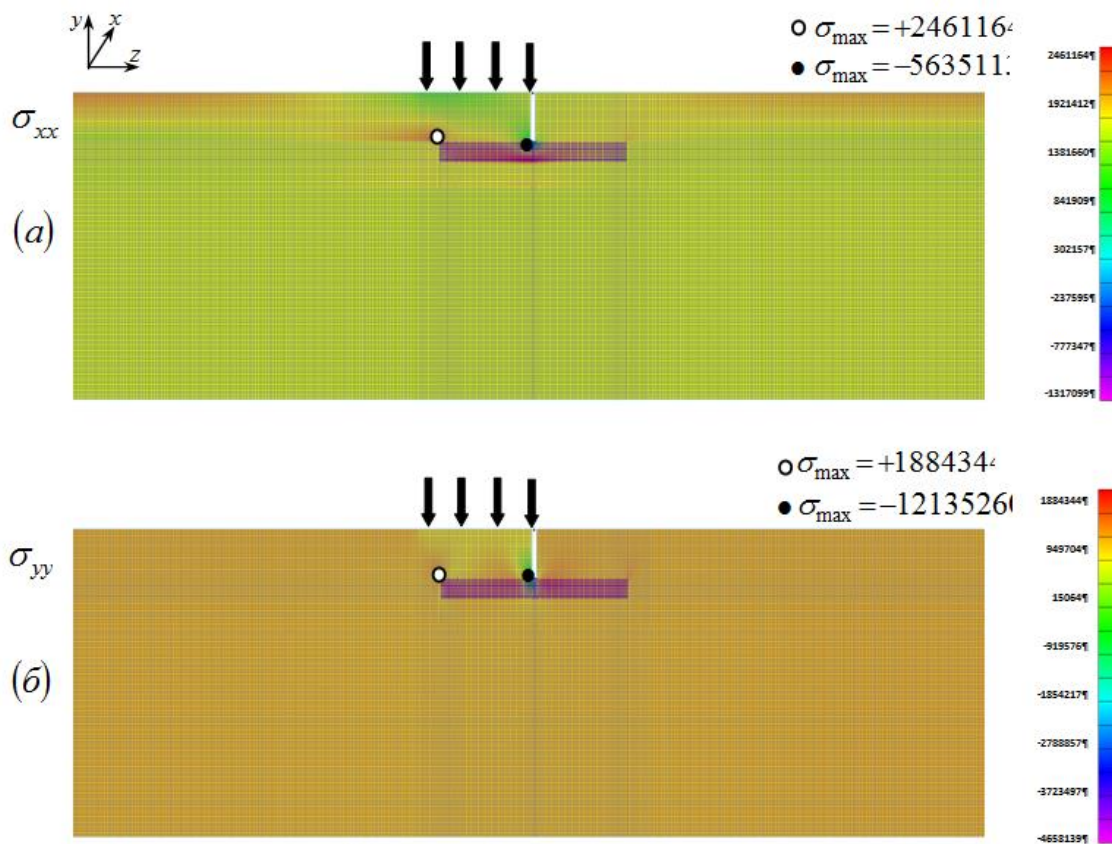


Рисунок 3.20 – Поля напружень σ_{xx} (а) і σ_{yy} (б) в перерізі конструції, яка підкріплена плитою (випадок 2, $E=10^{10}$ Па)



Поля напружень σ_{xx} (а) і σ_{yy} (б) в перерізі конструції, яка підкріплена плитою (випадок 3, $E=3 \cdot 10^{10}$ Па)

Аналіз даних зміни функцій $\sigma_{zz}(z)$ і $\sigma_{yz}(z)$ в верхньому скінченно-елементному ряду другого шару непідкріпленої конструкції з розрізом. Їх аналіз підтверджує, що введення розрізу приводить до суттєвої концентрації напружень у його околі і доцільності введення підкріплення в цій зоні.

Аналіз даних зміни функцій $\sigma_{xx}(z)$ (а), $\sigma_{yy}(z)$ (б), $\sigma_{zz}(z)$ (в) і $\sigma_{yz}(z)$ (г) в скінченно-елементному ряду, що віддалений своєю нижньою стороною на 0,1 м від границі між першим і другим рядом. Відзначимо, що цей переріз проходить через нижню площину підкріплюючої плити.

Для зменшення рівня напружень в зоні найбільших напружень (безпосередньо під розрізом) вводяться підкріплюючі плити шириною 0,4 м, 0,8 м і 1 м з підвищеними значеннями модуля пружності $E=10^{10}$ Па і $3 \cdot 10^{10}$ Па.

Аналізуючи поля напружень для випадків 1 і 2, при $E=10^{10}$ Па. Із них випливає, що максимальні значення напружень збільшилися, проте вони сформулювалися в тілі підкріплюючої плити. В масиві шаруватого асфальтобетонного покриття вони зменшилися.

Перебудова напружено-деформованого стану має місце помітніше зі збільшенням розмірів підкріплюючої плити. Порівняно з випадком непідкріпленої конструкції максимальні значення напружень практично не змінили своїх величини, а деякі навіть збільшилися. Проте при цьому максимальні напруження змістилися у внутрішню зону тіла плити, що не є небезпечним, так як матеріал плити є більш міцним порівняно з матеріалами шарів.

Таким чином комп'ютерні розрахунки показали, що включення плит з більш високими значеннями модуля пружності і граничними напруженнями в зоні концентрації напружень дорожнього покриття дозволяє локально зміцнити шарову конструкцію і повисити загальну несучу можливість системи.

3.4 Короткі висновки

1. Поставлена задача про підкріплення плитою конструкції дороги розвантажуючим розрізом. Крім позитивного термодетформованого ефекту під дією транспортних навантажень такі розрізи знижують загальну згинальну жорсткість конструкції, сприяючи концентрації нормальних і дотичних напружень в розглянутій зоні. Таке підкріплення конструкції запобігає подальшому руйнуванню і розшаруванню дорожнього покриття.

Досліджено причини появи поперечних тріщин у верхньому шарі дорожнього покриття в зимовий час. Розглянуто випадки навантажень при плитах різної геометрії і ширини. Виконано скінченно-елементне дослідження перебудови напружень для випадку, коли транспортне навантаження розташоване асиметрично з однієї сторони розрізу. Розрахунок конструкції без розрізу показав, що під вибраним навантаженням найбільші розтягуючі напруження реалізуються на вільній поверхні покриття, найбільші за модулем стискаючі напруження мають місце в нижній точці розрізу. Порівняно з випадком непідкріпленої конструкції максимальні значення напружень практично не змінили своїх величини, а деякі навіть збільшилися. Проте максимальні напруження змістилися у внутрішню зону тіла плити, що не є небезпечним, так як матеріал плити є більш міцним порівняно з матеріалами шарів.

2. Проведений чисельний аналіз термопружного напруженого стану розглянутої моделі армованого бруса дозволяє зробити наступні висновки:

У верхньому шарі асфальтобетонного дорожнього покриття, що моделюється брусом прямокутного перерізу нескінченної довжини, при охолодженні його на температуру виникають поздовжні однакові у всіх точках розтягуючі напруження, при цьому нормальні напруження, в поперечних напрямках залишаються рівними нулю. Тому в цьому випадку у всіх точках бруса напруження за Мізесом дорівнюють поздовжнім напруженням.

Як відомо, поля напружень, що генеруються таким чином, є основною причиною виникнення поперечних тріщин в дорожньому покритті в зимовий час.

З метою підвищення тріщиностійкості цієї конструкції в практиці дорожнього будівництва застосовується зміцнення покриття поздовжніми армуючими стержнями підвищеної міцності.

Виконаний скінченно-елементний аналіз термопружного напружено-деформованого стану моделі розглянутої конструкції показав, що в залежності від відношення значень коефіцієнтів температурного лінійного розширення введення в тіло шару покриття поздовжнього армуючого стержня може як збільшити, так і зменшити міцність конструкції. Встановлено, що якщо ці коефіцієнти однакові, то переміщення і деформації тіла асфальтобетонного шару і армуючого стержня сумісні, на поверхні їх контакту не виникають додаткові напруження, напруження за Мізесом в шарі дорівнює напруженням і армуючий стержень має більш високу міцність, яка перешкоджає руйнуванню покриття і утворенню в ньому тріщин.

Однак ситуація принципово змінюється, якщо ці коефіцієнти мають різні значення. Тоді додаткові радіальні деформації в тілі покриття і в стержні на поверхні їх контакту набувають великих приростів і в прилеглий до неї зоні виникають додаткові радіальні і окружні нормальні напруження, які призводять до істотного локального збільшення напружень за Мізесом. Завдяки цьому, їх граничні значення спочатку виникають на поверхні сполучення двох матеріалів, у зв'язку з чим тіло покриття в першу чергу відривається від тіла арматури і вона перестає надавати підкріплювальний ефект для конструкції. В цьому випадку введення арматури в покриття приводить навіть до негативного ефекту, оскільки на її поверхні відбувається руйнування матеріалу шару асфальтобетону, що призведе до подальшого передчасного зародження в ньому поперечних тріщин.

Основні результати досліджень третього розділу висвітлено в роботах автора: [27, 47 – 50, 110].

Встановлені особливості деформування армованих конструкцій асфальтобетонних покриттів в умовах зимових змін їх температури приводять до висновку про доцільність вибору матеріалів асфальтобетону та арматури з однаковими значеннями їх коефіцієнтів температурного лінійного розширення.

Методом скінчено-елементного аналізу встановлено, що сезонне термо-реологічне збільшення модуля пружності асфальтобетонних шарів в зимовий час приводить до помітного перерозподілу полів напружень в них при дії транспортних навантажень і супроводжується збільшенням нормальних напружень розтягу у нижньому асфальтобетонному шарі. Цей фактор може бути одним з основних додаткових механізмів більш інтенсивного руйнування дорожніх покриттів в зимовий час.

Відзначено, що зниження рівня додаткових напружень розтягу в асфальтобетонних шарах в зимовий час може бути досягнуто або за рахунок зменшення транспортних навантажень у зимовий час шляхом контрольованого зниження вантажопідйомності транспортних засобів, або шляхом збільшення товщини підстильного щебеневого і піщаного шарів.

РОЗДІЛ 4

ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

4.1 Рекомендації з комплексного підвищення міцності дорожнього одягу з асфальтобетонним покриттям, що мають поперечні тріщини

Рекомендації з комплексного підвищення міцності дорожнього одягу з асфальтобетонним покриттям, що мають поперечні тріщини складаються із матеріалознавчих, конструктивних і технологічних підходів.

Матеріалознавчі підходи полягають у наступному.

Застосування герметиків підвищеної деформативності за низьких температур та високою адгезійною здатністю до асфальтобетону передбачає дотримання розроблених вимог до герметиків.

Застосування армуючих матеріалів з мінімальними граничною відносною деформацією що перевищує граничну відносну деформацію асфальтобетону. При цьому перед використанням АСМ [127] для армування асфальтобетону необхідно здійснити процедуру оцінки впливу технологічних та транспортних факторів на циклічну довговічність армуючої сітки згідно з [152], а також встановлювати розрахункові характеристики армованого асфальтобетону

Застосування литого полімер асфальтобетону [155] для відновлення монолітності покриття з крупними поперечними тріщинами.

Конструктивні підходи полягають у наступному.

Ремонт крупних тріщин на всю товщину асфальтобетонних шарів із застосуванням армуючих матеріалів [127, 129, 132].

Укріплення шарів основи та ґрунту земляного полотна в зоні поперечних тріщин.

Технологічні підходи полягають у наступному.

Застосування просочування та ін'єктування шарів основи та ґрунту земляного полотна в зоні поперечних тріщин.

Застосування технології гарячого ресайклінгу для відновлення монолітності покриття з тріщинами згідно чинних нормативних документів (Р В.2.3-37641918-899; Р В.3.2-03450778-837).

4.2 Методика оцінювання характеру розтріскування та обґрунтування вибору технології і механізмів для відновлення несної здатності конструкції дорожнього одягу

Методику оцінювання характеру розтріскування та обґрунтування вибору технології і механізмів для відновлення несної здатності конструкції дорожнього одягу:

- аналіз вихідних даних стосовно: категорії дороги (вулиці), складу та інтенсивності руху, конструкції дорожнього одягу, історії будівництва та ремонтів, наявності доступних матеріалів і механізмів;

- візуальний огляд поверхні;

- створення картографії дефектів;

- здійснення (за необхідності) інструментальних вимірювань прогину (чаші прогину), відбір кернів (вирубків), випробування асфальтобетону, ґрунту тощо;

- встановлення різновидів поперечних тріщин згідно їх класифікації;

розроблення варіантів технології відновлення несної здатності конструкції дорожнього одягу;

- виконання техніко-економічного аналізу варіантів технології та вибір і обґрунтування раціонального варіанту для реалізації.

4.3 Загальні положення методики розрахунку нежорсткого дорожнього одягу з асфальтобетонним покриттям, що має поперечні температурні тріщини

Розрахунок нежорсткого дорожнього одягу з асфальтобетонним покриттям, що має поперечні температурні тріщини, передбачає наступну послідовність дій:

- збір і аналіз вихідних даних;
- розробка варіантів конструкції дорожнього одягу;
- розрахунок конструкції за ГБН В.2.3-37641918-559;
- визначення міри вичерпування довговічності від дії активного напруження зсуву $T(t)$ протягом часу спостереження t на характерних етапах експлуатації асфальтобетонного покриття згідно з п.2.2;
- визначення часу до моменту настання порушення критеріїв граничного стану за довговічністю згідно з п.2.2;
- вибір найбільш раціонального варіанту, за результатами техніко-економічного обґрунтування.

Методика розрахунку нежорсткого дорожнього одягу з асфальтобетонним покриттям, що має поперечні температурні тріщини здійснюється у наступній послідовності.

1. Встановлюють вихідні дані:

- категорію автомобільної дороги;
- інтенсивність руху та склад транспортного потоку;
- дорожньо-кліматичну зону та регіон проектування;
- властивості ґрунтів, які передбачається використовувати в робочому шарі земляного полотна;
- підвищення поверхні дорожнього покриття над рівнем ґрунтових або поверхневих вод;
- тип місцевості за умовами зволоження земляного полотна.

Для реконструкції або капітального ремонту додатково враховують:

- транспортно-експлуатаційний стан існуючої автомобільної дороги;

- інформацію про будівництво та ремонтні заходи щодо об'єкта;
- загальний модуль пружності дорожнього одягу у розрахунковий період.

У випадках значної неоднорідності величин фактичного загального модуля пружності (понад 25 % від середнього значення), потрібно визначити товщини шарів і пошарово модуль пружності дорожнього одягу та на поверхні земляного полотна.

Якщо інформація щодо значень фактичного модуля пружності існуючого одягу відсутня, допускається проектувати дорожній одяг на основі даних обстежень:

- товщин конструктивних шарів дорожнього одягу;
- характеристик матеріалу конструктивних шарів;
- властивостей ґрунту земляного полотна, його вологості та умов зволоження.

2. Розробляють альтернативні варіанти конструкції дорожнього одягу згідно ГБН В.2.3-37641918-559 [120].

3. Розраховують конструкції дорожнього одягу за всіма критеріями граничного стану згідно з ГБН В.2.3-37641918-559 та визначають товщини конструктивних шарів розроблених альтернативних варіантів конструкцій дорожнього одягу.

4. Визначають момент до утворення температурних тріщин в асфальтобетонному покритті t_1 .

Для встановлення часу t_1 до утворення температурних поперечних тріщин в асфальтобетонному покритті після початку його влаштування враховується вплив коливань температур та транспортних навантажень [60]. У даному випадку використовують умову температурної тріщиностійкості асфальтобетонного покриття, що має вигляд:

$$M = M_T + M_{TP} \leq 1, \quad (4.1)$$

де M – сумарна міра вичерпування довговічності асфальтобетонного покриття, що складається з міри вичерпування довговічності від температурних

напружень при коливанні температури (M_T) та від дії транспортного навантаження (M_{TP}).

Міру вичерпування довговічності асфальтобетонного покриття від температурних напружень $\sigma_T(t)$ при коливанні температури до моменту t_1 утворення температурних тріщин, визначається за аналітичною залежністю:

$$M_T = \int_0^{t_1} \frac{\sigma_T(t)^{b(t,T)}}{B_t(t,T)} dt. \quad (4.2)$$

де B , b – параметри функції довговічності асфальтобетону (визначаються експериментально).

Міра вичерпування довговічності від дії транспортного навантаження визначається за аналітичною залежністю, що базується на математичній моделі ГБН В.2.3-37641918-559:

$$M_{TP} = \frac{\sum N_p(t_1)}{[N_p]}, \quad (4.3)$$

де $\sum N_p(t_1)$ – сумарна інтенсивність руху на момент часу t_1 ;

$[N_p]$ – гранично допустима кількість прикладання розрахункового навантаження, що може витримати асфальтобетонне покриття при дії горизонтального розтягуючого нормального напруження σ_r .

Вирази (4.2) і (4.3) підставляються в умову температурної тріщиностійкості асфальтобетонного покриття (4.2), після чого методом ітерацій визначається час t_1 до утворення температурних поперечних тріщин в асфальтобетонному покритті після початку його влаштування. Для цього встановлюють значення $[N_p]$ за аналітичною залежністю:

$$[N_p] = \left(\frac{R_p \cdot k_m \cdot k_{np}}{R_{3T}} \right)^{\frac{1}{m}}, \quad (4.4)$$

де R_p – розрахункове значення опору розтягу при згині за умов одноразового прикладання навантаження;

k_m – коефіцієнт що, враховує зниження міцності в часі від дії погодно-кліматичних умов;

m – показник втоми;

k_{np} – коефіцієнт, що враховує вплив повторних навантажень у нерозрахунковий період.

Значення гранично допустимого напруження асфальтобетону, виходячи із умови міцності асфальтобетонного покриття за ГБН В.2.3-37641918-559, встановлюють за виразом:

$$R_{зг} = K_{мц} \cdot \sigma_r \quad (4.5)$$

де $K_{мц}$ – коефіцієнт міцності з урахуванням заданого рівня надійності;

σ_r – найбільше напруження розтягу при згині від дії розрахункового транспортного навантаження в асфальтобетонному покритті.

Коефіцієнти та параметри залежностей (4.4)-(4.5) визначаються за методикою ГБН В.2.3-37641918-559.

5. Визначають міру вичерпування довговічності від дії активного напруження зсуву $T(t)$ протягом часу спостереження t_1 до утворення температурних тріщин в асфальтобетонному покритті згідно з п.2.2;

Міра вичерпування довговічності за критерієм опору зсуву являє собою міру пошкодженості за Бейлі

$$M_i = \int_0^{t_1} \frac{dt}{(t_p^*(T(t)))}, \quad (4.6)$$

де t_p^* – функція довговічності, що визначається за формулою Б.Г. Бартенєва:

$$t_p^*(T(t)) = B_T \cdot T^{-\beta}, \quad (4.7)$$

де B_T та β параметри функції довговічності при дії дотичних напружень, визначаються з урахуванням нижченаведених даних;

T – розрахункове активне напруження зсуву (частина зсувного напруження, непогашена внутрішнім тертям) в розрахунковій (найбільш небезпечній) точці конструкції від діючого навантаження, МПа, визначають за наступною залежністю:

$$T = [(\sigma_1 - \sigma_3) - (\sigma_1 + \sigma_3) \sin \varphi] / (2 \cos \varphi), \quad (4.8)$$

де φ – кут внутрішнього тертя ґрунту, град.;

σ_1 – максимальне головне напруження, МПа;

σ_3 – мінімальне головне напруження, МПа (враховуючи, що $\sigma_1 \geq \sigma_3 = \sigma_2$).

Головні напруження σ_1 і σ_3 розраховують за теорією пружності для шаруватих середовищ.

З огляду на те, що граничне напруження зсуву в ґрунті T_{zp} , у МПа, згідно чинних нормативних документів визначають за формулою (4.9):

$$T_{zp} = c_{zp} \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3, \quad (4.9)$$

де c_{zp} – зчеплення в ґрунті активної зони земляного полотна в розрахунковий період, МПа, встановлюють експериментально або за довідниковими даними;

k_1 – коефіцієнт, який враховує вплив навантажень на опір зсуву ґрунту; при розрахунку на вплив динамічного навантаження;

k_2 – коефіцієнт запасу на втому при розрахунку на тривалу дію навантаження, при розрахунку на динамічну дію навантаження коефіцієнт k_2 ;

k_3 – коефіцієнт, що враховує особливості роботи ґрунту у конструкції; а також з урахуванням того, що на основі проведених досліджень встановлено зв'язок коефіцієнта k_2 з сумарною кількістю проїздів розрахункового навантаження за строк експлуатації дорожнього одягу:

$$k_2 = \gamma_{np} \cdot \left(\sum N_p \right)^{\frac{1}{\beta}}, \quad (4.10)$$

де γ_{np} і β – параметри, що встановлюються експериментально або за довідковими даними.

Тоді (4.9) можна переписати у вигляді (4.11):

$$T_{гр} = [C_{гр}] \cdot \left(\sum N_p \right)^{\frac{1}{\beta}}, \quad (4.11)$$

З урахуванням циклічного навантаження дотичними напруженнями T протягом часу навантаження t_n параметр B_T визначається за виразом (2.10):

$$B_T = \frac{[C_{zp}]^\beta}{t_n}. \quad (4.12)$$

1. Визначають міру вичерпування довговічності від дії активного напруження зсуву $T(t)$ протягом часу спостереження t при перезволоженні ґрунту земляного полотна та незв'язних шарів у період від моменту тріщиноутворення до моменту зменшення вологості за рахунок герметизації тріщин t_2 за залежністю

$$M_2((T), t) = \int_{t_1}^{t_2} \frac{dt}{(t_p^*(T(t)))}, \quad (4.13)$$

Процедуру обчислення величини $M_2((T),t)$ виконують аналогічно пункту 5, при розрахунковій вологості для цього проміжку часу від t_1 до t_2 , що відповідає середньоінтегральному значенню підвищеної вологості через перезволоження ґрунту внаслідок інфільтрації волого через тріщину. Ці параметри встановлюються на основі відомих літературних даних.

7. Виконують перевірку граничного стану за залежністю (4.13). якщо загальна міра вичерпування довговічності перевищує критичне значення, то методом ітерацій встановлюють довговічність дорожнього одягу на цих двох етапах експлуатації.

У випадку, коли сумарна міра пошкодженості буде дорівнювати допустимому значенню, значення довговічності дорожнього одягу буде рівним $M_2((T),t)$

У випадку, коли сумарна міра пошкодженості буде дорівнювати допустимому значенню, значення довговічності дорожнього одягу буде рівним $M_3((T),t)$

4.4 Вдосконалення технології армування асфальтобетонного покриття з поперечними температурними тріщинами

Суть вдосконалення технології армування асфальтобетонного покриття полягає у підвищенні технологічності виконання робіт та зменшення небезпеки утворення відображених тріщин при капітальному ремонті вулиць і доріг з асфальтобетонним покриттям.

Підвищення технологічності застосування АСМ передбачає ефективне закріплення армуючого матеріалу на поверхні основи під асфальтобетонними шарами підсилення. Одним з найбільш ефективних способів підвищення технологічності АСМ є використання так званих самоклеючих матеріалів, що здатні за рахунок високої адгезії до асфальтобетонного шару основи міцно

утримуватись на поверхні під час руху технологічних механізмів, що застосовуються при влаштуванні асфальтобетонних шарів.

Застосування АСМ для армування шарів асфальтобетону під час ремонтів дозволить зменшити небезпеку утворення відображених тріщин і, як наслідок, підвищити гідроізоляційну здатність асфальтобетонного покриття, а також збільшити міжремонтні терміни служби покриття.

До сучасних самоклеючих матеріалів відноситься армуючий матеріал ADFORS GlasGrid GG.

ADFORS GlasGrid GG – це скловолокниста сітка високої міцності з жорсткою структурою, покрита запатентованим еластомерним полімером з нанесенням самоклеючого шару. Кожен компонент, який утворює решітку, є стійким до ультрафіолетового випромінювання і хімікатів, що містяться в природному середовищі ґрунту.

За результатами досліджень, виконаних ДП «ДерждорНДІ» геосітка скловолоконна марки GlasGrid «ADFORS SAINT-GOBAIN» відповідає вимогам ГБН В.2.3-37641918-544 [129] до армуючих прошарків, які використовуються в верхніх шарах дорожніх конструкцій для армування, тріщинопереривання, ліквідації зсувних ділянок та укріплення дорожнього одягу.

Технічні параметри армуючого синтетичного матеріалу ADFORS GlasGrid GG наведені в таблиці 4.1.

Конструкції дорожнього одягу із застосуванням армуючого геотекстильного матеріалу ADFORS glasgrid GG

При застосуванні матеріалу ADFORS GlasGrid GG в конструкціях дорожнього одягу для армування асфальтобетонних шарів враховується вид дорожньо-будівельних робіт, що виконуються на вулицях і дорогах: нове будівництво, реконструкція, капітальний ремонт, середній ремонт, поточний ремонт.

Таблиця 4.1 – Технічні параметри армуючого синтетичного матеріалу
ADFORS GlasGrid GG

Найменування показника	Значення показника для сітки			Стандарт
	GG 50	GG 100	GG 200	
Міцність при розтягу (MD x CD)	(55 x 55) - 5 кН/м	(115 x 115) - 15 кН/м	(115 x 215) - 15 кН/м	EN ISO 10319 ASTM D6637
Розтягування	2,5 ± 0,5 %	2,5 ± 0,5 %	2,5 ± 0,5 %	EN ISO 10319 ASTM D6637
Міцність на розтяг @ 2 % напруження (MD x CD)	(46 x 46) ± 10 кН/м	(95 x 95) ± 20 кН/м	(95 x 180) ± 20 кН/м	EN ISO 10319 ASTM D6637
Жорсткість @ 1 % напруження (MD x CD)	(2.200 x 2.200) ± 200 Н/мм	(4.600 x 4.600) ± 600 Н/мм	(4.600 x 8.600) ± 600 Н/мм	EN ISO 10319 ASTM D6637
Модуль Юнга E	73.000 МПа	73.000 МПа	73.000 МПа	
Маса одиниці площі	205 г/м ²	405 г/м ²	603 г/м ²	EN ISO 9864 ASTM D5261
Точка плавлення покриття Точка плавлення скла	>232 °C >820 °C	>232 °C >820 °C	>232 °C >820 °C	ASTM D276/EN ISO 3146 ASTM C338
Довжина рулону	150 м	100 м	70 м	
Ширина рулону	1,0; 1,5; 2,0; 3,0 м	1,0; 1,5; 2,0; 3,0 м	1,5; 3,0 м	
Площа рулону	150, 225, 300, 450 м ²	100, 150, 200, 300 м ²	105, 210 м ²	
Самоклеючий шар	активується тиском	активується тиском	активується тиском	
Розмір комірки	25 x 25 мм	12,5 x 12,5 мм (тип 8501) 25 x 25 мм (тип 8511)	25 x 19 мм	
Матеріал	Скловолокниста армована сітка з модифікованим полімерним покриттям і самоклеїним нижнім шаром, активує притиском.			

При конструюванні дорожнього одягу для нового будівництва з армованими АСМ асфальтобетонними шарами слід враховувати таке

розташування армуючої сітки щоб отримати максимальний ефект від армування з метою підвищення міцності та довговічності дорожнього одягу від дії транспорту і коливання температури.

При влаштуванні шарів підсилення під час реконструкції та капітального ремонту застосування АСМ в конструкції дорожнього одягу повинно бути направлене як на підвищення несучої здатності та міцності дорожнього одягу так і на зменшення небезпеки утворення відображених тріщин на розтрісканій основі.

При виконанні середнього ремонту дорожнього одягу з асфальтобетонними шарами при відновленні шорсткості та рівності, а також при покращенні експлуатаційних якостей дорожнього покриття, що має тріщини температурного та силового походження застосування АСМ повинно забезпечувати максимальну стійкість відремонтованого покриття до утворення відображених тріщин.

При виконанні поточного ремонту, що здійснюється з метою запобігання та негайної ліквідації дрібних деформацій і руйнувань дорожнього одягу застосування АСМ повинно в таких локальних місцях спільно з іншими заходами забезпечити відновлення несучої здатності та суцільності асфальтобетонних шарів.

При конструюванні дорожнього одягу з армованими асфальтобетонними шарами для нового будівництва слід враховувати, що необхідно забезпечити збереження міцності асфальтобетонних шарів, тобто їх спроможність протистояти руйнуванню на весь термін служби до капітального ремонту. В якості критерію граничного стану вибирають той, який вважають самим небезпечним.

Для асфальтобетонних шарів дорожнього одягу як шарів із зв'язних матеріалів, які складається з часток, що мають між собою зв'язок та працюють на розтяг, руйнуванням є поділ на частини.

Поділ на частини в багатьох випадках починаються з появою тріщини поблизу підшви асфальтобетонного покриття від втоми при повторному згині при дії найбільших горизонтальних нормальних напружень.

Саме такий напружено-деформований стан асфальтобетонного покриття також необхідно вважати розрахунковим на дію розтягуючих напружень, особливо для міських вулиць і доріг, де більш агресивною є дія розтягуючих напружень при більш повільному русі транспорту або тривалих його зупинках в місцях заторів перехресть та стоянок. Дія таких поверхневих напружень є постійною незалежно від пори року і жорсткості підстилаючих шарів асфальтобетонного покриття і також створює умову утворення тріщин на його поверхні.

Таким чином тріщини, утворені на підшві асфальтобетонних шарів і на їх поверхні поступово поширюються на всю їх товщину. Як наслідок, знижується здатність розподіляти навантаження на шари, що лежать нижче, утворюється сітка тріщин на смугах накату, там де колеса проходять частіше. Вода, що надходить через тріщини, перезволожує основу і земляне полотно, з'являються нові тріщини в покритті, виникають просідання в місцях перезволоження ґрунту, прискорюється утворення колії.

Враховуючи вище сказане залежно від характеру напружено-деформованого стану асфальтобетонних шарів для тих чи інших умов руху необхідно передбачати армування чи в нижній частині асфальтобетонних шарів, якщо переважатимуть розтягуючі напруження на їх підшві чи у верхній, якщо переважатимуть поверхневі розтягуючі та температурні напруження або подвійне армування (у нижній та верхній частинах асфальтобетонних шарів) якщо такі напруження рівноцінні.

4.5 Технологія ремонту асфальтобетонних покриттів в зоні каналізаційних люків

За останні роки суттєво змінилися характеристики транспортних потоків, виросли вантажопідйомність автотранспорту, його швидкість і інтенсивність руху, збільшилися динамічні навантаження автотранспорту на дороги і, у тому числі, каналізаційні люки, що знаходяться на проїжджій частині. Не секрет, що у містах на проїжджій частині автомобільних доріг і вулиць знаходиться велика кількість каналізаційних люків. Саме в зоні їх знаходження найчастіше починається руйнування асфальтобетонного покриття – виникають тріщини, розломи, вибоїни. Ці руйнування розповсюджуються в покритті і потребують, як правило, передчасного ремонту.

У європейському стандарті EN 124-1994 [153] та розробленому на його основі українському стандарті ДСТУ Б В.2.5-26 [154] наведені високі вимоги до вибору класу люків, що пред'являються до цих виробів Європейським Союзом та Україною. Застосування самих якісних люків та технологій їх установки не унеможливило передчасного руйнування покриття навколо них. Основними причинами руйнування асфальтобетонного покриття в зоні каналізаційних люків є:

- Зменшення поперечного перерізу асфальтобетонного шару покриття, що призводить до підвищення напружень, виникаючих від дії транспорту та від зміни температури;
- Різна жорсткість асфальтобетону та цементо-містких матеріалів, на які установлюють каналізаційні люки, що не забезпечує та навіть заперечує їх сумісну роботу під дією навантаження та коливань температури.

Для вирішення проблеми передчасного руйнування асфальтобетонних покриттів в зоні каналізаційних люків ТОВ “Капонір-Груп” (м. Київ) пропонує застосовувати унікальний інноваційний продукт, розроблений концерном “Saint-Gobain”, який не має аналогів у світі.

ТОВ “Капонір-Груп” є офіційним дистриб'ютором в Україні армуючих синтетичних матеріалів виробництва компанії “Saint-Gobain Adfors CZ s.r.o.” (Чехія), що входить до складу французького концерну “Saint-Gobain”. Концерн “Saint-Gobain” має більш ніж 350-річну історію, близько 30 років з якої складає

успішній досвід виробництва та застосування без перебільшення майже у всіх країнах світу армуючих синтетичних матеріалів для армування асфальтобетону. Використання новітніх наукових і технологічних розробок та впровадження розроблених патентів дозволило створити найсучасніше виробництво геограток зі скловолокна для самого різноманітного застосування. У 2018 році виробництво було удостоєно срібної нагороди WCM (World Class Manufacturing – Виробництво Світового Класу), що підтверджує високий рівень інновацій, відмінну якість продукції, а також високий рівень обслуговування клієнтів з країн Європи, Америки і Азії.

ТОВ “Капонір-Групп” пропонує геогратки торгівельної марки Adfors GlasGrid®, що дозволяють знизити ризик появи температурних, утомних і відображених тріщин в асфальтобетонному покритті, запобігти колієутворенню, суттєво зменшити витрати на будівництво, ремонт та експлуатацію автомобільних доріг та подовжити термін служби дорожнього одягу до 300%. Виробництво геограток Adfors GlasGrid® сертифіковане згідно з стандартом ISO 9001:2015 та відповідає усім вимогам стандарту EN 15381:2008 (ДСТУ EN 15381:2015 Геотекстиль та віднесені до геотекстилю вироби. Необхідні характеристики для використання в дорожніх конструкціях і асфальтобетонних покриттях). Геогратки Adfors GlasGrid® протестовані в провідних лабораторіях Європи і світу, а також в лабораторіях ДП “Державний дорожній науково-дослідний інститут імені М.П.Шульгіна” (ДерждорНДІ) та Національного транспортного університету (НТУ). Результати випробувань та багаторічний досвід використання геограток в світі підтвердили їх високу ефективність та здатність суттєво підвищити довговічність асфальтобетонних покриттів та зменшити витрати на їх ремонт і експлуатацію завдяки значним перевагам перед продукцією інших виробників (низьке максимальне подовження геограток дає найбільший армуючий ефект та найбільшу тріщиностійкість армованого асфальтобетону, а також дозволяє знизити сумарну товщину шарів дорожнього одягу; самоклеюча здатність геограток дозволяє значно прискорити будівництво та ремонт, а також знизити вартість робіт; висока міцність та жорсткість каркасу

геограшок дозволяють запобігти колієутворенню та значно збільшити довговічність асфальтобетонних покриттів та ін.).

Використання великого досвіду, залучення найкращих фахівців на безперервне вдосконалення якості продукції дозволило запропонувати унікальні армуючі геограшки для асфальтобетонних шарів, які спеціально розроблені для нового будівництва, реконструкції, капітального та середнього ремонтів асфальтобетонних покриттів на дорогах і вулицях, мостах і тунелях, аеропортах, місцях паркування, а також при ремонті навколо каналізаційних люків.

Для ремонту навколо каналізаційних люків пропонується спеціально розроблена армуюча геограшка Adfors GlasGrid® PM100.

Армуюча геограшка Adfors GlasGrid® PM100 представляє собою самоклеючий композиційний матеріал, що складається з міцної ґратки з жорсткою структурою зі скловолокна типу Е, покритої запатентованим еластомерним полімером, та нетканої підложки з поліефірного текстильного матеріалу, що просочена модифікованим бітумом.

Міцність при розтягуванні в поздовжньому та поперечному напрямках складає: $115 \times 115 \pm 15$ КН/м.

Максимальне відносне подовження становить $2,5 \pm 0,5$ %, тобто не перевищує 3%, що дозволяє геограшці миттєво сприймати на себе розтягуючі напруження, що виникають в асфальтобетоні, та забезпечити максимальний армуючий ефект.

Геограшки мають форму кільця з внутрішнім діаметром 685 мм або 785 мм.

Вони можуть застосовуватись безпосередньо на відфрезеровану поверхню без додаткової підготовки, або поверхню старого асфальтобетону, або на холодний або гарячий вирівнюючий шар. Завдяки тому, що вони самоклеючі, тобто надійно приклеюються до поверхні нижнього шару(що забезпечує підложка з поліефірного текстильного матеріалу, просочена модифікованим бітумом), зникає необхідність застосування бітумної емульсії.

Укладання відбувається у такій послідовності:

Геогратка ADFORS GlasGrid® PM100 укладається на суху, чисту поверхню, без пилу; при температурі 5 °С - 60 °С. Видаляється захисна плівка з нижнього боку і укладається геогратка самоклеючим шаром вниз. Перекриття секторів кілець геогратки повинно бути мінімально 1 см. Для приклеювання ґратку притісняють до поверхні. Вразу після цього укладається та ущільнюється гарячий верхній шар асфальтобетону (мінімальна товщина шару в ущільненому стані 4 см). Укладання виконується дуже швидко і не затримує час ремонту зони каналізаційного люку. Рух транспорту в зоні ремонту може бути відновлений після остигання верхнього шару асфальтобетону.

Досвід показує, що застосування геограток ADFORS GlasGrid® PM100 дозволяє значно підвищити довговічність асфальтобетонних покриттів на міських вулицях та дорогах.

В місті Києві вже є позитивний досвід застосування геограток ADFORS GlasGrid® PM100 при виконанні поточного ремонту міських вулиць та доріг. В 2019 року ці геогратки були застосовані КП “ШЕУ Оболонського району” комунальної корпорації “Київавтодор” в Оболонському районі м.Києва.

4.6 Оцінювання економічної ефективності герметизації тріщин

Розрахунок економічної ефективності виконували за загально відносною, використовуючи залежність

$$E = \left[(Z_1 + Z_{c1}) \cdot \left(\frac{P_1 + E_H}{P_2 + E_H} \right) + E_e - (Z_2 + Z_{c2}) \right] \cdot A_2, \quad (4.14)$$

де Z_1 і Z_2 – приведені витрати на виготовлення матеріалів з урахуванням вартості транспортування по базовій і новій технології; Z_{c1} і Z_{c2} – приведені витрати на виконання робіт на об’єкті по базовій і новій технології; $(P_1 + E_H)/(P_2 + E_H)$ – коефіцієнт, що враховує термін служби нової будівельної конструкції в порівнянні з базовим варіантом; E_e – економія в сфері експлуатації нових

будівельних конструкцій за весь період їхньої служби в порівнянні з базовими конструкціями; A_2 – обсяг будівельних робіт, E_n – нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень; P – коефіцієнт реновації визначається за формулою

$$P = \frac{E_n}{(1+E)^N - 1}, \quad (4.15)$$

де N – термін служби об'єкту при застосуванні технічних рішень

Для проведення по фактору часу використовується формула

$$a_N = (1 + E_N)^N \quad (4.16)$$

де a_n – коефіцієнт приведення;

N – період часу приведення в роках, т.е. число років, відокремлюючи затрати і результати данного року від начала розрахункового року.

Визначали значення E при різних співвідношеннях витрат на реалізацію технології ($Z_T = Z + Z_C$) базової Z_{IT} і нової Z_{2T} технології, а також при різному співвідношенні термінів служби дорожнього одягу по базовій N_1 і новій N_2 технології ремонту тріщин.

Приведені затрати Z_T визначаються за формулою:

$$Z_T = Z_{TO} a_i,$$

де Z_{TO} – одночасні витрати в i -тому році

Після проведення аналізу було отримано значення зміни показника коефіцієнта економічної ефективності K_e , від функції відносного терміну служби дорожнього одягу N_2/N_1 , при різних відносних значеннях витратах Z_{2T}/Z_{IT} (табл. 4.2)

Таблиця 4.2 – Зміна показника коефіцієнта економічної ефективності в залежності від відносного терміну служби N_2/N_1 дорожнього одягу при різному значенні витрат Z_{2T}/Z_{1T}

Z_{2T}/Z_{1T}	Коефіцієнт економічної ефективності при значеннях N_2/N_1			
	1	1.5	2	2.5
0,5	0,07	0,16	0,21	0,26
1,0	0	0,1	0,17	0,21
1,5	-0,12	0,05	0,11	0,17
2,0	-0,21	0,03	0,07	0,11

Отримані результати свідчать, що економічна ефективність підвищується зі збільшенням показника відносного строку служби N_2/N_1 і тим у більшій мірі, чим менші відносні витрати Z_{2T}/Z_{1T} . При цьому темп росту показника ефективності K_e трохи зменшується при збільшенні терміну служби.

Приклад визначення економічної ефективності застосування герметизації температурних поперечних тріщин

Розглядали 3 сценарії технології герметизації тріщин:

I – тріщини і ямковий ремонт виконують відразу після утворення дефектів згідно чинних нормативних документів (термін служби конструкції дорожнього одягу з урахуванням всіх критеріїв граничного стану становить нормативне значення 10 років).

II – тріщини та ямковий ремонт виконують із незначним запізненням (термін служби конструкції дорожнього одягу з урахуванням міри вичерпування довговічності за критерієм граничного стану міцності на зсув ґрунту земляного полотна становить 8 років).

III – тріщини та ямковий ремонт виконують із значним запізненням (термін служби конструкції дорожнього одягу з урахуванням міри вичерпування довговічності за критерієм граничного стану міцності на зсув ґрунту земляного полотна становить 6 років).

Вихідні дані для розрахунку економічної ефективності герметизації поперечних температурних тріщин на 1 км автомобільної дороги з асфальтобетонним покриттям III категорії з шириною проїзної частини 7 м

Склад робіт з герметизації тріщин мастикою: Встановлення тимчасових знаків та огорожень. Видалення старої мастики та старих ущільнювальних шнурів механізовано. Розкриття (обробка) тріщин фрезою. Прочищення тріщин, швів щіткою. Обезпилення розкритих тріщин стислим повітрям. Очищення та промивка тріщин та швів водою під високим тиском. Просушування та прогрів кромки тріщин або швів. Підґрунтування тріщин та швів праймером. Розпакування та завантаження мастики у котел машини плавильно-заливальної. Розігрівання мастики. Закладання шнура. Заповнення тріщин та швів мастикою за допомогою машини плавильно-заливальної. Присипання заповнених тріщин цементом або відсівом (піском). Зняття тимчасових дорожніх знаків та огорожень.

Ремонт тріщин і швів заливанням мастикою передбачено за допомогою машини плавильно-заливальної Crafco Super Shot 125 DCRC при ремонті тріщин в асфальтобетонному покритті.

Склад робіт з ямковий ремонт асфальтобетонного покриття: Встановлення тимчасових знаків та огорожень. Розмічання місць ремонту. Розламування покриття. Відкидання обрублених кусків в сторону на відстань до 3 м. підгорткування вирубаних кусків (або знімання асфальтобетонних покриттів доріг за допомогою машин для холодного фрезерування асфальтобетонних покриттів окремими місцями). Очищення вибоїн від бруду, пилу та решток асфальтобетону стисненим повітрям за допомогою компресора. Розливання в'язучих матеріалів. Укладання асфальтобетонної суміші.

Таблиця 4.3 – Витрата мастики та вартість робіт в залежності від розміру шва

№ п/п	Розмір шва (ширина х глибина), мм	Витрати мастики на 100 п.м., г		Вартість робіт на 100 м.п. (грн.)
		При густині мастики 1,1 г/см ³	При густині мастики 1,15 г/см ³	
1.	12x24	28,51	29,81	5 006,0
2.	20x30	59,4	62,1	6 212,0
3.	20x35	69,3	72,45	6 599,0
4.	20x40	79,2	82,8	6 985,0
5.	20x45	89,1	93,15	7 372,0
6.	25x30	74,25	77,63	6 792,0
7.	25x35	86,63	90,56	7 276,0
8.	25x40	99	103,5	7 758,0
9.	30x35	103,95	108,68	7 951,0
10.	30x40	118,8	124,2	8 531,0
11.	35x40	138,6	144,9	9 304,0
12.	40x50	198	207	11 622,0

Таблиця 4.4 – Вартість укладання 100 м² асфальтобетонного покриття (зрізання асфальтобетонного покриття передбачено механізованим способом)

Товщина зрізання та укладання а/б покриття	Марка асфальту Б-10
4 см	40 031,52
5 см	50 739,55
6 см	59 273,20
7 см	67 807,14

Результати розрахунку економічної ефективності

Таблиця 4.5 – Затрати на дрібний ремонт 1 км покриття за сценарієм І

Т _{сл} , роки	З _{2ГО} , грн..	α _N	З _{2Г} , грн.
1			
2	10 237	2,48	25 346
3	10 237	2,21	22 631
4	35 042	1,97	69 167
5	35 042	1,76	61 756
6	35 042	1,57	55 139

Кінець таблиці 4.5

Тсл, роки	32ТО, грн..	α_N	32Т, грн.
7	35 042	1,40	49 231
8	49 053	1,25	61 532
9	49 053	1,12	54 939
10	49 043	1,00	49 043
Сума			423 439

Таблиця 4.6 – Затрати на дрібний ремонт 1 км покриття за сценарієм II

Т _{сл} , роки	Z_{2TO} , грн..	α_N	Z_{2T} , грн..
1	-		
2	-		
3	24 248	1,76	42 733
4	24 248	1,57	38 155
5	49 053	1,40	68 916
6	49 053	1,25	61 532
7	82 926	1,12	92 877
8	82 926	1,00	82 926
Сума			387 139

Таблиця 4.7 – Затрати на дрібний ремонт 1 км покриття за сценарієм III

Т _{сл} , роки	Z_{2TO} , грн..	α_N	Z_{2T} , грн..
1			-
2			-
3	14 011	1,40	19 684
4	14 011	1,25	17 575
5	88 900	1,12	99 568
6	88 900	1,00	88 900
Сума			225 728

На основі формули 4.14 застосування сценарію I порівнюючи з сценарієм II економічний ефект становить 95581 грн/км.

На основі формули 4.14 застосування сценарію I порівнюючи з сценарієм III економічний ефект становить 66445 грн/км.

4.7 Короткі висновки

1. Розроблено заходи для практичного застосування результатів дослідження, в тому числі: рекомендації з комплексного підвищення міцності дорожнього одягу з асфальтобетонним покриттям, що мають поперечні тріщини, залежно від категорії дороги і характеру руйнувань; методику оцінювання характеру розтріскування асфальтобетонного покриття та обґрунтування вибору технології і механізмів для відновлення несної здатності конструкції дорожнього одягу; заходи із відновлення монолітності асфальтобетонного покриття нежорсткого дорожнього одягу після утворення температурних тріщин.

2. Розроблено загальні положення методики розрахунку нежорсткого дорожнього одягу з асфальтобетонним покриттям, що має поперечні температурні тріщини.

3. Запропоновано вдосконалення технології армування асфальтобетонного покриття з поперечними температурними тріщинами при застосуванні самоклеючих армуючих синтетичних матеріалів та ремонту асфальтобетонних покриття в зоні каналізаційних люків.

4. Виконано оцінювання економічної ефективності герметизації тріщин. Отримані дані про економічний ефект герметизації поперечних тріщин для різних сценаріїв ремонту.

Основні результати досліджень четвертого розділу висвітлено в роботах автора: [47 – 50, 63, 66, 109 – 115].

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена важлива науково-прикладна задача, що полягає у підвищенні довговічності нежорсткого дорожнього одягу з поперечними температурними тріщинами в асфальтобетонному покритті.

Основні результати полягають у наступному:

1. Виконано аналіз існуючого стану питання забезпечення довговічності дорожнього одягу з асфальтобетонним покриттям, що має поперечні температурні тріщини. Встановлено, що у багатьох підходах використовувались розв'язки теорії пружності, що не дозволяє відображати реальну поведінку дорожньо-будівельних матеріалів. В останні роки існуючі дослідження оцінювання впливу поперечних тріщин на довговічність дорожнього одягу широко застосовують методи скінченних елементів для прогнозування термонапруженого стану дорожнього одягу, урахувуючи також термо-в'язко-пружну поведінку матеріалів. На практиці існуючі методи забезпечення довговічності дорожнього одягу з поперечними тріщинами в асфальтобетонному покритті, головним чином, ґрунтуються на застосуванні армуючих матеріалів, герметизації покриття за рахунок зароблення тріщин герметиками, а також при влаштуванні захисних шарів з литих емульсійно-мінеральних сумішей або поверхневої обробки. Однак це питання не достатньо вивчене з урахуванням комплексного впливу факторів та термо-реологічних властивостей матеріалів.

2. На основі застосованих теоретичних аспектів дослідження, розроблено метод оцінювання впливу поперечних температурних тріщин в асфальтобетонному покритті на довговічність дорожнього одягу від комплексного впливу чинників з урахуванням термо-реологічних властивостей асфальтобетону. Цей метод полягає у використанні показника міри вичерпування довговічності протягом усього строку експлуатації за критерієм граничного стану для ґрунтової основи і шарів з незв'язних та малозв'язних матеріалів – за опором зсуву.

3. Удосконалено метод розрахунку нежорсткого дорожнього одягу з поперечними тріщинами в асфальтобетонному покритті. Удосконалення методу розрахунку нежорсткого дорожнього одягу полягає у врахуванні зменшення розподільчої здатності покриття у зоні тріщин та несної здатності ґрунту земляного полотна і шарів з незв'язних та малозв'язних матеріалів через їх перезволоження, внаслідок потрапляння інфільтраційної вологи.

4. Удосконалено метод оцінювання ефективності герметизуючих матеріалів при ремонті асфальтобетонного покриття з поперечними тріщинами, що полягає у визначенні горизонтальних температурних напружень, які спричиняють розрив когезійних зв'язків герметика та/або адгезійних зв'язків герметика з покриттям.

5. Виконані експериментальні дослідження впливу факторів на підвищення довговічності дорожнього одягу з поперечними тріщинами в асфальтобетонному покритті дозволили узагальнити характер і види температурних тріщин та розробити їх класифікацію, що враховує такі ознаки: ширину розкриття; характер звивистості; момент утворення; місце утворення; довжину; причини утворення. Визначені розрахункові термомеханічні характеристик асфальтобетону та герметиків. За допомогою числового аналізу при використанні методу скінченних елементів було досліджено вплив укріплення основи під поперечною тріщиною на напружено-деформований стан дорожнього одягу. Числові розрахунки показали, що включення плит з більш високими значеннями модуля пружності і граничними напруженнями в зоні концентрації напружень дорожнього покриття дозволяє локально зміцнити шарову конструкцію і збільшити загальну несну здатність системи.

6. Розроблено заходи для практичного застосування результатів дослідження, в тому числі: рекомендації з комплексного підвищення міцності дорожнього одягу з асфальтобетонним покриттям, що мають поперечні тріщини, залежно від категорії дороги і характеру руйнувань; методику оцінювання характеру розтріскування асфальтобетонного покриття та обґрунтування вибору технології і механізмів для відновлення несної здатності конструкції дорожнього

одягу; заходи із відновлення монолітності асфальтобетонного покриття нежорсткого дорожнього одягу після утворення температурних тріщин. Герметизація тріщин в асфальтобетонному покритті дозволяє зменшити обсяги ямкового ремонту у 1,5–2,0 рази.

7. Застосування результатів досліджень було підтверджено відповідними довідками із таких організацій: ДП ДерждорНДІ, САД у Київській обл., САД у Харківській обл., BUCHER, CoST, CrafcO, StraVmayr. Результати досліджень знайшли своє впровадження в навчальному процесі НТУ на факультеті транспортного будівництва при читанні лекцій, проведенні практичних занять, виробничих практик та написанні дипломних проектів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Батраков О.Т., Головкин В.А., Фоменко Г.Р. Исследование влияния вязкости битума на прочность растяжения при изгибе мелкозернистых асфальтобетонов. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво, 1977. Вып.21. С. 49-53.
2. Батракова А.Г. Розрахунки асфальтобетонних шарів нежорстких дорожніх одягів з врахуванням термопластичних властивостей асфальтобетонів / Батракова А.Г. Ряпухін В.М., Нечитайло Н.О. : монографія. Х.: ХНАДУ. 2012. 132 с.
3. Бахрах Г.С. Об оценке выносливости дорожных асфальтобетонных покрытий. - В кн.: Повышение эксплуатационной надежности автомобильных дорог. Труды Гипродорнии, М., 1980, вып.30, С. 57-65.
4. Бируля А.К., Михович С.И. Работоспособность дорожных одежд. М.: Транспорт, 1968. 172 с.
5. Богуславский А.М. Оценка сдвигоустойчивости и трещиностойкости асфальтобетонных покрытий. Автомобильные дороги, 1973, №9, С. 6-8.
6. А. К. Бируля, Эксплуатация автомобильных дорог. М.: Транспорт, 1966. 326 с.
7. А. К. Бируля, С. И. Михович Работоспособность дорожных одежд. М.: Транспорт, 1968. 172 с.
8. S. Brown, N. Thom, P. Sanders A study of grid reinforced asphalt to combat reflection cracking. Association of Asphalt Technologists. 2001, p. 543-571.
<https://asphalttechnology.org/>.
9. Models for Predicting Reflection Cracking of Hot-Mix Asphalt Overlays. NCHRP Report, Issue 669, 2010, 70 p.
<https://trid.trb.org/Results?q=&serial=%22NCHRP%20Report%22>
10. Reflective Cracking in Pavements: Design and performance of overlay systems / Edited by L. Francken, E. Beuving, A.A.A. Molenaar. 1996. 576 p.

11. Братчун В. И., Беспалов В. Л., Пактер М. К., Мутташар Ахмед Талиб. Асфальтополимербетоны с комплексно-модифицированной микроструктурой Наука и техника в дорожной отрасли. 2013. №3. С. 35-41.
12. Веренько В.А. Деформации и разрушения дорожных покрытий причины и пути устранения. Минск. 2008. 304 с.
13. Ремонт и содержание автомобильных дорог: справочник инженера дорожника / [А.П. Васильев, В.И. Баловнев, М.Б. Корсунский и др.; Под ред. А.П. Васильева]. М.: Транспорт, 1989. 237 с.
14. Васильев А.П., Сиденко В.М. Эксплуатация автомобильных дорог и организация дорожного движения. М.: Транспорт, 1990. 304 с.
15. Гамеляк І.П. Вплив руйнувань на зміну міцності конструкції дорожнього одягу. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. 2001. № 62. С. 157-165.
16. Гамеляк І.П. Основи забезпечення надійності конструкцій дорожнього одягу: Дис. докт. техн. наук: 05.22.11 – К., 2005 – 370 с.
17. Гамеляк І.П., Волощук Д.В. Аналіз транспортно-експлуатаційних показників стану автомобільних доріг державного значення // Вісник Національного транспортного університету, 2014. – № 26 (1). – С. 52 – 57.
18. Гамеляк І.П., Даценко В.М. Забезпечення надійності конструкції дорожнього одягу за несною здатністю при капітальному ремонті та реконструкції // Автошляховик України, 2015. – № 5 (247). – С. 40 – 43.
19. Гезенцевей Л.Б., Казарновская Э.А. Релаксация напряжений в асфальтобетоне. - В сб.: Тр. Союздорнии. М., 1966, вып.7, с.54-59.
20. Гезенцевей Л.Б. Асфальтовый бетон / Гезенцевей Л.Б. – М.: Стройиздат, 1964. – 447 с.
21. Горелышев Н.В. Прогрессивные конструкции дорожных одежд с асфальтобетонным покрытием // Автомобильные дороги, 1971, №10, с.5-7.
22. Горелышев Н.В., Якунин О.А. Релаксация напряжений в асфальтобетоне. - В кн.: Вопросы расчета и констр. дор. одежд. М., 1979, с.156-172.

23. Гохман Л.М. Регулирование процессов структурообразования и свойств дорожных битумов добавками дивинил-стирольных термоэластопластов : Дис. канд. техн. наук.- М., 1974.- 224 с.

24. Гохман Л.М. Применение полимерно-битумных вяжущих в дорожном строительстве / Гохман Л.М.// Сб. «Применение полимерно-битумных вяжущих на основе блоксополимеров типа СБС». – 2001. – С. 5-60.

25. Губач Л.С., Пономарев С.Г. Об одной причине хрупкого разрушения дорожного асфальтобетона. - В кн.: Применение цементных и асфальтовых бетонов в Сибири. Омск, 1982, с.61-67.

26. Гуляев В.І., Гайдайчук В.В., Мозговий В.В., Заєць Ю.О., Шевчук Л.В. Дослідження термонапруженого стану конструкцій дорожнього одягу // Промислове будівництво та інженерні споруди, 2017, №1. – С. 6-12.

27. Дмитриченко М.Ф., Дмитрієв М.М., Гамеляк І.П., Якименко Я.М., Райковський В.Ф. // Надійність конструкцій дорожнього одягу: навч. Посіб. для студ. вищ. навч. закл., які навчаються за напрямом підготовки «Буд-во». К.: - НТУ, 2012. – 216 с.

28. Жданюк В.К., Густелєв О.О. On the issue of repair technique of asphalt pavements with through-the-thickness temperature cracks. (04.10.2006 – 06.10.2006). Warszawa : I Polski kongres dogowy, 2006. С. 485-490.

29. Жданюк В.К., Богомолов В.О., Богомолов С.В. Щодо критеріїв міцності для дорожніх одягів нежорсткого типу // Автошляховик України. – 2011. - № 5. – С. 29-33.

30. Жданюк В.К., Богомолов В.А., Богомолов С.В. Общее решение для линейной, трехмерной, вязкоупругой модели Максвелла // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета, 2011 – №53. С.70-72

31. Жданюк В.К., Богомолов В.А., Богомолов С.В., Разницын И.Л., Цинка А.А. Критерий долговечности асфальтобетонных слоев дорожных одежд // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета, 2017 – № 73. С. 74-79.

32. Золотарев В.А. Долговечность дорожных асфальтобетонов. Харьков: Издательство при ХГУ издательского объединения "Высшая школа", 1977. – 114 с.

33. Золотарев В.А. Закономерности деформирования и разрушения битумов и асфальтобетонов как основа улучшения и регулирования их свойств : Дис. докт.техн. наук.-Харьков, 1982.-575 с.

34. Золотарев В.А. Дорожные асфальтобетоны. Избранные труды. Том 3 // Санкт-Петербург: Славутич, 2015. – 184 с.

35. Золотарев В.О. Оценки долговечности асфальтобетона по статической устойчивости // Автошляховик України. 2015. № 4. С.30-34.

36. Качественная оценка влияния структурных и технологических факторов на уплотнение асфальтобетонных смесей / Золотарев В.А., Корюк В.П. // Вісник ХНАДУ. 2017. Вип.79. С.94-100.

37. Золотарьов В.О. Перший досвід оцінки сегрегації асфальтобетонних сумішей / Золотарьов В.О., Єфремов С.В., Корюк В.П. // Автошляховик України. 2017. № 4. С.21-28.

38. Золотарьов В.О. Аналіз вимог європейських стандартів до спеціальних дорожніх бітумів. Золотарьов В.О., Пиріг Я.І. // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. 2017. Вип.82. С.26-36.

39. Золотарев В.А.Пыриг Я.И. Применение метода выбора марки битумного вяжущего в соответствии в условиях Украины с системой Superpave. Вестник ХНАДУ, вып. 82, 2018, с.119-130.

40. Иванов Н.Н. Причины образования трещин в асфальтобетонных покрытиях. Тр. МАДИ, вып.15, 1953, с. 3-11.

41. Иванов Н.Н. Пути повышения качества асфальтобетонных покрытий. В кн.: Опыт строительства асфальтобетонных покрытий. Тр. МАДИ, вып.23, 1958, с. 15-19.

42. V Ilchenko, R Mishchenko, V Kozar, L Kozar. Operational quality control methods improvement for evenness of road pavement surface // Збірник наукових

праць. Серія: Галузеве машинобудування, будівництво, 2016. № 1 (46). С. 239-245.

43. Ilchenko V., Tymoshevskiy V., Mishchenko R., Lyashko D., Riznyk V. (2017). The prospects manufacture of recycled hot mix asphalt with fiber plastic reinforcement. Збірник наукових праць. Серія: Галузеве машинобудування, будівництво, 1(48), 258-264.

44. Ilchenko V., Lytvynenko T., Tkachenko I. (2018). Principles of Street and Urban Road Space Formation in Modern Cities. International Journal of Engineering & Technology, 7(3.2), 642-648

45. Ilchenko V., Tkachenko I., Kozar V., & Kozar L. (2019). Influence of Geodetic Works on the Road Pavement Evenness in the Highways Construction. International Journal of Engineering & Technology, 7(4.8), 339-343.

46. Іщенко О.М. Розробка методики розрахунку на температурну тріщиностійкість асфальтобетонного покриття штучних споруд автомобільних доріг: Дис. канд. техн. наук: 05.22.11 - К., 2003 – 136 с.

47. Кияшко И.В., Густелев А.А., Стороженко М.С. Влияние сквозных поперечных трещин на условия службы дорожных конструкций. // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво: наук.-техн. збірник. 2004. Вип. 71. С. 36-39.

48. Кияшко И.В., Густелев О.О., Стороженко М.С. Формування однорідної якості асфальтобетону в залежності від параметрів і режимів технологічного процесу // Дороги і мости. Збірник наукових статей. Київ. 2006. Вип. № 5. С. 305-311.

49. Кияшко И.В., Густелев А.А. Концепция совершенствования технологии ремонтов слоев дорожных одежд на основе органических вяжущих. Современные технологии и материалы в дорожном строительстве: материалы международной научно-практической конференции. Харьков: 2006. С. 68-70.

50. Кияшко И.В., Густелев А.А., Минаков О.С. Повышение трещиностойкости асфальтобетонных дорожных покрытий. Эффективные материалы, технологии, машины и оборудование для строительства и эксплуатации современных транспортных сооружений.: мат. междуна. наук.-

практ. конф. молодых ученых (03 – 04 декабря 2009 г.). Белгород, 2009. С. 144-149.

51. Кіяшко І.В. Обґрунтування критерію нормування поперечної рівності дорожнього покриття.// Дороги і мости: Збірник наукових праць. – К.: ДП «ДерждорНДІ», 2014. – Випуск 14. - С. 85-89.

52. Королев И.В., Золотарев В.А., Ступивцев В.А. Асфальтобетонные покрытия.- Донецк.: Донбасс, 1970.-161 с.

53. Королев И.В. Дорожный теплый асфальтовый бетон.- Киев: Высш. школа, 1975.-155 с.

54. Ладыгин Б.И., Вдовиченко С.Л., Куприянчик А.А. Расчет перспективного срока службы асфальтобетона по трещиностойкости с учетом его старения.-В сб. Автомобильный транспорт и дороги, Минск, Высш. школа, 1975, Вып.2,-с. 217-221.

55. Марчук А. В., Пискунов В. Г. Расчет слоистых конструкций полуаналитическим методом конечных элементов // Механика композитных материалов.– 1997.– 33, №6.– С.781–785.

56. Мерзликин А. Е., Гладков В. Ю., Гамеляк І. П. Армирование асфальтобетонных покрытий при строительстве и реконструкции дорожных одежд. Автомоб.дороги: Обзорн. информ. ЦБНТИ Минавтодора РСФСР. – М.: 1990. – Вык.5. – 45 с.

57. Мерзликин А.Е., Мозговой В.В., Баран С.А., Куцман А.М., Онищенко А.Н. О влиянии физико-механических процессов на долговечность асфальтобетонного покрытия // Науково-технічний збірник «Будівельні матеріали, вироби та сан. техніка» Київ, 2015. – Вип. 55. – С. 20 – 25.

58. Мерзликин А.Е. О влиянии основания из зернистых материалов на напряжения в асфальтобетонном покрытии // Дороги и мосты. – 2015. № 3, Т. 1. – С. 149-162.

59. Мерзликин А.Е., Капанадзе И.И., Мозговой В.В. Долговечность асфальтобетонных покрытий на участках с периодическим замедлением движения транспортных средств. Вестник Кыргызского государственного

университета строительства, транспорта и архитектуры им. Н.Исанова № 1(51). – Бишкек, 2016. – С. 113-117.

60. Мозговой В.В. Научные основы обеспечения температурной трещиностойкости асфальтобетонных покрытий: Дис. ... докт. техн. наук: 05.22.11 – К., 1996.– 406 с.

61. Мозговий В.В., Густелєв О.О., Гайдайчук В.В., Заєць Ю.О., Шевчук Л.В., Куцман О.М. Механічні ефекти і парадокси явищ термопружного напруження в конструкціях дорожніх одягів // Дороги і мости: збірник наукових праць. 2018. Вип. № 18. С. 128-145.

62. Гуляєв В.І., Мозговий В.В., Гайдачук В.В., Густелєв О.О., Заєць Ю.О., Шевчук Л.В., Шлюнь Н.В. Термопружний стан багатошарових дорожніх покриттів // Монографія – К. : НТУ, 2018. – 252 с.

63. Мозговой В.В., Густелев А.А., Шевчук Л.В. Анализ механизма подкрепления армирующей сеткой многослойного покрытия // Вестник КаздорНИИ: научно-практ. журнал. 2019. №1-2 (61-62). С. 141-148.

64. Мозговий В.В., Густелєв О.О., Гайдайчук В.В., Шевчук Л.В. Аналіз деформування дорожнього покриття на металевій плиті Південного моста // Промислове будівництво та інженерні споруди: наук.-виробн. журнал. 2019. № 1. С. 31-38.

65. Мозговий В.В., Густелєв О.О., Гуляєв В.І., Шлюнь Н.В., Куцман О.М., Баран С.А. Дослідження напружено-деформованого стану дорожнього одягу з укріпленою основою під поперечними тріщинами і швами // Вісник НТУ. Серія «Технічні науки»: наук.-техн. збірник. 2019. Вип. № 1 (43). С. 26-38.

66. Густелев А.А., Мозговой В.В., Шевчук Л.В. Анализ механизма подкрепления армирующей сеткой многослойного покрытия // Вестник КаздорНИИ: научно-практ. журнал. 2019. №1-2 (61-62). С. 141-148.

67. Мозговой В.В., Густелев А.А., Гайдайчук В.В., Шевчук Л.В., Шлюнь Н.В. Термонапряженное состояние дорожных покрытий. Сучасні методи і проблемно-орієнтовані комплекси розрахунку конструкцій і їх застосування у

проектуванні і навчальному процесі: III міжн. наук.-практ. конф. (24 – 25 вересня 2019 р., м. Київ). Київ, 2019.

68. Никольский Ю.Е., Писклин В.М., Шестаков В.Н. Обоснование минимальной толщины асфальтобетонных покрытий из условия обеспечения низкотемпературной трещиностойкости.-В кн.: Труды Союздорнии, М., 1978, вып. 108, с. 54-68.

69. Онищенко А.М. Теоретичні основи розрахунку асфальтобетонного покриття на автодорожніх мостах та методи підвищення колієстійкості: Дис. докт. техн. наук: 05.22.11 – К., 2017.– 434 с.

70. Павлюк Д.О. Основи та застосування теорії зчіпних якостей дорожніх покриттів: Дис. ... докт. техн. наук: 05.22.11 – К., 1996.– 475 с.

71. Павлюк Д. О. Щодо нормування показників приживлення щебеню поверхневих обробок дорожнього покриття / Д. О. Павлюк, В. В. Павлюк, В. М. Даценко, С. В. Кіщинський, Т. М. Протопопова, М. В. Шурьяков, І. С. Шуляк, Б. В. Клітченко // Автошляховик України. - 2013. - № 6. - С. 34-39.

72. Павлюк Д. О. Дослідження приживлення тонких шарів зносу до дорожніх покриттів / Д. О. Павлюк, В. М. Глуховець // Вісник Національного транспортного університету. - 2010. - № 21(1). - С. 69-73.

73. Печеный Б.Г., Железко Е.П. О влиянии качества на деформативность асфальтобетона при изгибе.-В кн.: Повышение качества асфальтобетона. Труды Союздорнии, вып. 79, 1975, с. 163-169.

74. Печеный Б.Г., Железко Е.П., Губач Л.С. Принцип температурно-временной суперпозиции (наложения) в исследованиях асфальтобетонов.-Труды Башни НП, 1976, вып.15, с. 67-74.

75. Печеный Б.Г. Долговечность битумных и битумо-минеральных покрытий.-М.: Стройиздат, 1981.-123 с.

76. Радовский Б.С. Теоретические основы конструирования и расчета нежестких дорожных одежд на воздействие подвижных нагрузок.-Дис. докт. техн. наук.-Киев, 1983.- 552 с.

77. Радовский Б.С. Проблемы механики дорожно-строительных материалов и дорожных одежд. – К.: ООО «ПолиграфКонсалтинг», 2003. – 240 с.
78. Радовский Б.С. Проблема повышения долговечности дорожных одежд и методы ее решения в США // Дорожная техника – 2006. – С. 108-118.
79. Радовский Б.С. Проектирование состава асфальтобетонных смесей в США по методу Суперпейв // Дорожная техника. – 2007. – С. 28-41.
80. Радовский Б.С. Современное состояние разработки американского метода проектирования асфальтобетонных смесей Суперпейв. // Дорожная техника. – 2008. – С. 12-22.
81. Радовский Б.С. Конструирование и расчет дорожных одежд в первой половине XX века. Часть II // Дорожная техника – 2017. – С. 26-45.
82. B Teltayev, B Radovskiy Predicting thermal cracking of asphalt pavements from bitumen and mix properties, – Road Materials and Pavement Design, – 2017, – p. 1-16. <https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1350598>
83. Руденский А.В., Руденская И.М. Реологические свойства битумоминеральных материалов.-М.: Высшая школа, 1971.-131 с.
84. Руденский А.В. Дорожные асфальтобетонные покрытия / Руденский А.В. – М.: Транспорт, 1992. – 253 с.
85. Савенко В.Я., Каськів В.І. Вплив опадів на розподіл вологості ґрунтів верхньої частини земляного полотна // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. - 1997. - Вип.54. - С.10-16.
86. Савенко В.Я., Петрович В. В., Каськів В. И., Усиченко Е. Ю. Синтетические материалы – перспектива использования в дорожных конструкциях/Автомоб. дороги и дор. ст-во, – 1999. – Вип. 57. – С. 143-153.
87. Савенко В.Я., Василевич О.В. Застосування методу єдиного пакету шарів при розрахунку дорожніх одягів // Автомобільні дороги та дорожнє будівництво. – 2001.- № 63. –С. 229-233.
88. Салль А.О. Сопротивление асфальтобетонного покрытия изгибу при движении автомобильного транспорта.: Автореф. дис. канд. техн. наук. - Л., 1968. - 28 с.

89. Сіденко В.М., Фомін В.О. Водно-тепловий режим міських доріг: теорія і розрахунки : монографія. Харків : Вид-во Харківськ. ун-ту, 1971. 180 с.
90. Сиденко В.М., Михович С.И. Эксплуатация автомобильных дорог. – М.: Транспорт, 1976. – 288 с.
91. Сюньи Г.К. Дорожный асфальтовый бетон. - Киев, Госиздат литературы по строительству и архитектуре УССР, 1962. - 235 с.
92. Сюньи Г.К. Исследование трещинообразования в асфальтобетонных покрытиях под влиянием температурных напряжений. - Дис. канд. техн. наук. - Харьков, 1940. - 128 с.
93. Сюньи Г.К. Предупреждение деформаций асфальтобетонных покрытий. - Автостроитель Украины, 1980, №4, с. 27-28.
94. B.B. Teltayev, Evaluation of low temperature cracking indicators of hot mix asphalt pavement, Int. J. Pavement Res. Tech. № 5. 2014. – С.343–351
95. Телтаев Б.Б. Закономерность увеличения количества температурных трещин на асфальтобетонном покрытии автомобильной дороги // Доклады Национальной академии наук республики Казахстан. – 2015. №303, Т. 5. – С. 35-57.
96. Телтаев Б.Б. Дорожное асфальтобетонное покрытие как диссипативная структура // Доклады Национальной академии наук республики Казахстан. – 2016. №306, Т. 2. – С. 11-37.
97. B.B. Teltayev, E.D. Amirbayev , B.S. Radovskiy. Viscoelastic characteristics of blown bitumen at low temperatures. Construction and Building Materials №189, 2018. – С. 54–61. journal homepage: www.elsevier.com/locate/conbuildmat.
98. Eisenmann J, Hilmer A.. Influence of Wheel Load and Inflation Pressure on the Rutting Effect at Asphalt-Pavements - Experiments and Theoretical Investigations, Proceedings // Sixth International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements. – 1987. – Vol. I. – p. 392-403.
99. Francken L., Clauwaert C. Characterization and structural assessment of bound materials for flexible road structures // Proceedings of the 6th International Conference on Asphalt Pavements. Ann Arbor, Michigan, 1987. P. 130-144.

100. Judycki J. A new viscoelastic method of calculation of low-temperature thermal stresses in asphalt layers of pavements. *International Journal of Pavement Engineering*, № 19/1, 2018, s. 24-36.

101. Monismith C.L. Westrack: Performance models for permanent deformation and fatigue / Monismith C.L., Deacon J.A., Harvey J. T. – Reno: Pavement Research Center, 2000. – 217 p.

102. Sybilski D. Comparision of properties of bitumens mixtures with bitumens and elastomere-bitumens / Sybilski D., Hordecka R. // *Prace Instytutu Badawczego Drog i Mostov*. – Warszawa. – 1997. – № 3-4. – Str. 125-148.

103. Witczak M. W. Development of the 2002 guide for the design of new and rehabilitated pavements-flexible pavements overview. Hot topics, 2001 (<http://www.2002designguide.com&>).

104. Поліщук В.П., Семенченко О.В. Існуючі проблеми щодо забезпечення безпеки дорожнього руху на автомобільних дорогах України // *Управління проектами, системний аналіз і логістика*. Технічна серія, 2013. – № 11. – С. 85-91.

105. Поліщук В.П., Лановий О.Т., Єресов В.І., Куницька О.М. Аналіз функціонування соціальної та нормативно-правової підсистем у системі «Учасники дорожнього руху-Транспортні потоки-Дорожні умови-дорожньо-транспортне середовище» // *International Scientific and Practical Conference World science*, 2017. – № 1 (8). – С. 59-65.

106. В.П. Поліщук, О.Т. Лановий, Т.В. Бондар. Визначення рівнів безпеки руху на автомобільних дорогах загального користування *Вісник Національного транспортного університету: зб. наук. праць*.–В, 104-107

107. Густєлев О.О., Гайдачук В.В., Радкевич А.В., Шевчук Л.В., Шлюнь Н.В. Термонапружене деформування шаруватого покриття на вгнутій ділянці дороги // *Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-техн. збірник*. 2019. Вип. № 102. С. 180-190.

108. Gustieliev O. Sealing materials effectiveness evaluation in the repair of bituminous-concrete surface with transversal cracks / *Збірник наукових праць*. Серія:

Галузеве машинобудування, будівництво (Academic journal. Series: Industrial Machine Building, Civil Engineering). 2018. №1-(52). 166-169.

109. Густелєв О.О., Осипов В.О. До питання вибору матеріалів для влаштування горизонтальної дорожньої розмітки на окремих ділянках вулично-дорожньої мережі // Нові технології в будівництві: наук.-техн. журнал. 2018. Вип. № 34. С. 47-49.

110. Густелєв А.А., Титарь В.С., Мартымянов С.В. Основные причины трещинообразования на асфальтобетонных покрытиях и пути их устранения. Научные исследования наносистемы и ресурсосберегающие технологии в стройиндустрии : мат. XVIII междун. наук.-практ. конф. (18.09.2007 – 19.09.2007 р.). Белгород, 2007. С. 144-149.

111. Густелєв О.О., Осипов В.О. Вивчення впливу підвищених пішохідних переходів на курсову стійкість автомобілів. Новітні технології в автомобілебудуванні, транспорті і при підготовці фахівців : наук. праці міжн. наук.-практ. та наук.-метод. конф., присв. 85-річчю кафедри автомобілів з Дня народж. проф. А. Б. Гредескула (20 – 21 жовтня 2016 р., м. Харків). Харків, 2016. С.76.

112. Густелєв О.О., Осипов В.О. Щодо впливу штучних нерівностей покриття автодоріг на курсову стійкість автомобілів. Створення, експлуатація і ремонт автомобільного транспорту та будівельної техніки : мат. всеукр. наук.-техн. конф. (26 – 27 квітня 2017 р., м. Полтава). Полтава, 2017.

113. Густелєв О.О., Осипов В.О. Огляд інженерних рішень, які спроможні мінімізувати аварійність за участю автомобільного транспорту. Автомобільний транспорт і автомобілебудування. Новітні технології і методи підготовки фахівців. (19 – 20 жовтня 2017 р., м. Харків). Харків, 2017. С. 81-82.

114. Патент України на корисну модель № 113145 Україна, МПК (2017.01), E01F9/00. Спосіб влаштування горизонтальної дорожньої розмітки на проїзdnій частині доріг та вулиць / Густелєв О.О. Дата реєстрації 10.01.2017 р.

115. Патент України на корисну модель № 118040 Україна, МПК (2017.07), E01C23/14. Спосіб плавлення снігу на стаціонарному снігоплавильному пункті

за допомогою умовно теплих господарсько-побутових вод/ Густелєв О.О. Дата реєстрації 25.07.2017 р.

116. Матеріали для герметизації швів і тріщин в покриттях дорожнього одягу автомобільних доріг. Загальні технічні вимоги: ДСТУ Б В.2.7-136: 2016. – [Чинний від 2017-01-01]. – К.: Державний стандарт України, 2016. – 15 с. – (Національний стандарт України).

117. Гнатенко Р.Г., Циркунова К.В., Жданюк В.К. Бітумно-полімерні мастики високої холодостійкості та теплостійкості для герметизації тріщин в асфальтобетонних покриттях дорожніх одягів // Автошляховик України, № 1 – 2. – 2015. – С.66-70.

118. Краюшкіна К.В., Химерик Т.Ю. Сучасні технології дрібного ремонту асфальтобетонних покриттів // Проблема розвитку міського середовища. Вип.3 (19). – 2017. – С.91-103.

119. Краюшкіна К.В., Химерик Т.Ю., Скрипченко О.В. Розрахунок армування нежорстких дорожніх конструкцій // Збірник наукових праць. Серія: Галузеве машинобудування, будівництво. – 2 (47). - 2016.

120. ГБН В.2.3-37641918-559:2019. Автомобільні дороги. Дорожній одяг нежорсткий. Проектування.

121. ДСТУ Б В.2.7-116-2002 (ГОСТ 30740-2000) Будівельні матеріали. Матеріали герметизуючи для швів аеродромних покриттів. Загальні технічні умови.

122. Мозговий В.В., Онищенко А.М., Гаркуша М.В., Лещук О.М., Возний С.П. Розробка рекомендацій з герметизації тріщин в конструкції жорсткого дорожнього одягу на прикладі проїзної частини вул. набережно-рибальської в місті Києві // Збірник «Дороги і мости», вип. 15, – 2015 – С.45-54.

123. Р В.2.3-218-21476215-687:2007 Рекомендації з застосування ефективних матеріалів для герметизації тріщин і швів дорожнього покриття.

124. Р В.3.2-218-03470778-477:2005 Рекомендації по ремонту тріщинуватих дорожніх покриттів з цементобетонним і асфальтобетонним покриттям з використанням мембранної технології.

125. Технічні правила ремонту і утримання вулиць та доріг населених пунктів. Київ – 2012 с. 76.

126. Порядок проведення ремонту та утримання об'єктів благоустрою населених пунктів. Київ – 2007 с. 36.

127. Р В.2.3-218-21476215-734:2008 Рекомендації з застосування армуючих синтетичних матеріалів різного типу для армування асфальтобетонних шарів при проектуванні конструкцій підсилення дорожнього одягу

128. Р В.3.2-218-03450778-779:2010 Рекомендації з армування асфальтобетонних шарів покриттів металевими сітками

129. ГБН В.2.3-37641918-544:2014 Застосування геосинтетичних матеріалів у дорожніх конструкціях.основні вимоги

130. Вплив параметрів технології армування асфальтобетону армуючими сітками на його механічні властивості. В.В. Мозговий, д.т.н., зав. каф., НТУ, О.М.Іщенко, пошукач, НТУ, О.М. Бесараб, інженер, НТУ, О.В. Прудкий, інженер, НТУ

131. Смолянець В.В., Бесараб О.М., Бондар М.М., Куценко А.Г. Вплив армування асфальтобетону сітками на його розрахункові характеристики // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – 2012. – Вип. № 48. – С. 78-83

132. Армирующие геосетки для асфальта. GlasGrid® GG. Руководство по укладке SAINT-GOBAIN ADFORS - 2018. – 6 с.

133. Stress Relief Asphalt Layer and Reinforcing Polyester Grid as Anti-reflective Cracking Composite Interlayer System in Pavement Rehabilitation. A. Scarpas et al. (Eds.), 7th RILEM International Conference on Cracking in Pavements,. © RILEM 2012 - pp. 1189–1197.

134. The behavior of grids and nets in asphalt pavement. Civil Engineering 55/1 (2011) - 53–62.

135. Островерхий О.Г. Проектування тонкошарових емульсійно-мінеральних покриттів дорожніх одягів // Автореф. Дис. ... д.т.н. – К.:НТУ, 2002. – 21 с.

136. Нагорна Н. П. Литі органомінеральні суміші для ремонту покриттів нежорстких дорожніх одягів автомобільних доріг / Н. П. Нагорна // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. - 2013. - Вип. 4. - С. 151-158. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vdnaba_2013_4_25

137. ВБН В.2.3-218-175-2002. Влаштування тонкошарових покриттів з литих емульсійно-мінеральних та холодних асфальтобетонних сумішей

138. ВБН В.2.3-218-178-2004. Влаштування поверхневих обробок покриття автомобільних доріг на основі бітумних емульсій

139. WSDOT Maintenance Manual M 51-01.06:2017. Pavement Patching and Repair. Chapter 3. Page 3-29.

140. Services available with interstate sealant & concrete. Asphalt crack sealing and repair. – 2019 Copyright Beyond Custom Websites. <https://www.interstatesealant.com/services/>.

141. Бесараб О.М. Підвищення тріщиностійкості асфальтобетонних шарів з врахуванням часу дії навантаження: Дис. канд. техн. наук: 05.22.11 - К., 2003 – 142 с.

142. Смолянець В.В. Удосконалення проектування асфальтобетонного покриття нежорсткого дорожнього одягу в умовах міст: Дис. канд. техн. наук: 05.22.11 - К., 2005 – 108 с.

143. Жуков О.О. Проектування асфальтобетонних шарів зносу для міських вулиць і доріг: Дис. канд. техн. наук: 05.22.11 - К., 2011 – 177 с.

144. Ладижинський І.С. Підвищення температурної тріщиностійкості асфальтобетонних шарів за рахунок використання синтетичних сіток: Дис. канд. техн. наук: 05.22.11 - К., 2005 – 109 с.

145. СОУ 45.2-00018112-076:2012 Асфальтобетонні шари з армуючими прошарками. Метод визначення розрахункових характеристик.

146. СОУ 45.2-00018112-020:2009 Будівельні матеріали. Асфальтобетон дорожній. Метод випробування на стійкість до накопичення залишкових деформацій.

147. СОУ 45.2-00018112-058:2010 Монолітні дорожньо-будівельні матеріали Метод випробування на втому.

148. СОУ 45.2-00018112-059:2010 Дорожньо-будівельні матеріали. Методи визначення розрахункових модулів пружності.

149. СОУ 45.2-00018112-046:2009 Асфальтобетон дорожній. Методика оцінки зчеплення між асфальтобетонними шарами при зсуві.

150. СОУ 42.1-37641918-099:2013. Розрахунковий опір розтягу при згині монолітних дорожньо-будівельних матеріалів. Метод визначення.

151. СОУ 42.1-37641918-100:2013 Бітуми дорожні модифіковані з використанням лабораторної лопатевої мішалки. Методи контролю процесу модифікації.

152. СОУ 42.1-37641918-107:2013 Синтетичні матеріали для армування асфальтобетонного покриття. Оцінка довговічності при циклічному навантаженні.

153. EN 124-1994 Люки стічних і оглядових колодязів для автомобільних і пішохідних районів. Вимоги до конструкції, випробування, маркування, контроль якості.

154. ДСТУ Б В.2.5-26:2005 Інженерне обладнання будинків і споруд. Зовнішні мережі та споруди. Люки оглядових колодязів і дощоприймачі зливостічних колодязів. Технічні умови.

155. СОУ 42.1-37641918-119:2014 Суміші литі емульсійно-мінеральні. Технічні умови.

ДОДАТОК А
МЕТОДОЛОГІЯ ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО
СТАНУ КОНСТРУКЦІЇ ДОРОЖНЬОГО ОДЯГУ З
АСФАЛЬТОБЕТОННИМ ПОКРИТТЯМ, ЩО МАЄ ПОПЕРЕЧНІ
ТРИЩИНИ

А.1 Методика скінченно елементних досліджень

При дослідженні комплексного впливу зміни температури і транспортних навантажень на напружено-деформований стан конструкції дорожнього одягу з асфальтобетонним покриттям, що має поперечні тріщини, використовували методологію, розроблену під керівництвом В.І. Гуляєва, що базується на методі скінченних елементів. Для розв'язання задачі за допомогою площин $x = const$, $y = const$, $z = const$ виділяється із загального неоднорідного шаруватого масиву конструкції дорожнього одягу прямокутний паралелепіпед і, задаючи відповідні граничні умови на відповідних граничних площинах, розв'язуються відповідні рівняння теорії пружності числовим методом.

При побудові цих рівнянь враховувалося, що швидкості поширення хвиль пружних деформацій в масиві, що розглядається (складові сотні метрів в секунду), набагато перевищують швидкості руху автомобілів. Тому, навантаження від сил тяжіння рухомого транспортного засобу можна вважати квазістатичним і задачу формулювати в статичній постановці.

При механічних і теплових впливах у пружному тілі виникають поля переміщень u_i , деформацій ε_{ij} і напружень σ_{ij} , також температурне поле T . Під механічними розуміють впливи на тіло зовнішніх сил (об'ємних і поверхневих), а під тепловими – процеси теплообміну між поверхнею тіла і навколишнім середовищем та виділення і поглинання тепла джерелами всередині тіла.

Орієнтація напружень σ_{ij} та їх приростів $d\sigma_{ij} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_k} dx_k$ ($i, j, k = 1, 2, 3$)

розглядається в прямокутній системі координат.

Нехай на виділений елемент діють також об'ємні сили інтенсивністю $\mathbf{F} = F_1 \mathbf{i}_1 + F_2 \mathbf{i}_2 + F_3 \mathbf{i}_3$. Проектуючи всі ці сили на відповідні осі, отримаємо три рівняння рівноваги:

$$(\sigma_{11} + d\sigma_{11})dx_2 dx_3 - \sigma_{11}dx_2 dx_3 + (\tau_{21} + d\tau_{21})dx_1 dx_3 - \tau_{21}dx_1 dx_3 + \\ + (\tau_{31} + d\tau_{31})dx_1 dx_2 - \tau_{31}dx_1 dx_2 + F_1 dx_1 dx_2 dx_3 = 0,$$

$$\begin{aligned}
& (\sigma_{22} + d\sigma_{22})dx_1dx_3 - \sigma_{22}dx_1dx_3 + (\tau_{12} + d\tau_{12})dx_2dx_3 - \tau_{12}dx_2dx_3 + \\
& + (\tau_{32} + d\tau_{32})dx_1dx_2 - \tau_{32}dx_1dx_2 + F_2dx_1dx_2dx_3 = 0, \\
& (\sigma_{33} + d\sigma_{33})dx_1dx_2 - \sigma_{33}dx_1dx_2 + (\tau_{23} + d\tau_{23})dx_1dx_3 - \tau_{23}dx_1dx_3 + \\
& + (\tau_{13} + d\tau_{13})dx_2dx_3 - \tau_{13}dx_2dx_3 + F_3dx_1dx_2dx_3 = 0.
\end{aligned}$$

Після відповідних спрощень вони приймають вигляд:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \sigma_{11}}{\partial x_1} + \frac{\partial \tau_{21}}{\partial x_2} + \frac{\partial \tau_{31}}{\partial x_3} + F_1 &= 0, \\
\frac{\partial \sigma_{22}}{\partial x_2} + \frac{\partial \tau_{32}}{\partial x_3} + \frac{\partial \tau_{12}}{\partial x_1} + F_2 &= 0, \\
\frac{\partial \sigma_{33}}{\partial x_3} + \frac{\partial \tau_{13}}{\partial x_1} + \frac{\partial \tau_{23}}{\partial x_2} + F_3 &= 0.
\end{aligned} \tag{A.1}$$

Ці співвідношення можуть бути представлені в коротшій формі

$$\sigma_{ij,j} + F_i = 0 \quad (i, j = 1, 2, 3), \tag{A.2}$$

в яких по повторюваним індексам j виконується сумування від 1 до 3. Величина F_i , що входить у рівність (A.2), є об'ємною силою, яка діє на виділений елемент у напрямі координати x_i . Вона може визначити, наприклад, силу тяжіння або силу інерції.

Загальна форма співвідношення для функції термонапружень має вигляд:

$$\sigma_{ij} = 2G\varepsilon_{ij} + [\lambda I_1 - (3\lambda + 2G)\alpha_T(T - T_0)]\delta_{ij}, \tag{A.3}$$

де I_1 – перший інваріант тензора напружень; δ_{ij} – символ Кронекера;

α_T – коефіцієнт теплового лінійного розширення; T_0 – початкове значення температури; T – її поточне значення.

В лінійній теорії пружності відносні деформації визначаються через компоненти u_1, u_2, u_3 вектора переміщень

$$\begin{aligned}\varepsilon_{11} &= \frac{\partial u_1}{\partial x_1}, & \varepsilon_{22} &= \frac{\partial u_2}{\partial x_2}, & \varepsilon_{33} &= \frac{\partial u_3}{\partial x_3}, \\ \varepsilon_{12} = \varepsilon_{21} &= \frac{\partial u_1}{\partial x_2} + \frac{\partial u_2}{\partial x_1}, & \varepsilon_{23} = \varepsilon_{32} &= \frac{\partial u_2}{\partial x_3} + \frac{\partial u_3}{\partial x_2}, & \varepsilon_{31} = \varepsilon_{13} &= \frac{\partial u_3}{\partial x_1} + \frac{\partial u_1}{\partial x_3}.\end{aligned}$$

За допомогою вищевказаних рівностей можна побудувати систему рівнянь деформування пружного середовища:

$$\begin{aligned}\mu \left(\frac{\partial^2}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_3^2} \right) u_1 + (\lambda + \mu) \frac{\partial}{\partial x_1} \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_1} + \frac{\partial u_2}{\partial x_2} + \frac{\partial u_3}{\partial x_3} \right) + F_1 &= 0, \\ \mu \left(\frac{\partial^2}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_3^2} \right) u_2 + (\lambda + \mu) \frac{\partial}{\partial x_2} \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_1} + \frac{\partial u_2}{\partial x_2} + \frac{\partial u_3}{\partial x_3} \right) + F_2 &= 0, \\ \mu \left(\frac{\partial^2}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_3^2} \right) u_3 + (\lambda + \mu) \frac{\partial}{\partial x_3} \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_1} + \frac{\partial u_2}{\partial x_2} + \frac{\partial u_3}{\partial x_3} \right) + F_3 &= 0.\end{aligned}\tag{A.4}$$

Величини $u_i, \varepsilon_{ij}, \sigma_{ij}$ і T в загальному випадку є функціями координат x_i і часу t . Так як тепло розповсюджується в твердому тілі через теплопровідність, то для вивчення процесу термопружного деформування навіть ідеально пружного тіла має бути застосована термодинаміка незворотних процесів.

Основні ідеї термодинаміки незворотних процесів полягають в поняттях

л

о

к

а

л

ь

н

о

ї

$$q_i = -\lambda_q T_{,i},\tag{A.5}$$

де λ_q – коефіцієнт теплопровідності.

В задачах теплопровідності, які розглядаються в даній роботі, вони є постійними величинами. Тоді рівняння теплопровідності набуває виду:

$$\nabla^2 T + \frac{w_0}{\lambda_q} = \frac{1}{a} \cdot \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (\text{A.6})$$

де $a = \frac{\lambda_q}{c}$ – коефіцієнт температуропровідності, який характеризує теплоінерційні властивості тіл.

Однією з найважливіших характеристик скінченноелементної моделі є максимальний діаметр елементів, з яким часто пов'язують оцінки похибки методу

$$h = \max_e \left(\sup_{x, y \in \Omega_e} |x - y| \right).$$

Інакше кажучи, h – це мінімальний діаметр кулі, в яку можна вкласти будь-який скінченний елемент розрахункової схеми. Крім того, зазвичай припускається, що при нескінченному зменшенні діаметру, тобто при $h \rightarrow 0$, дотримуються наступні умови регулярності – в кожному скінченний елемент можна вкласти кулю радіусу $r \leq Ch$, де константа C не залежить від h . Це оберігає від використання так званих голчастих елементів (дуже витягнутих прямокутників, трикутників з дуже маленькими кутами і т.п.).

Як правило, в МСЕ апроксимуючі функції є поліноміальними або кусково-поліноміальними (метод підобластей), хоча й існують елементи з дробово-раціональними (так звані ізопараметричні елементи), тригонометричними, логарифмічними та іншими апроксимаціями поля переміщень. Вибір ступенів вільності елемента та відповідних апроксимуючих функцій повністю визначає швидкість збіжності та оцінку похибки МСЕ.

Якщо зафіксувати всі параметри скінченноелементної розрахункової моделі, за виключенням розміру скінченних елементів h , то можна уявити, що, змінюючи цей розмір, ми отримаємо послідовність наближених розв'язків задачі

$\mathbf{u}_h$. Коли кажуть про збіжність МСЕ, то мають на увазі, що послідовність прямує до точного розв'язку задачі $\mathbf{u}^*$, коли $h \rightarrow 0$.

Скінченні елементи з'єднуються між собою в окремих точках – вузлах. В одному вузлі можуть з'єднуватися кілька скінченних елементів. Вузлам скінченного елемента надають додаткових в'язей, кількість яких визначається особливостями певної задачі. Так, для плоскої задачі теорії пружності можна обмежитися трьома в'язями, які забороняють лінійні переміщення в площині. Найпростішим скінченним елементом є стержень для стержневих систем (балки, рами, ферми).

Для площин скінченні елементи можуть бути у вигляді трикутника, прямокутника та інших фігур.

Умовами об'єднання скінченних елементів у загальну систему є рівняння рівноваги у вузлах реакцій в'язей та зовнішніх вузлових навантажень, а також умови суцільності переміщень у вузлах. Останні задовольняються автоматично. Кількість рівнянь рівноваги визначається спільною кількістю ступенів вільності цієї системи чи кількістю шуканих переміщень у вузлах.

Отже, замість диференціального рівняння задача зводиться до системи лінійних алгебраїчних рівнянь. Розв'язавши систему рівнянь, визначають вузлові переміщення, а через них – усі компоненти напружено-деформованого стану.

Повна потенціальна енергія пружної системи може бути розділена на дві частини, одна з яких відповідає енергії деформацій в тілі, а друга визначається потенціальною енергією масових сил і прикладених поверхневих сил. У відповідності з цим запишемо повну потенціальну енергію у вигляді

$$\Pi = E + W_p, \quad (\text{A.7})$$

де E – енергія деформацій, а W_p – потенціальна енергія прикладених сил. Робота зовнішніх сил протилежна за знаком їх потенціальній енергії:

$$W = -W_P, \quad (\text{A.8})$$

Із формул (A.7) і (A.8) отримуємо

$$P = E - W. \quad (\text{A.9})$$

Після розбиття області на елементи рівність (A.9) записується у вигляді суми

$$P = \sum_{e=1}^E (E^{(e)} + W^{(e)}) = \sum_{e=1}^E \pi^{(e)}. \quad (\text{A.10})$$

Енергія деформації нескінченно малого об'єму dV визначається формулою

$$dE = \frac{1}{2} \{\varepsilon\}^T \{\sigma\} - \frac{1}{2} \{\varepsilon_0\}^T \{\sigma\}, \quad (\text{A.11})$$

де $\{\varepsilon\}$ – повна деформація, а $\{\varepsilon_0\}$ – початкова деформація. Величина dE визначається густиною енергії деформації, а повна енергія деформації отримується інтегруванням цієї величини по об'єму тіла:

$$E = \int_V \frac{1}{2} (\{\varepsilon\}^T \{\sigma\} - \{\varepsilon_0\}^T \{\sigma\}) dV. \quad (\text{A.12})$$

Вигляд векторних стовпців $\{\varepsilon\}$ і $\{\sigma\}$ залежить від того, яка задача розв'язується. Наприклад для двохмірного випадку плоскої деформації ці вектор-стовпці мають вигляд

$$\{\varepsilon\}^T = [\varepsilon_{xx} \varepsilon_{yy} \gamma_{xy}]$$

та

$$\{\sigma\}^T = [\sigma_{xx} \sigma_{yy} \tau_{xy}].$$

Вектор деформації $\{\varepsilon\}$ можна виразити через вузлові переміщення $\{U\}$, тобто:

$$\{\varepsilon\} = [B]\{U\}. \quad (\text{A.13})$$

де $[B]$ – матриця, яка отримується диференціюванням належним чином матриці $[N]$. Фактичні значення коефіцієнтів матриці $[B]$ залежать від вигляду елементів, що використовується, і від типу розглядуваної задачі. Тому точне визначення $[B]$ буде відкладено до розгляду конкретних прикладів.

Енергія деформації $E^{(e)}$ окремого елемента (A.14) може бути записана в наступному вигляді

$$\begin{aligned} E^{(e)} = \int_{V^{(e)}} \frac{1}{2} & \left(\{U\}^T [B^{(e)}]^T [D^{(e)}] [B^{(e)}] \{U\} - 2 \{U\}^T [B^{(e)}]^T [D^{(e)}] \{\varepsilon_0^{(e)}\} + \right. \\ & \left. + \{\varepsilon_0^{(e)}\}^T [D^{(e)}] \{\varepsilon_0^{(e)}\} \right) dV. \end{aligned} \quad (\text{A.14})$$

Робота, яка здійснюється зовнішніми силами, може бути розділена на три різні частини: робота W_c , що здійснюється зосередженими силами, робота W_p , яка отримується в результаті дії компонент напружень на зовнішній стороні поверхні, робота W_b , яка здійснюється масовими силами.

$$W_c = \{U\}^T \{P\} = \{P\}^T \{U\}.$$

Робота об'ємних сил X , Y , Z подається формулою

$$W_b^{(e)} = \int_{V^{(e)}} (uX + vY + wZ) dV, \quad (\text{A.15})$$

де u , v та w – компоненти вектора переміщень всередині елементу по осям x , y і z відповідно.

Робота поверхневих сил визначається наступним чином:

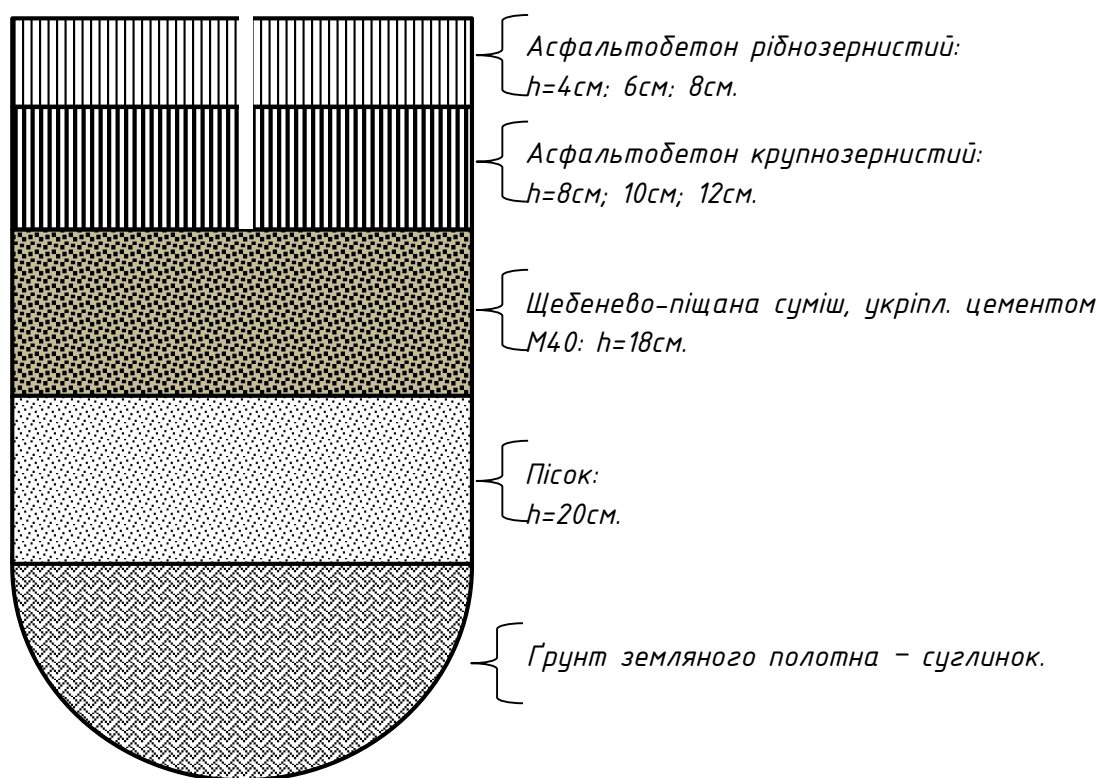
$$W_p^{(e)} = \int_{S^{(e)}} (u p_x^{(e)} + v p_y^{(e)} + w p_z^{(e)}) dS, \quad (\text{A.16})$$

де u , v та w – компоненти вектора переміщень,

p_x , p_y і p_z – компоненти вектора напружень, паралельні координатним осям x , y і z .

А.2 Результати визначення напружено деформованого стану конструкції дорожнього одягу з асфальтобетонним покриттям, що має поперечні тріщини

Для чисельного аналізу використовувалися конструкції дорожнього одягу наведені на рис. А.1.



а

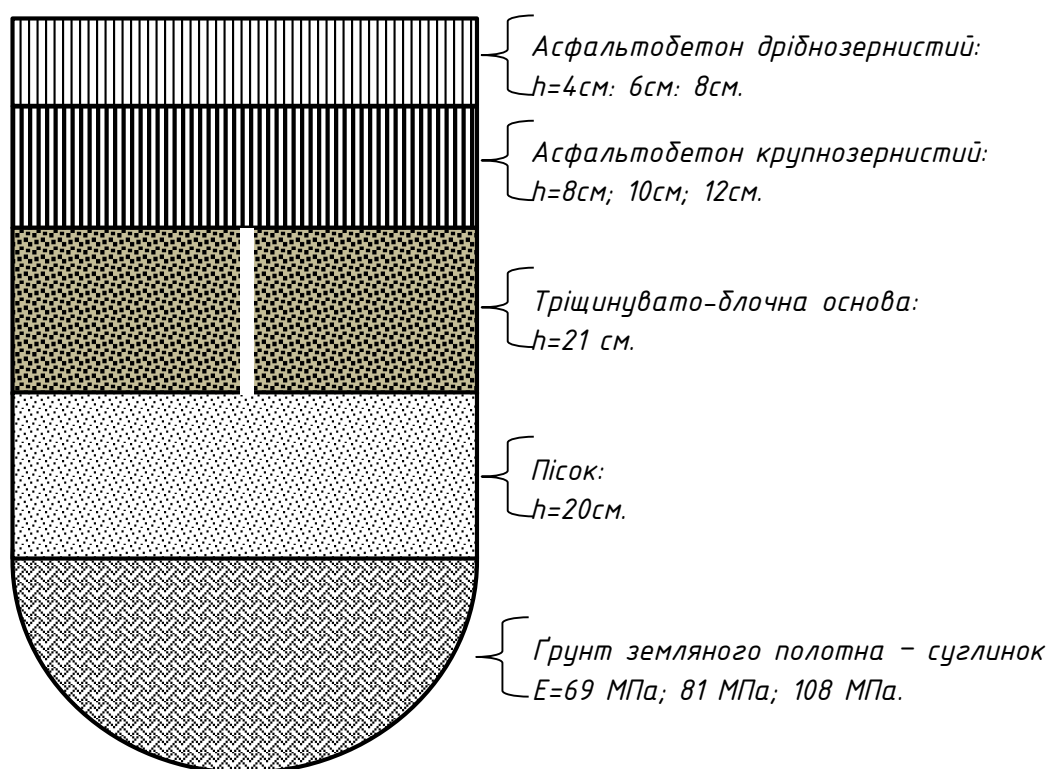
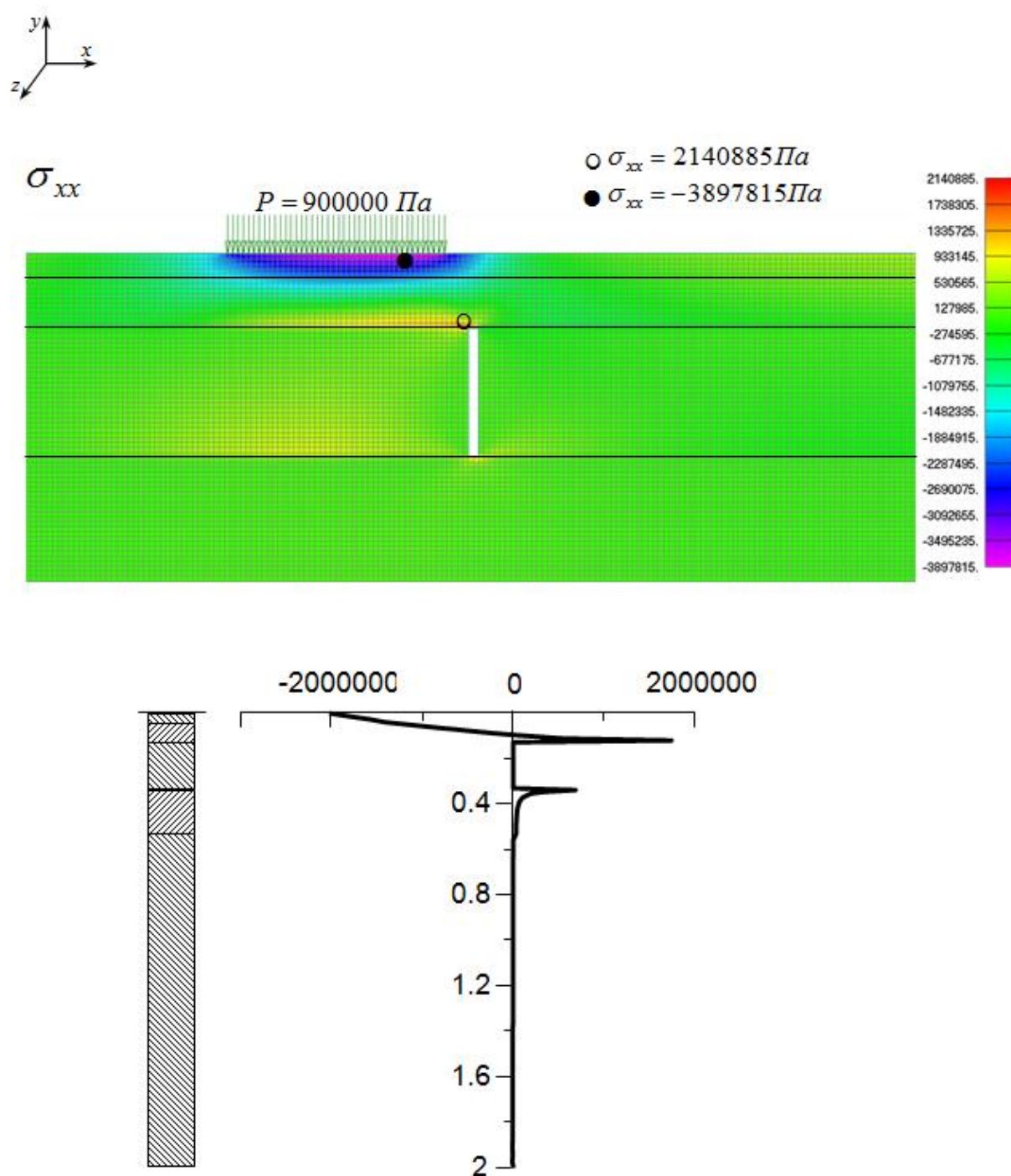


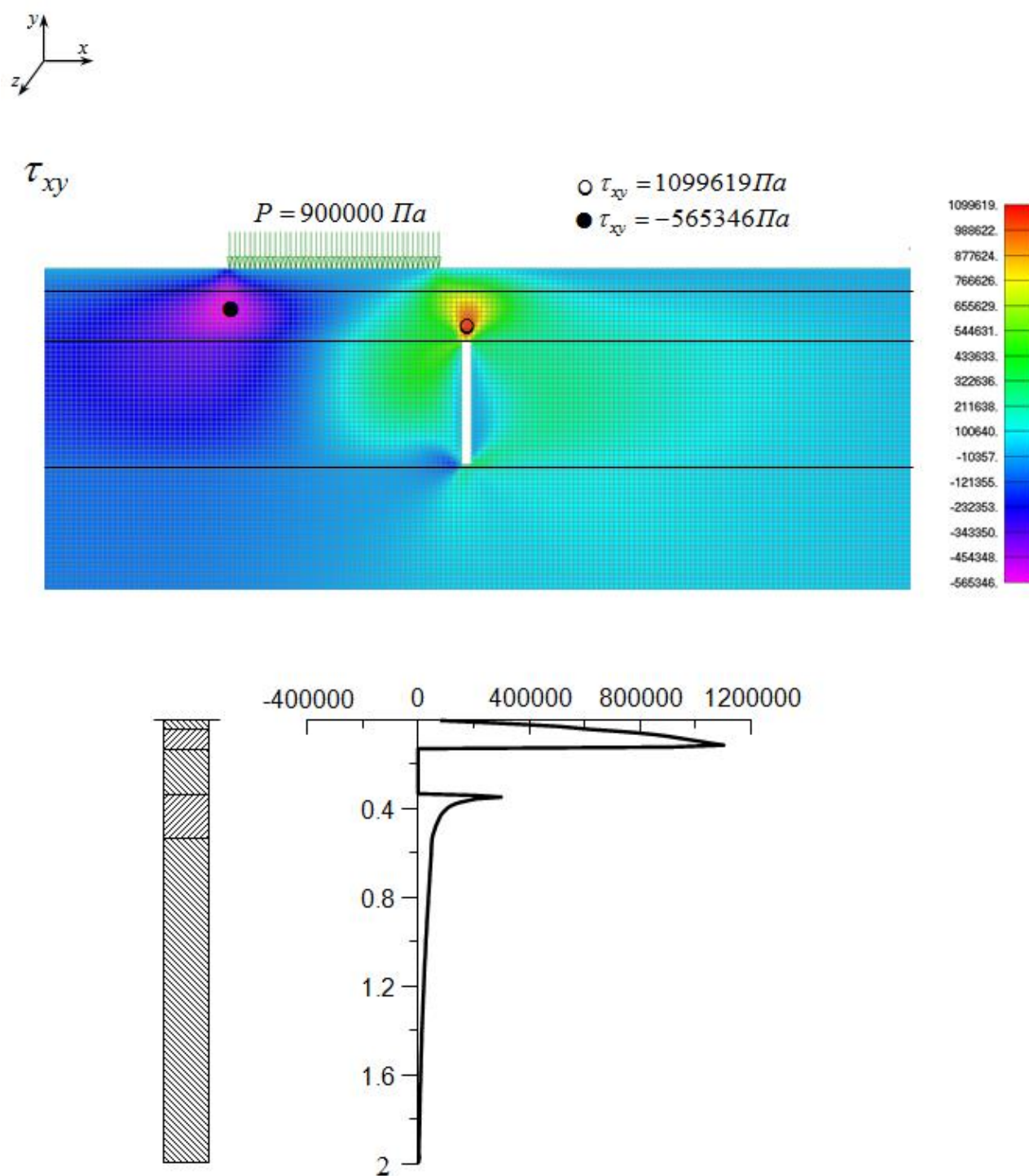
Рисунок А.1 – Конструкції дорожнього одягу які використовувалися для чисельного аналізу: а) конструкції дорожнього одягу з тріщиною в асфальтобетонних шарах покриття б) конструкції дорожнього одягу з тріщиною в основі

Результати чисельного аналізу наведені на рис. А.2 – А.15.



$h_1=0,04 \text{ м}, h_2=0,08 \text{ м}, h_3=0,21 \text{ м}, h_4=0,2 \text{ м}, h_5=1,47 \text{ м}, P=900000 \text{ Па}$

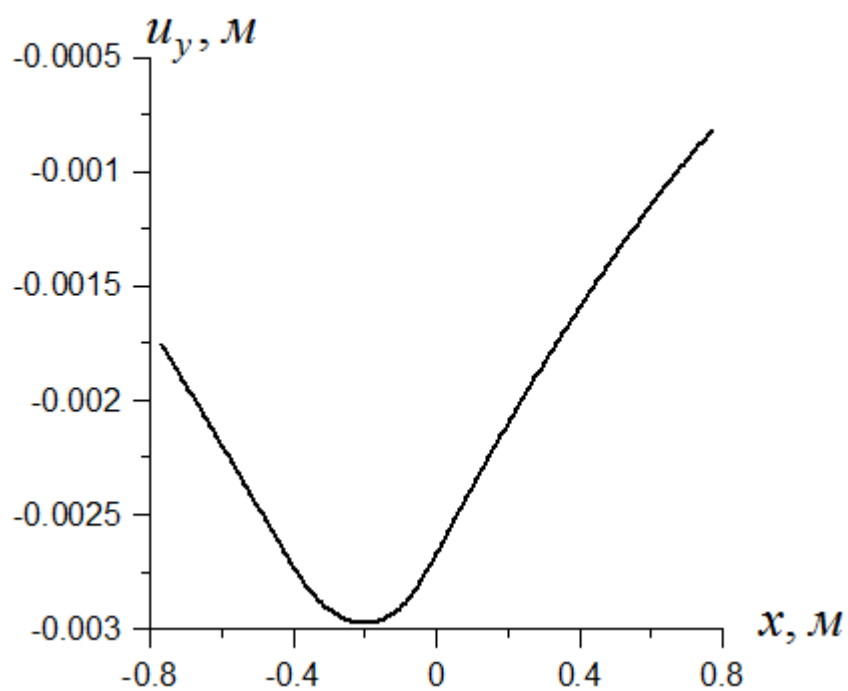
Рисунок А.2



$h_1=0,04 \text{ м}, h_2=0,08 \text{ м}, h_3=0,21 \text{ м}, h_4=0,2 \text{ м}, h_5=1,47 \text{ м}, P=900000 \text{ Па}$

Рисунок А.3

Верхня площина першого шару



Нижня площина другого шару

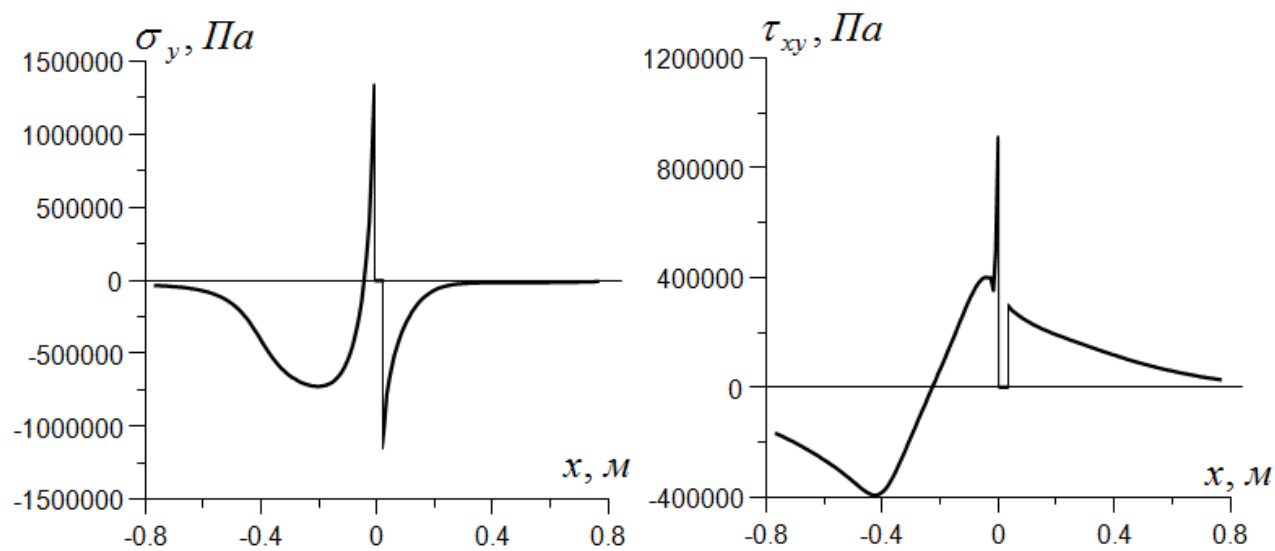
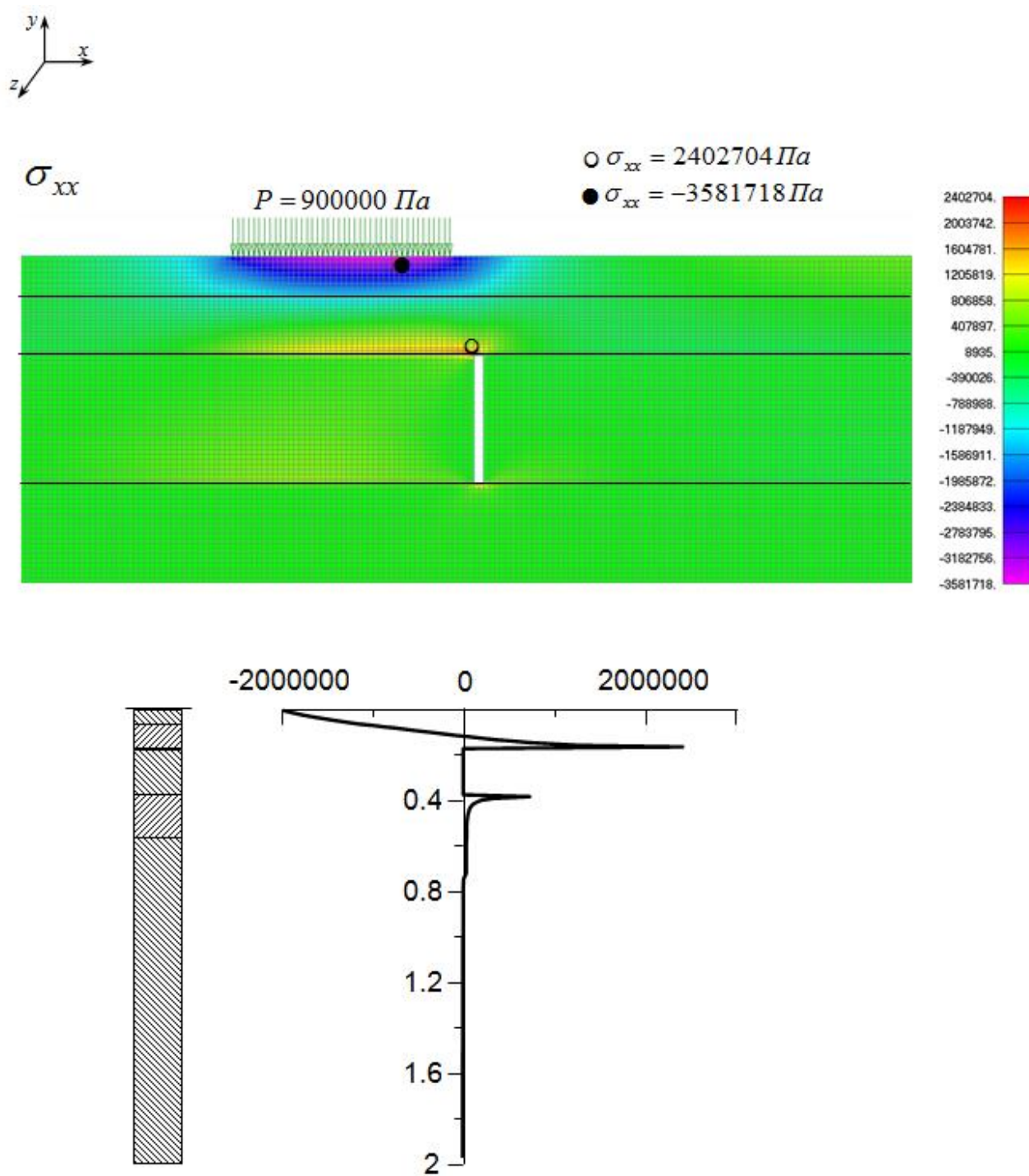
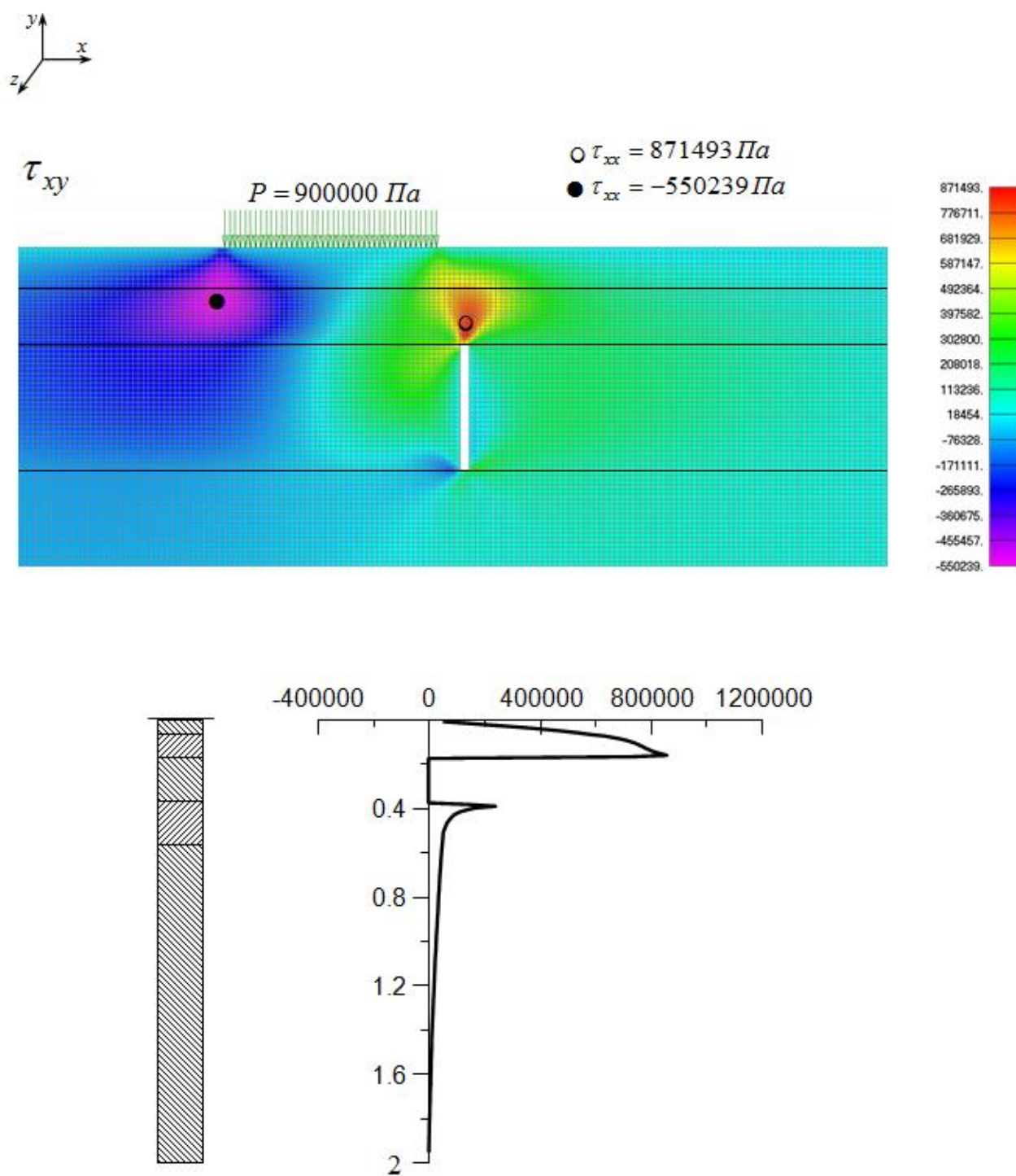


Рисунок А.4



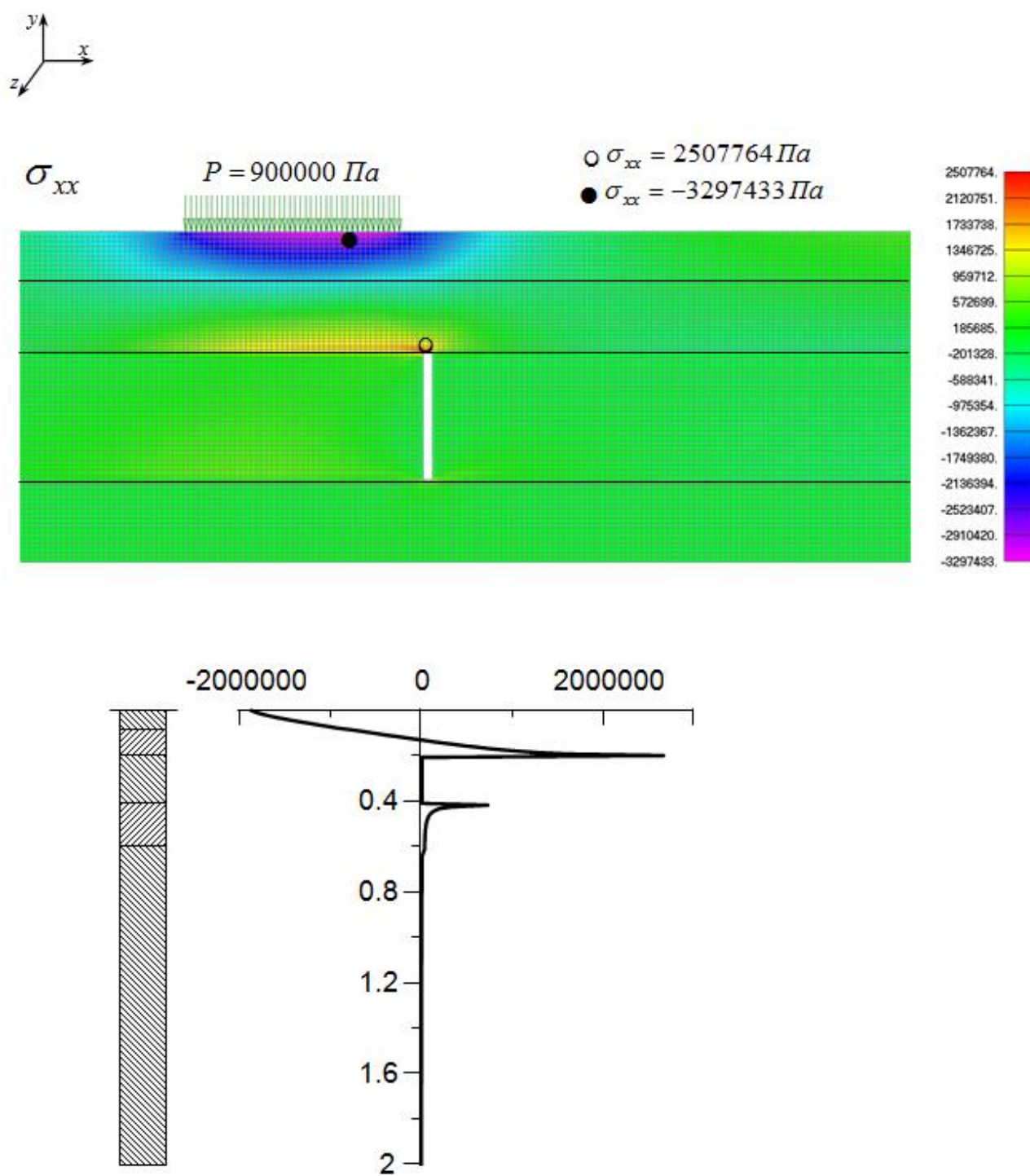
$h_1 = 0.06 \text{ m}$, $h_2 = 0.1 \text{ m}$, $h_3 = 0.21 \text{ m}$, $h_4 = 0.2 \text{ m}$, $h_5 = 1.43 \text{ m}$, $P = 900000 \text{ Pa}$

Рисунок А.5



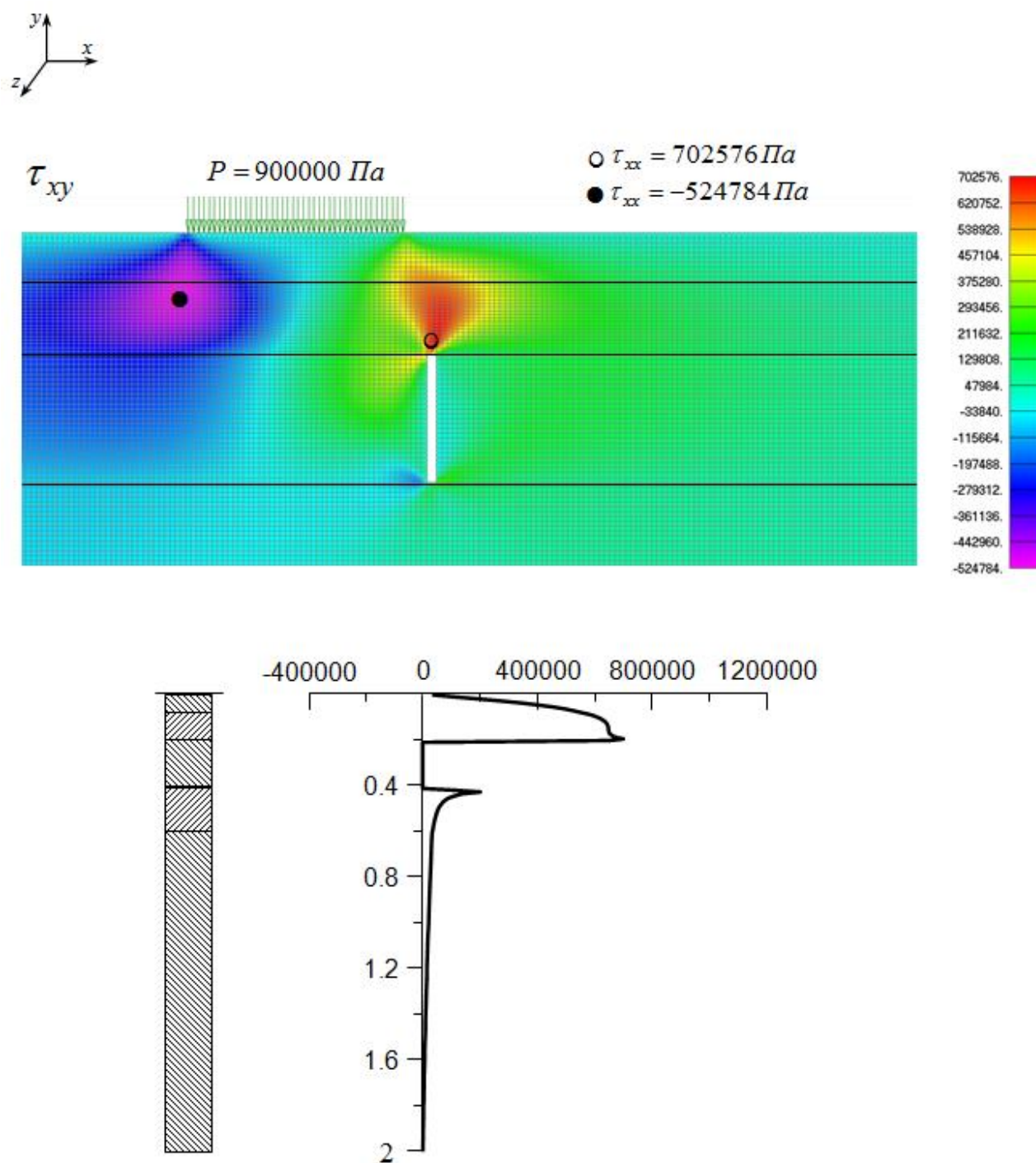
$h_1=0,06 \text{ м}, h_2=0,1 \text{ м}, h_3=0,21 \text{ м}, h_4=0,2 \text{ м}, h_5=1,43 \text{ м}, P=900000 \text{ Па}$

Рисунок А.6



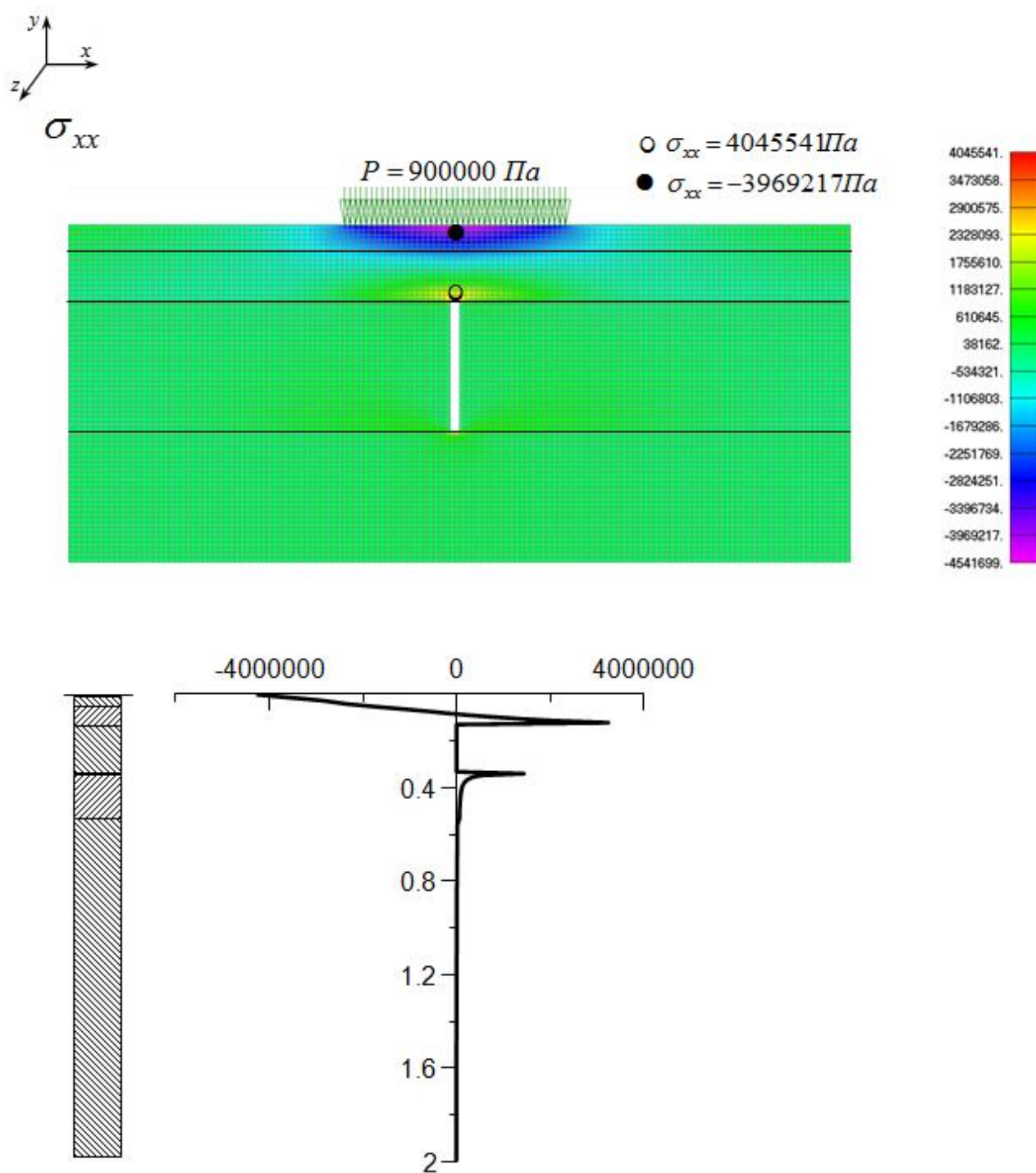
$h_1=0,08 \text{ м}, h_2=0,12 \text{ м}, h_3=0,21 \text{ м}, h_4=0,2 \text{ м}, h_5=1,39 \text{ м}, P=900000 \text{ Па}$

Рисунок А.7



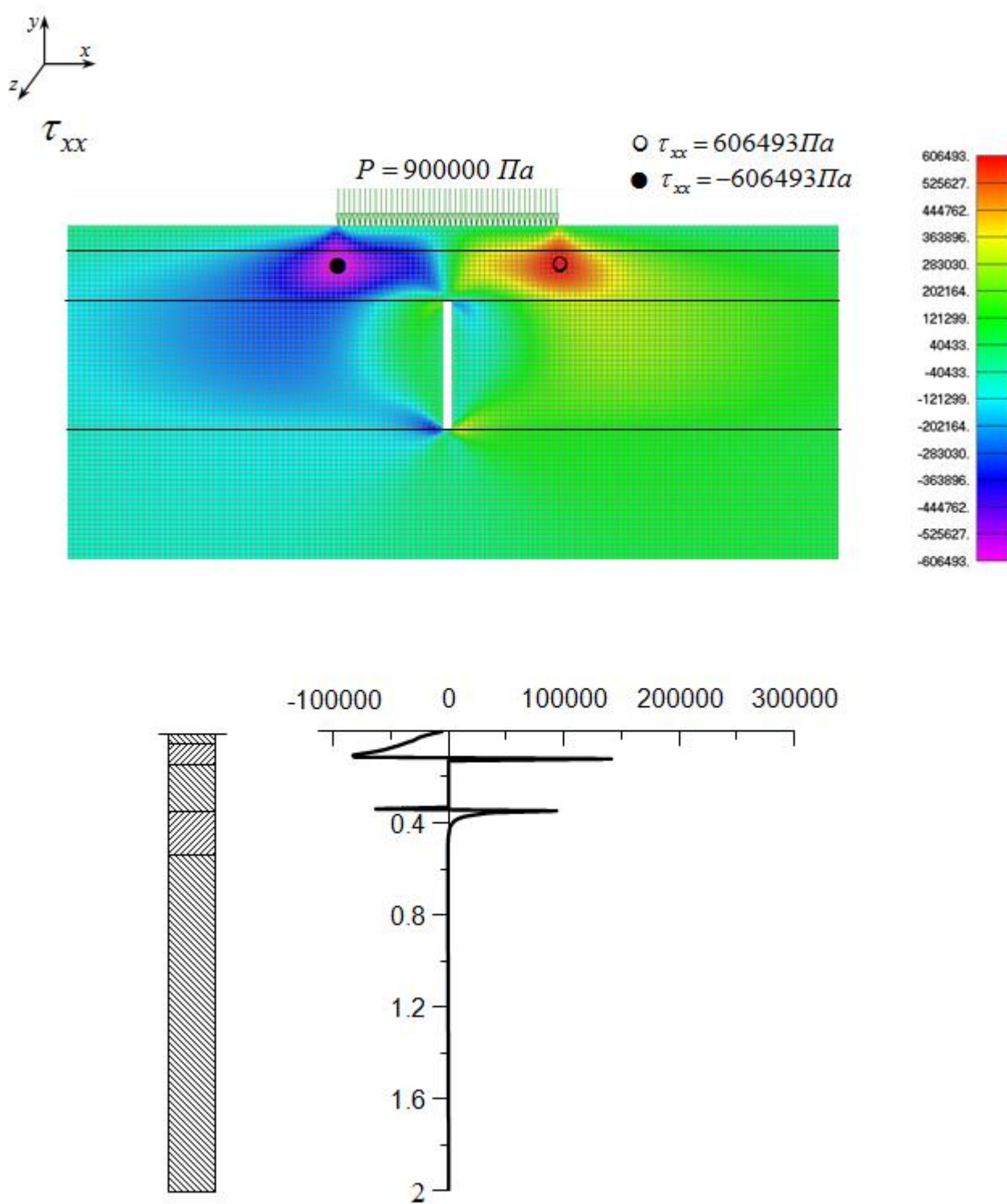
$h_1=0,08 \text{ м}, h_2=0,12 \text{ м}, h_3=0,21 \text{ м}, h_4=0,2 \text{ м}, h_5=1,39 \text{ м}, P=900000 \text{ Па}$

Рисунок А.8



$h_1=0,04 \text{ м}$, $h_2=0,08 \text{ м}$, $h_3=0,21 \text{ м}$, $h_4=0,2 \text{ м}$, $h_5=1,47 \text{ м}$, $P=900000 \text{ Па}$

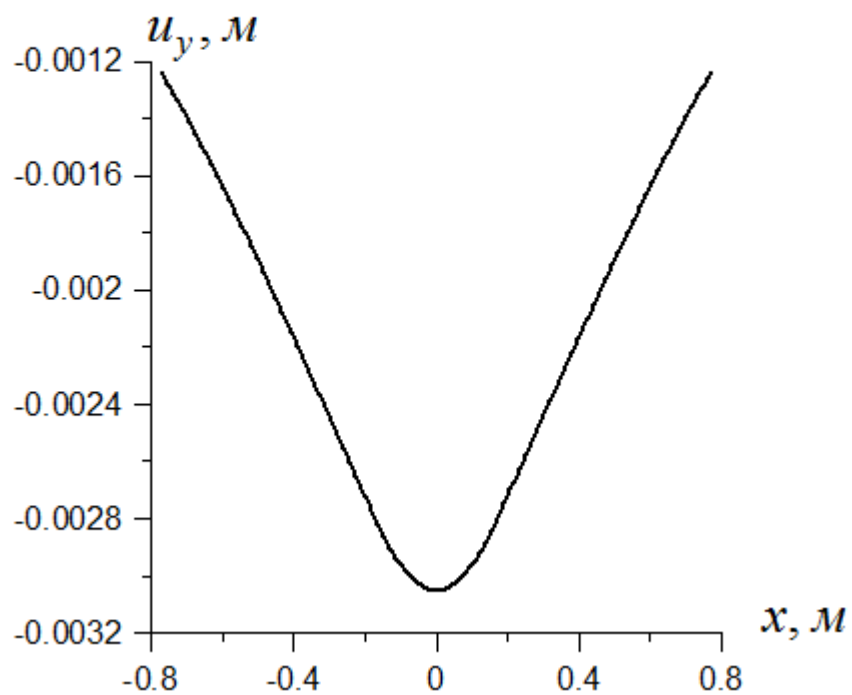
Рисунок А.9



$h_1=0,04 \text{ м}, h_2=0,08 \text{ м}, h_3=0,21 \text{ м}, h_4=0,2 \text{ м}, h_5=1,47 \text{ м}, P=900000 \text{ Па}$

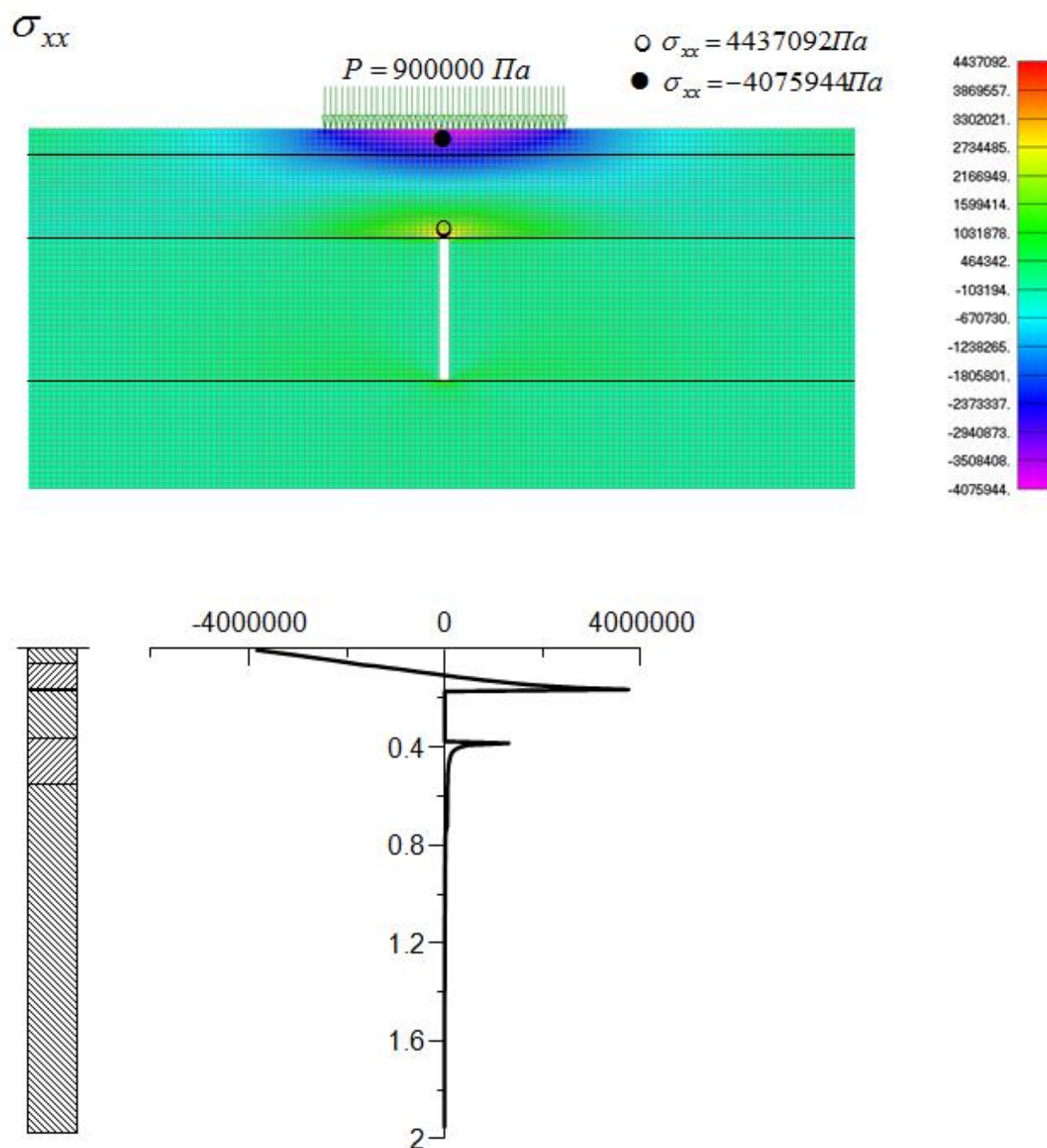
Рисунок А.10

Верхня площина першого шару



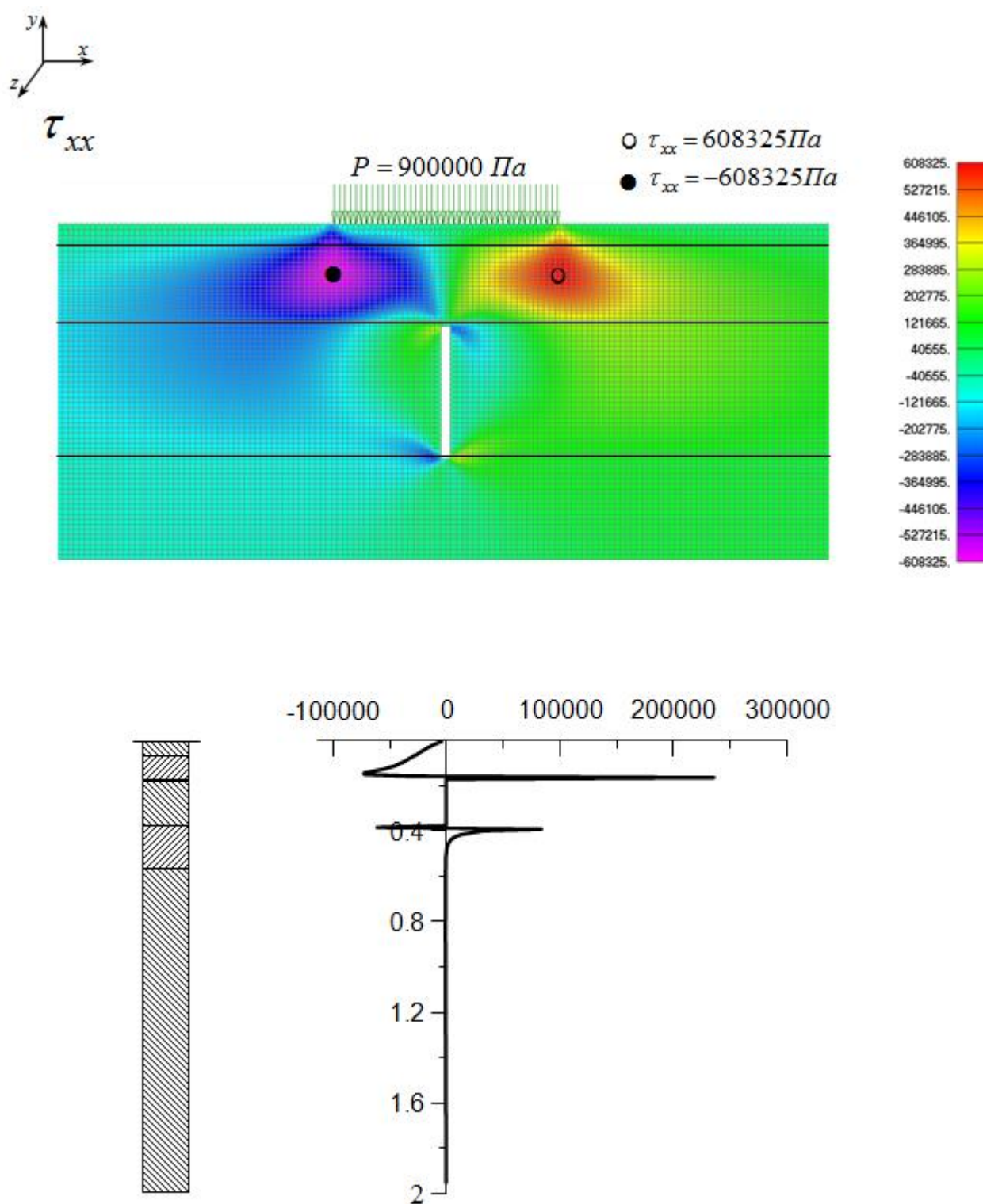
$h_1=0,04$ м, $h_2=0,08$ м, $h_3=0,21$ м, $h_4=0,2$ м, $h_5=1,43$ м, $P=900000$ Па

Рисунок А.11



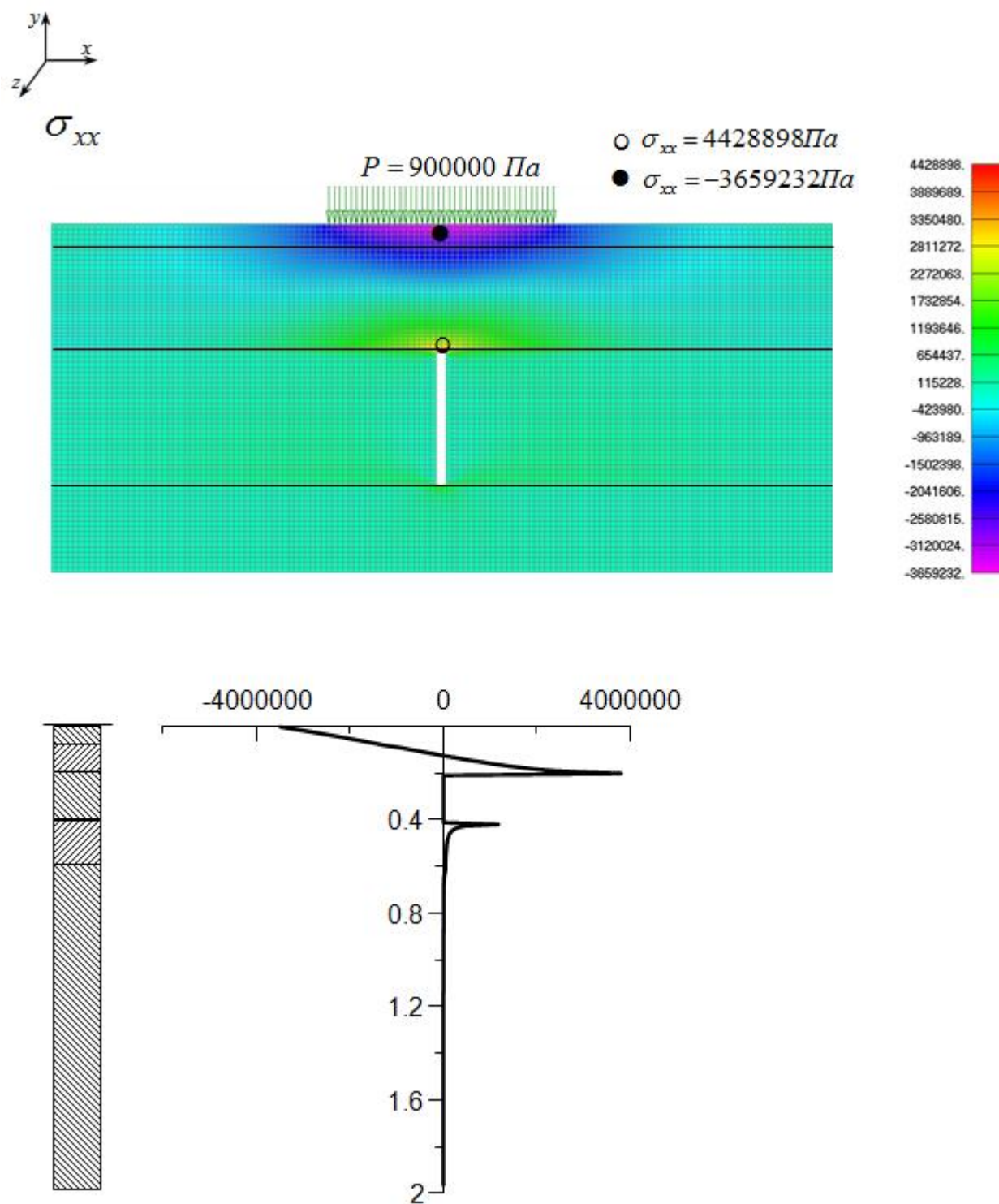
$h_1=0,06 \text{ м}, h_2=0,1 \text{ м}, h_3=0,21 \text{ м}, h_4=0,2 \text{ м}, h_5=1,43 \text{ м}, P=900000 \text{ Па}$

Рисунок А.12



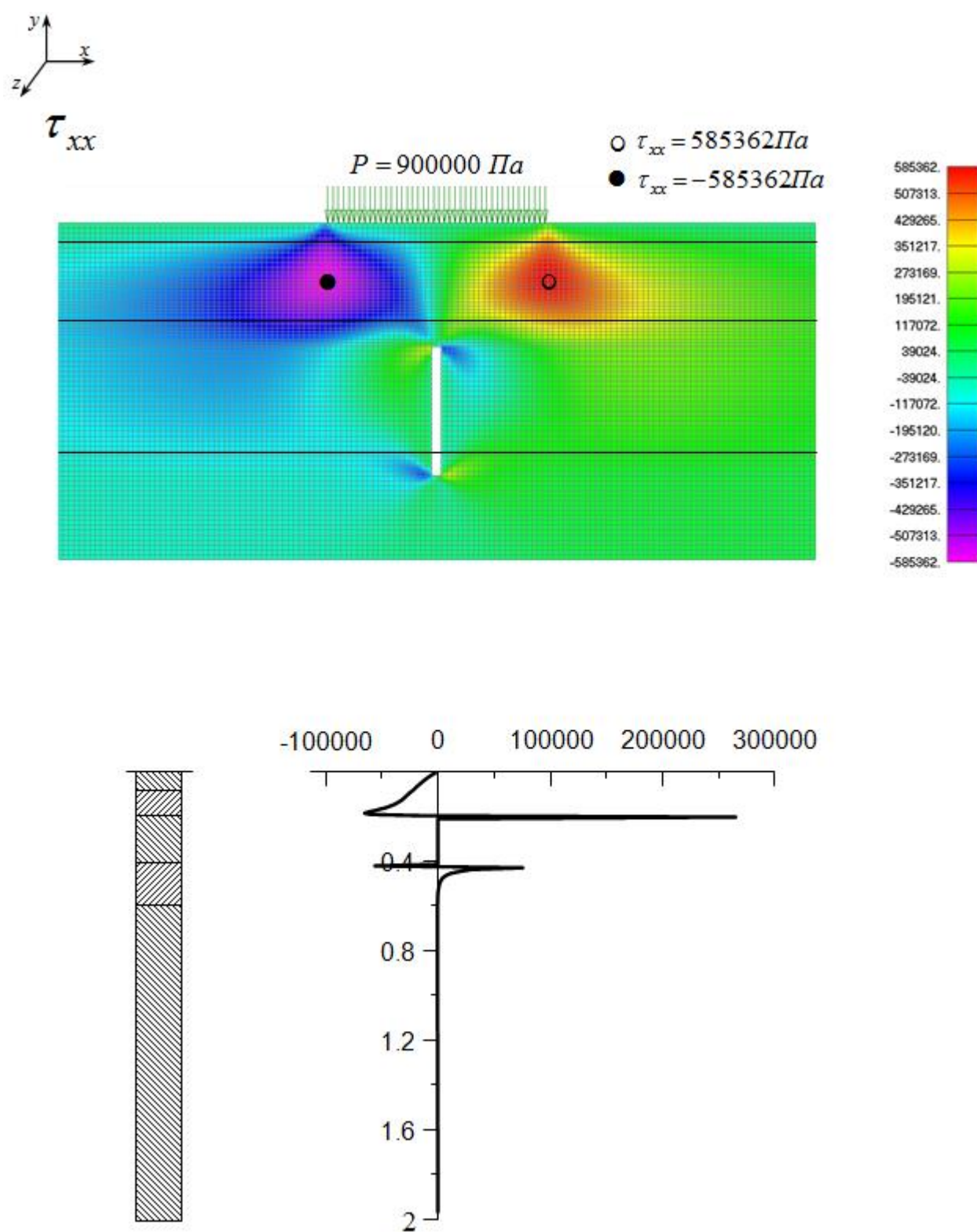
$h_1=0,06 \text{ м}, h_2=0,1 \text{ м}, h_3=0,21 \text{ м}, h_4=0,2 \text{ м}, h_5=1,43 \text{ м}, P=900000 \text{ Па}$

Рисунок А.13



$h_1=0,08 \text{ м}$, $h_2=0,12 \text{ м}$, $h_3=0,21 \text{ м}$, $h_4=0,2 \text{ м}$, $h_5=1,43 \text{ м}$, $P=900000 \text{ Па}$

Рисунок А.14



$h_1=0,08 \text{ м}, h_2=0,12 \text{ м}, h_3=0,21 \text{ м}, h_4=0,2 \text{ м}, h_5=1,43 \text{ м}, P=900000 \text{ Pa}$

Рисунок А.15

ДОДАТОК Б

**ПРИКЛАДИ РЕЗУЛЬТАТІВ ОБСТЕЖЕНЬ РУЙНУВАНЬ
НЕЖОРСТКОГО ДОРОЖНЬОГО ОДЯГУ З ПОПЕРЕЧНИМИ
ТРІЩИНАМИ В АСФАЛЬТОБЕТОННОМУ ПОКРИТТІ ТА
ЗАСТОСУВАННЯ САМОКЛЕЮЧИХ АРМУЮЧИХ СИНТЕТИЧНИХ
МАТЕРІАЛІВ НА ОБЄКТАХ М. КИЄВА**

Б.1 Характерні види поперечних температурних тріщин на асфальтобетонному покритті

Характерні види поперечних температурних тріщин на асфальтобетонному покритті на різних категоріях дорін наведені на рис. Б.1 – Б.5.



Рисунок Б.1

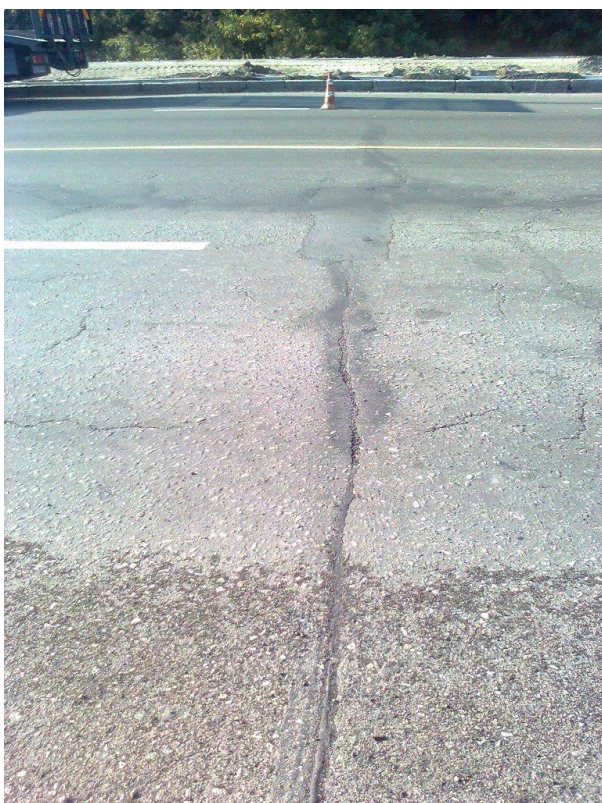
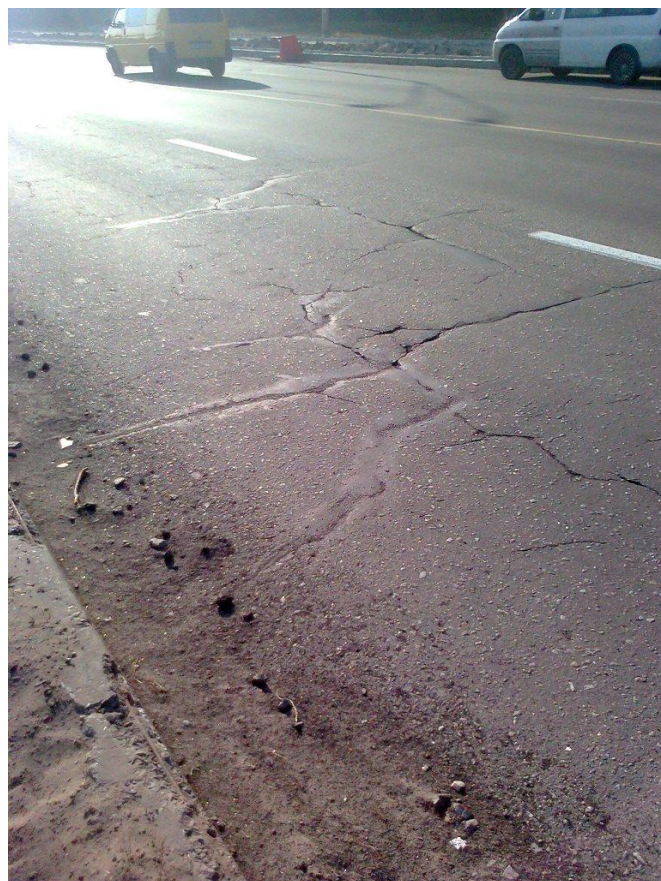
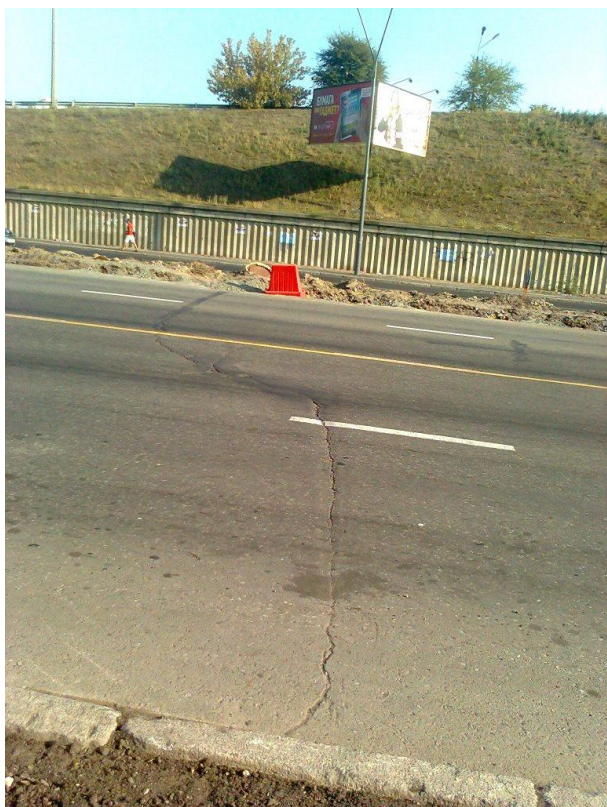


Рисунок Б.2



Рисунок Б.3

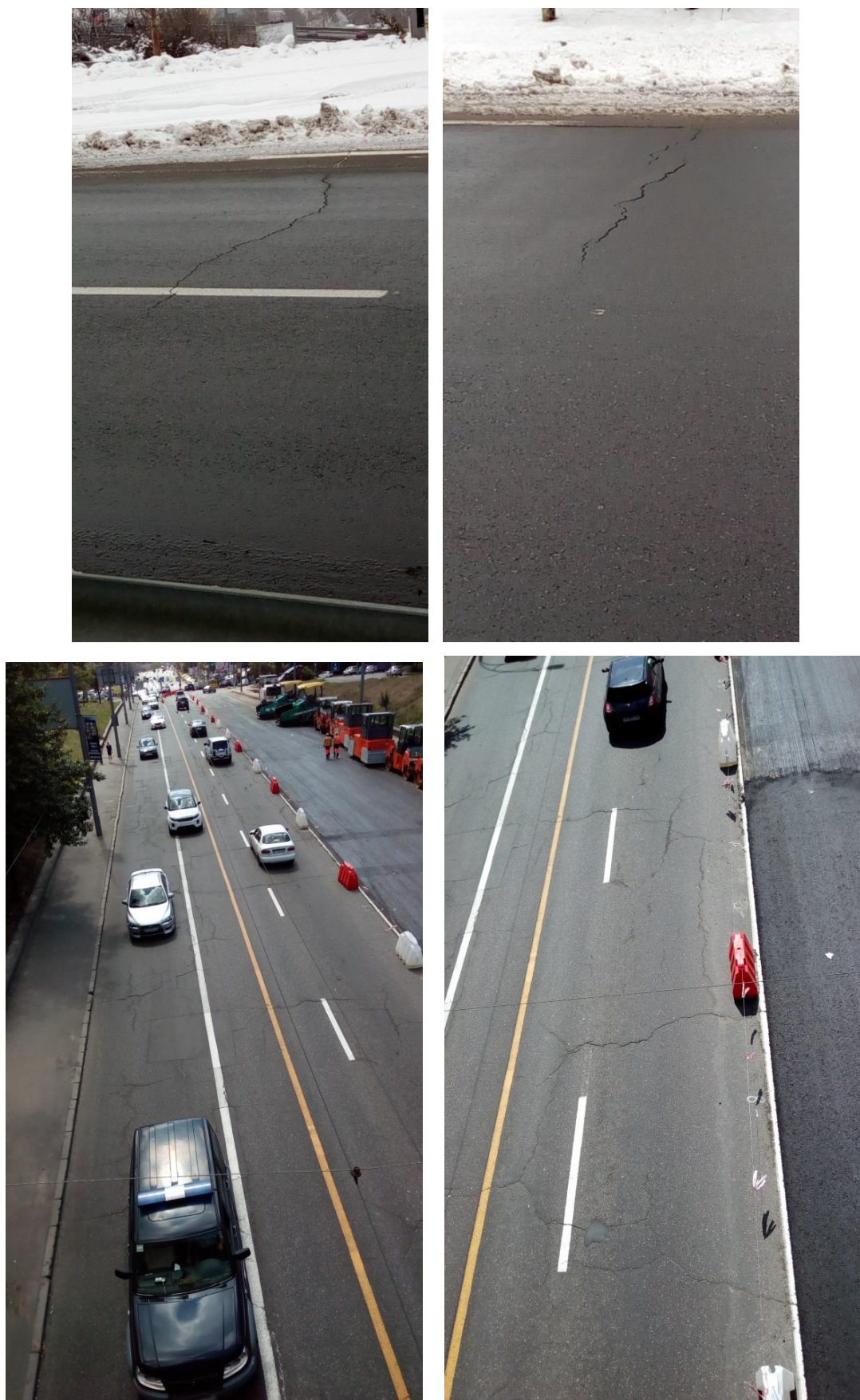


Рисунок Б.4



Рисунок Б.5

Б.2 Візуальна обстеження асфальтобетонного покриття по вул. Набережно-Рибальській в м. Києва

Схеми розташування поперечних тріщин представлені на рисунку Б.6 і Б.7.

Кількісна характеристика приведена в таблиці Б1

Характерні особливості тріщин та вигляд відібраних зразків-кернів наведені в таблиці у таблицях Б.2 і Б.3

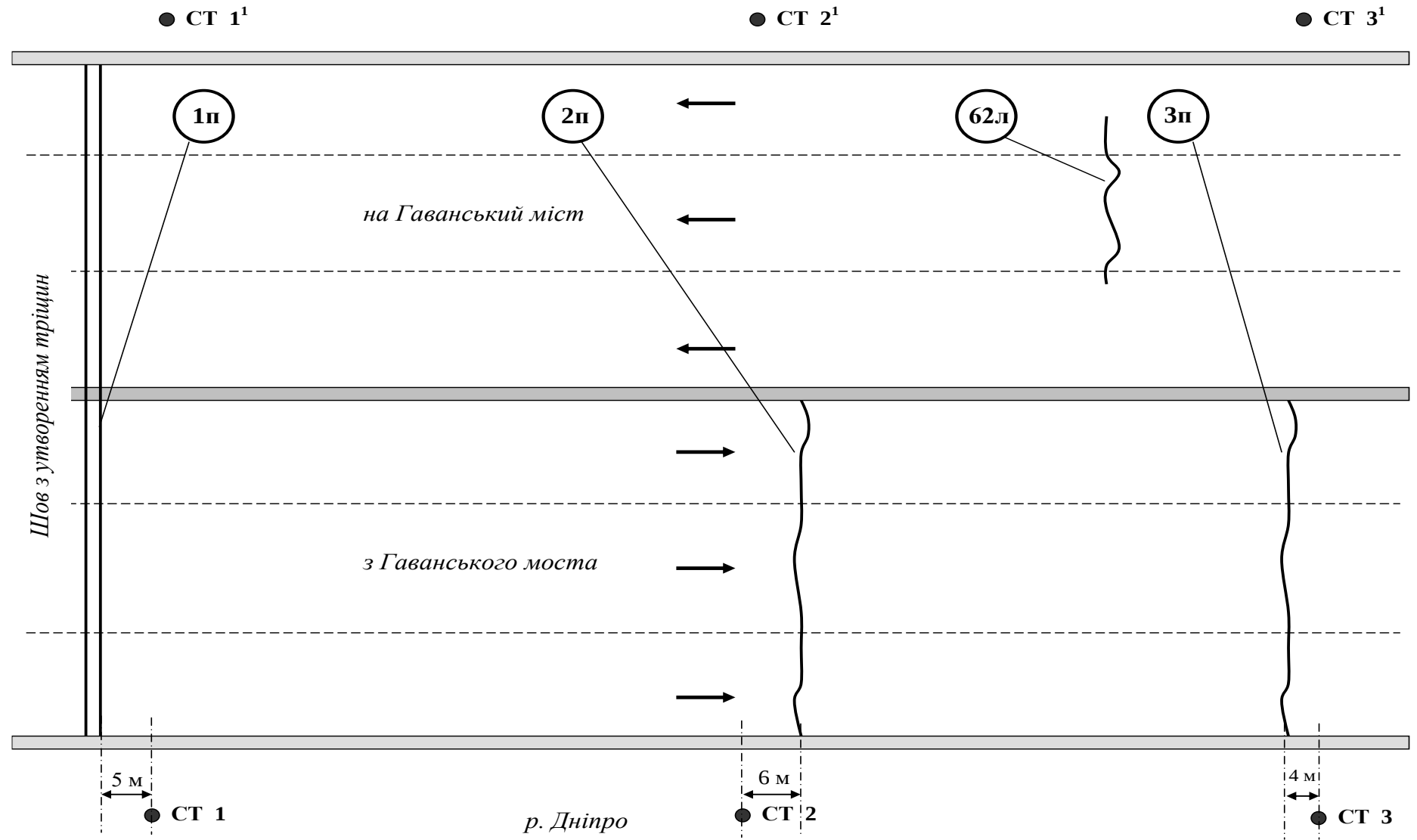


Рисунок Б.6 – Зображення дефектів асфальтобетонного покриття на вулиці Набережно-Рибальській

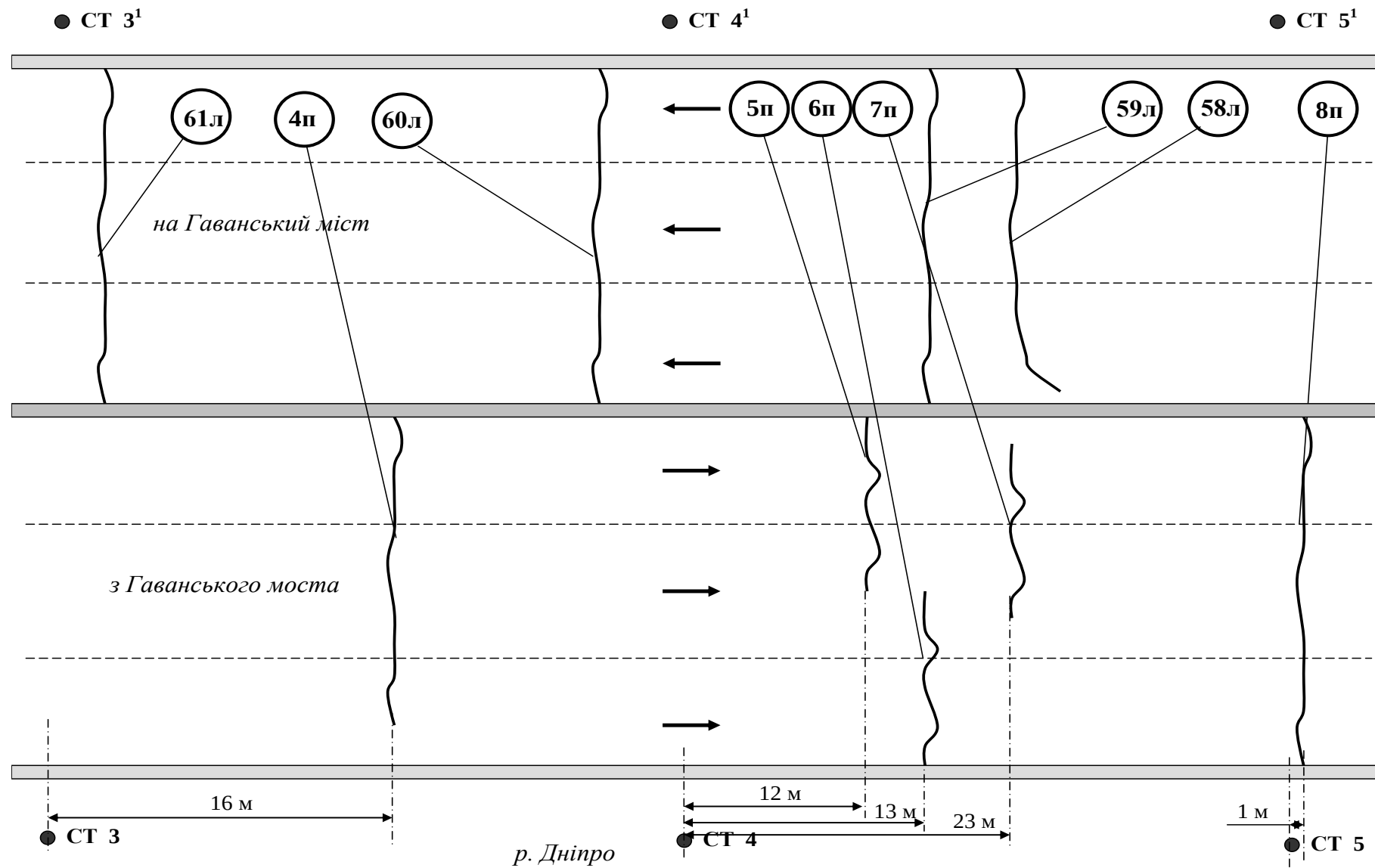


Рисунок Б.7 – Зображення дефектів асфальтобетонного покриття на вулиці Набережно-Рибальській

Таблиця Б.1 – Загальна кількість тріщин приведених до шт/км по ділянках

Тип тріщини	Ділянка 1	Ділянка 2	Ділянка 2'	Ділянка 3
1 тип	2 шт/км	7 шт/км	13 шт/км	55 шт/км
2 тип	49 шт/км в тому числі: Лпр. 19 шт/км Ппр. 30 шт/км	34 шт/км в тому числі: Лпр. 21 шт/км Ппр. 13 шт/км	50 шт/км в тому числі: Лпр. 23 шт/км Ппр. 27 шт/км	31 шт/км в тому числі: Лпр. 11 шт/км Ппр. 20 шт/км
3 тип	47 шт/км в тому числі: Лпр. 18 шт/км Ппр. 29 шт/км	114 шт/км в тому числі: Лпр. 56 шт/км Ппр. 58 шт/км	83 шт/км в тому числі: Лпр. 27 шт/км Ппр. 57 шт/км	62 шт/км в тому числі: Лпр. 39 шт/км Ппр. 23 шт/км
4 тип	0 шт/км	13 шт/км в тому числі: Лпр. 4 шт/км Ппр. 9 шт/км	7 шт/км в тому числі: Лпр. 0 шт/км Ппр. 7 шт/км	8 шт/км в тому числі: Лпр. 8 шт/км Ппр. 0 шт/км
Примітка. Лпр. – лівий проїзд, Ппр. – правий проїзд				

Таблиця Б.2 – Дефекти асфальтобетонного покриття відповідно рисунку Б.1

Номер дефекту відповідно схемі рис. Б1 та Б2	Фото дефекту		Характерні особливості дефекту покриття проїзної частини
1	2		3
1п			Поперечна тріщина. Розмір тріщини – через все покриття. Розкриття тріщини 0-6 мм.
2п			Поперечна тріщина. Розмір тріщини – через все покриття. Розкриття тріщини 0-4 мм.

Продовження таблиці Б.2

1	2		3
3п			Поперечна тріщина. Розмір тріщини – через все покриття. Розкриття тріщини 0-4 мм.
4п			Поперечна тріщина. Розмір тріщини – 9 м. Розкриття тріщини 0-3 мм.
5п			Поперечна тріщина. Розмір тріщини – 5,5 м. Розкриття тріщини 0-3 мм.
6п			Поперечна тріщина. Розмір тріщини – 6 м. Розкриття тріщини 0-3 мм.

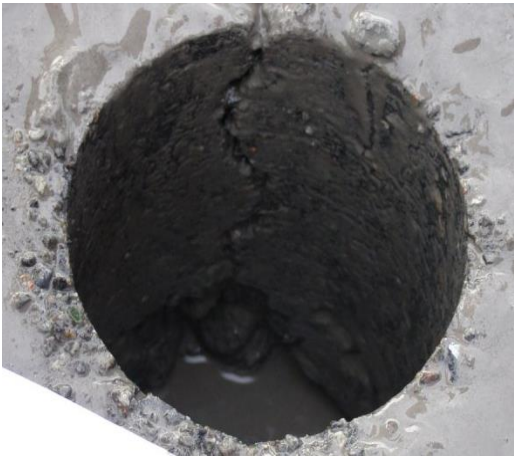
Кінець таблиці Б.2

1	2		3
7п			Поперечна тріщина. Розмір тріщини – 7 м. Розкриття тріщини 0-3 мм
8п			Поперечна тріщина. Розмір тріщини – через все покриття. Розкриття тріщини 0-3 мм

Таблиця Б.3 - Дефекти асфальтобетонного покриття .

Шифр керна	Номер дефекту відповідно рис. Б1 та Б2	Фото керна	Характерні особливості дефекту покриття проїзної частини
1	2	3	4
3.Л.1.1	5.Л		Тріщина проходить через верхній асфальтобетонний шар і далі між шарами

Продовження таблиці Б.3

1	2	3	4
3.Л.1.1	5.Л		Тріщина проходить через верхній асфальтобетонний шар і далі між шарами
2'.Л.1.5	16.Л	  	Тріщина проходить через всі асфальтобетонні шари

Продовження таблиці Б.3

1	2	3	4
2'.Л.3.6	18.Л		Тріщина проходить через всю конструкцію дорожнього одягу
2'.Л.3.8	20.Л		Тріщина проходить зверху через 2 шари асфальтобетону

Кінець таблиці Б.3

1	2	3	4
2'Л.3.9	28.Л		Тріщина проходить зверху через 2 шари асфальтобетону

Б.3 Обстеження покриття з вимірюванням прогинів та нерівностей у зоні тріщин на вул. Архипенка в м. Києві

Обстеження покриття з вимірюванням прогинів та нерівностей у зоні тріщин на вул. Архипенка в м. Києві наведено на рис. Б.8 – Б.11.



Рисунок Б.8



Рисунок Б.9

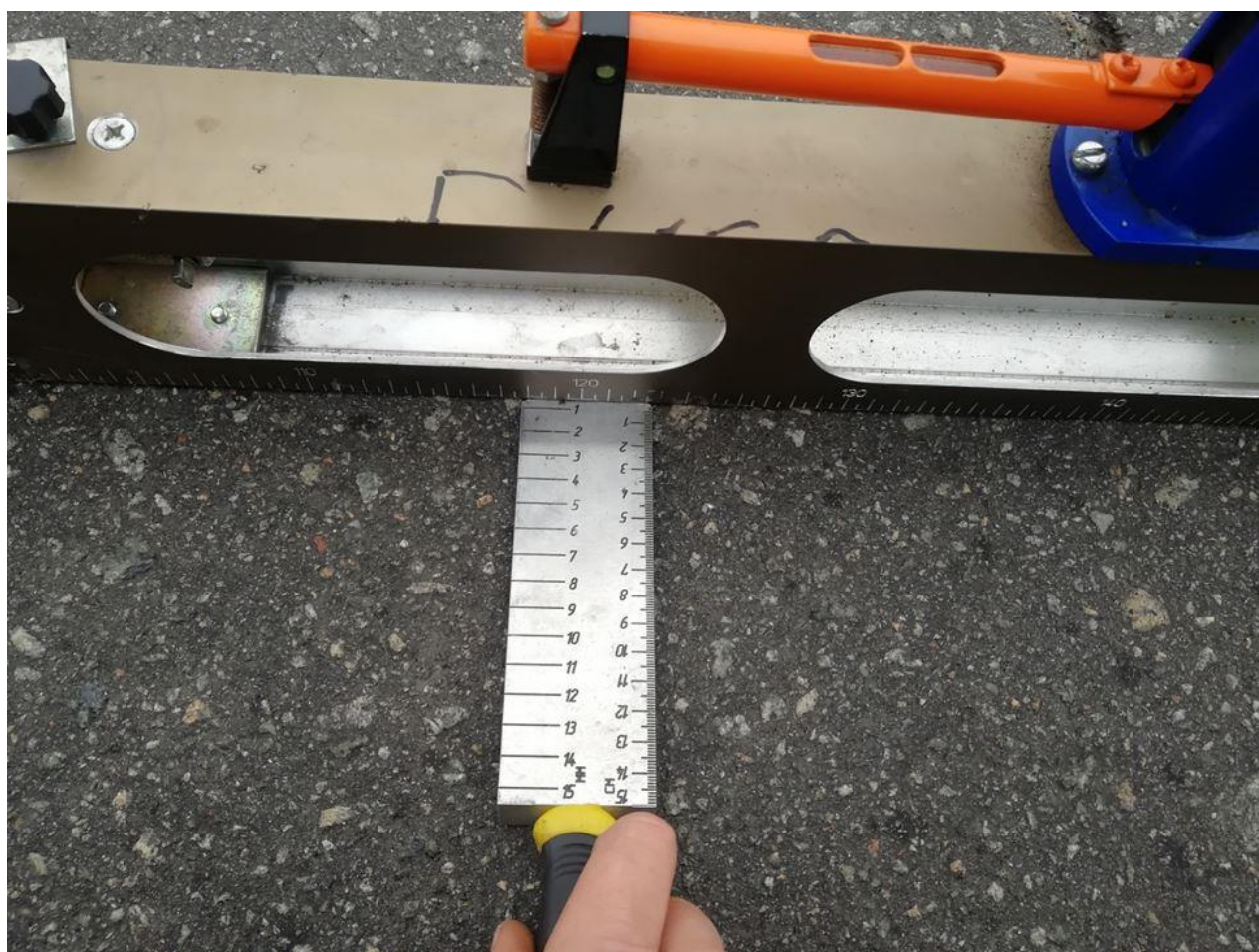


Рисунок Б.10



Рисунок Б.11

Б.4 Приклади застосування самоклеючих армуючих синтетичних матеріалів на об'єктах м. Києва

Приклади застосування самоклеючих армуючих синтетичних матеріалів на об'єктах м. Києва наведені на рис. Б.12 – Б.14.

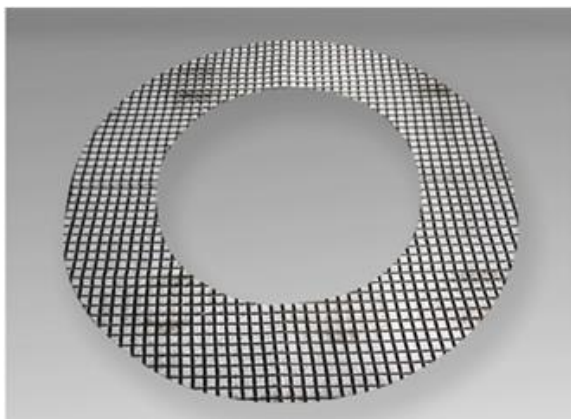
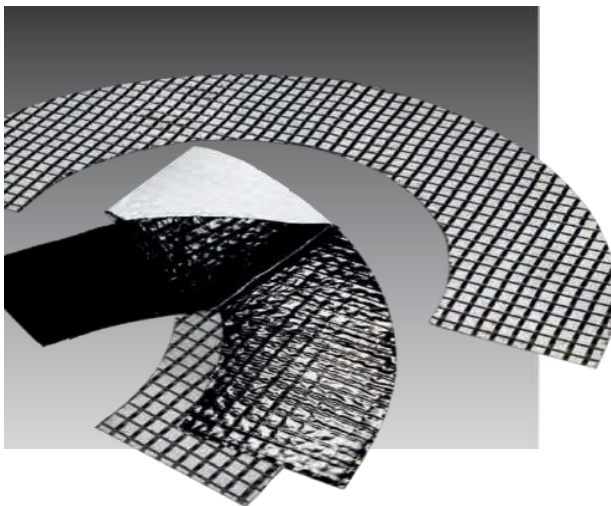
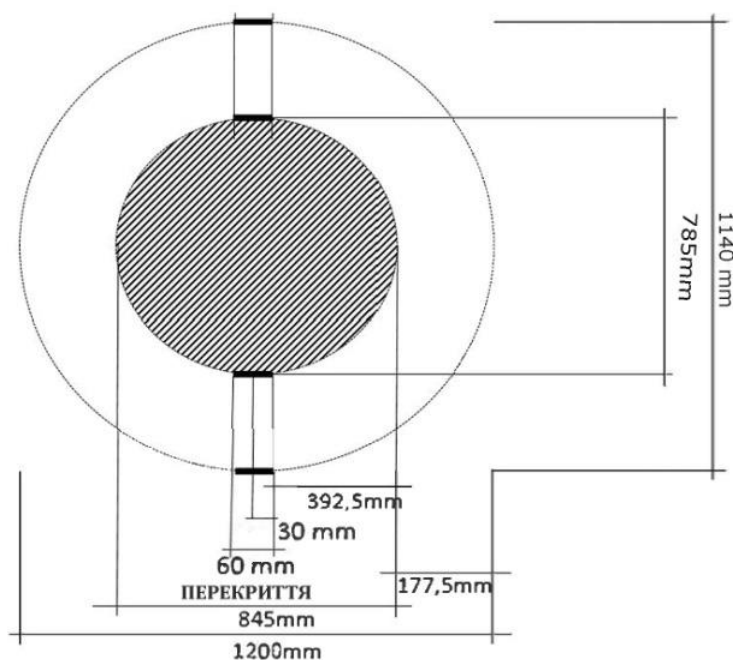


Рисунок Б.12 – Армуюча геогратка Adfors GlasGrid® PM100. Зовнішній вигляд



а) вигляд в плані (внутрішній діаметр для каналізаційного люку може бути 685 мм, 785 мм або виготовлятися під конкретний розмір люку)



б) конструкція дорожнього одягу при армуванні асфальтобетонного шару при ремонті навколо каналізаційних люків

Рисунок Б.13 – Схема армування асфальтобетонних шарів при ремонті навколо каналізаційних люків



Рисунок Б.14 – Ремонт каналізаційного люку з застосуванням армуючої геогратки Adfors GlasGrid® PM100
(Оболонський район м.Києва, травень 2019 року)

ДОДАТОК В

ЗАХОДИ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ДОРОЖНЬОГО ОДЯГУ З ПОПЕРЕЧНИМИ ТРІЩИНАМИ В АСФАЛЬТОБЕТОННОМУ ПОКРИТТІ

В.1 Удосконалення технології влаштування армованого асфальтобетонного покриття

Перед використанням АСМ для армування асфальтобетону необхідно здійснити процедуру оцінки впливу технологічних та транспортних факторів на циклічну довговічність армуючої сітки згідно з СОУ 42.1-37641918-107:2013 Синтетичні матеріали для армування асфальтобетонного покриття. Оцінка довговічності при циклічному навантаженні

Технологія виконання робіт з застосуванням армування асфальтобетонного покриття сіткою повинна відповідати загальним вимогам, встановлених для асфальтобетонних шарів діючим ДБН В.2.3-4 “Автомобільні дороги”. Крім того додатково необхідно враховувати деякі особливості, пов’язані з виконанням армування синтетичною сіткою. Ці особливості відносяться до наступних питань:

- транспортування і складування сіток;
- підготовка основи під сітку;
- контроль за відповідністю розмірів щебеню, що застосовується для приготування асфальтобетонної суміші типу сітки, що влаштовується;
- влаштування сітки;
- особливості влаштування асфальтобетону при його армуванні сіткою;
- контроль якості робіт, пов’язаних з армуванням асфальтобетону.

Сітка поставляється на будівництво в рулонах.

Завантаження, розвантаження і складування рулонів виконується вручну або з застосуванням засобів малої механізації. При цьому повинні бути прийняті заходи по захисту рулонів з сітками від механічних пошкоджень. Рулони допускається вкладати один на одного не більше 3-х рулонів, при чому для запобігання деформування вони повинні розташовуватись паралельно один одному. При зберіганні матеріал не повинен піддаватися тривалій дії ультрафіолетового випромінювання. В наслідок цього тривале зберігання сіток повинно здійснюватись, як правило, в закритих приміщеннях. У випадку

зберігання на відкритих майданчиках необхідно забезпечити захист штабелів рулонів від сонячного опромінювання.

Підготовка основи повинна забезпечити:

- якісну укладку сітки без її згинів і деформації;
- добре зчеплення армуючого шару з шаром основи.

Для цього основа не повинна мати нерівності (западини, вступу) розміром більше 10 мм. Для забезпечення доброго зчеплення верхнього шару асфальтобетону з нижнім шаром сітка повинна вкладатись на підготовлену основу. Для цього необхідно виконати підґрунтовку перед влаштуванням сітки з бітумної емульсії, що швидко розпадається в кількості 0,6 кг/м².

Бітумна емульсія перед влаштуванням асфальтобетонної суміші повинна розпастися, а емульгатор і вода випаруватися. Характерна риса, що свідчить про розпад є зміна її кольору від коричневого до чорного.

З метою забезпечення гарного зв'язку між шарами асфальтобетону, що знаходиться по обидві сторони сітки, необхідно, щоб розмір частин кам'яного заповнювача в асфальтобетоні, що влаштовується в першому шарі над сіткою не перевищував 16 мм.

Сітка розкочується по підготовленій основі рівно, без хвиль шляхом її розмотування з рулону. Полотна сітки слід розкочувати паралельно поздовжній осі. Полотна сітки вкладаються внахлист, так щоб смуги перекривались в поздовжньому напрямку приблизно на 15 см і в поперечному на 25 см. Для запобігання зсуву сіток при вкладанні асфальтобетону кінець однієї смуги сітки повинен накривати зверху початок наступної смуги в напрямку руху асфальтоукладальника. В поперечному напрямку до осі стики повинні бути рознесені – не повинні знаходитись в одному створі. Поздовжні стики не слід розташовувати по лінії вірогідної максимальної дії коліс при русі транспортних засобів. На поворотах сітка розрізається на секції, які вкладаються внахлист у відповідності з радіусами повороту. В місцях люків і колодязів в сітках необхідно вирізати відповідні отвори. По вкладеній сітці до влаштування

асфальтобетонного шару не допускається рух будівельних механізмів і автотранспорту.

При вкладанні асфальтобетону необхідно враховувати особливості, пов'язані з наявністю сітки, за якою повинна бути розподілена асфальтобетонна суміш. Товщина шару, що влаштовується на сітці асфальтоукладальником, повинна бути не менше 5 см. При укладанні вручну – товщина шару може бути 4 см. Влаштування гарячої асфальтобетонної суміші по сітці повинно виконуватись безпосередньо після влаштування сітки в суху погоду при температурі навколишнього повітря не нижче 100С. Температура асфальтобетонної суміші при влаштуванні дорожнього покриття повинна бути в межах 160-185 °С

Шви у вкладеному шарі асфальтобетонного покриття не повинні співпадати з стиками у вкладених сітках.

Влаштування тріщиноперериваючих прошарків з використанням рулонних матеріалів „СПОЛІмост” виробництва Славутського руберойдового заводу, що відповідають вимогам ТУ У 26.8 – 00292787.005 – 2004 „Матеріали бітумно-полімерні для транспортного будівництва” виконується в наступному порядку.

Поверхня, де влаштовуються тріщиноперериваючі прошарки, повинна мати проектний поперечний ухил.

Перед початком робіт по влаштуванню тріщиноперериваючих прошарків необхідно ретельно очистити поверхню від бруду та пилу, вона не повинна мати гострих кутів, вибоїн та нерівностей, а також повинна бути сухою (вологість, не повинна перевищувати 4 %).

Перед укладанням кожний рулон матеріалу необхідно розгорнути на місці його наклеювання згідно напрямку укладання та відрізати за розмірами.

Потім приклеїти кінці всіх рулонів з однієї сторони і згорнути матеріал знову в рулони. Рулони матеріалу для зручності робіт з ними і забезпечення якості приклеювання тріщиноперериваючих прошарків повинні бути не сплюсненими, близькими до круглих. Сплюснені рулони належить перемотати.

Влаштування тріщиноперериваючих прошарків із матеріалу „СПОЛІмост” виконують шляхом його наклеювання на поверхню, оплавляючи нижню поверхню рулону полум’ям повітряно-газового пальника з одночасним підігрівом поверхні основи, повільно розкочуючи рулон і притискаючи його до основи. Невеликий витік мастики в місці з’єднання рулону з основою свідчить про правильний режим укладання. Велика кількість маси, що витікає, а також поява диму вказують на перегрів матеріалу. Поліетиленова плівка на нижній поверхні матеріалу повинна бути повністю розплавлена разом з бітумною масою.

Полотнища, що наклеюються, не повинні мати зморшок, складок, хвиль. Для якісного приклеювання тріщиноперериваючих прошарків по всій поверхні та уникнення дефектів, полотнища накатують м’якими щітками або валиками, рух яких повинен бути від осі рулону по діагоналі до країв. Особливо ретельно пригладжують кромки матеріалу.

Наявність пухирів, що може бути викликана надмірною вологістю поверхні або надлишковою масою ґрунтовки, свідчить про неякісне приклеювання тріщиноперериваючого прошарку до основи. У таких місцях роблять надрізи навхрест, відгинають неприклеєні кінці матеріалу, оплавляють їх і приклеюють. Зверху це місце перекривають латкою з накладкою 100 мм поза межами розрізу.

Допускається не більше трьох латок на 100 м².

Для наклейки тріщиноперериваючих прошарків застосовують газ пропан з витратою 0,3-0,6 л/м² в залежності від температури повітря. Розігрів роблять одно- або багатосмолоскиповими пальниками.

При проведенні робіт необхідно вжити заходів для попередження попадання на рулонний матеріал масла, бензину, дизельного палива та інших розчинників. У випадку, коли такі речовини потрапили на поверхню тріщиноперериваючих прошарків, ушкоджену ділянку вирізають і роблять латку.

По тріщиноперериваючих прошарках не допускається рух транспортних засобів, крім технологічних, для влаштування захисного шару. Не допускається різке гальмування та розворот транспорту.

Колеса транспортних засобів, що переміщуються по тріщиноперериваючих прошарках, повинні бути вільні від металу, каміння, дерева чи бруду.

Значення температури матеріалів, що укладаються поверх тріщиноперериваючого прошарку не повинно перевищувати значення температури теплостійкості рулонного матеріалу за сертифікатом виробника більше ніж на 20 °С.

Ущільнення починають після зниження температури матеріалу, розподіленого поверх тріщиноперериваючого прошарку, до температури на 10 °С нижче за значення температури теплостійкості рулонного матеріалу за сертифікатом виробника. Ущільнення виконують гладковальцевим котком спочатку легким, а потім середнім.

На початку ущільнення швидкість котка повинна бути 1,5-2 км/год, а після 5-6 проходів по одному сліду її потрібно збільшити для моторних котків з гладкими вальцями до 3-5 км/год.

В процесі ущільнення після 2-3 проходів котка потрібно перевірити поперечний похил і рівність покриття шаблонами – трьохметровою рейкою чи рейкою на двох опорах з пристосуванням для фіксації нерівностей, а виявлені дефекти негайно виправляти.

Рівність основи та її шорсткість перевіряють трьохметровою рейкою. Рейку вкладають на поверхню шару в поздовжньому і поперечному напрямках та заміряють зазори по довжині, заокруглюючи виміри до 1 мм.

Просвіти під трьохметровою рейкою повинні бути тільки округлі і не більше одного на 1 м. Максимальна глибин просвіту не повинна перевищувати 5 мм.

В.2 Відновлення монолітності асфальтобетонного покриття нежорсткого дорожнього одягу після утворення температурних тріщин

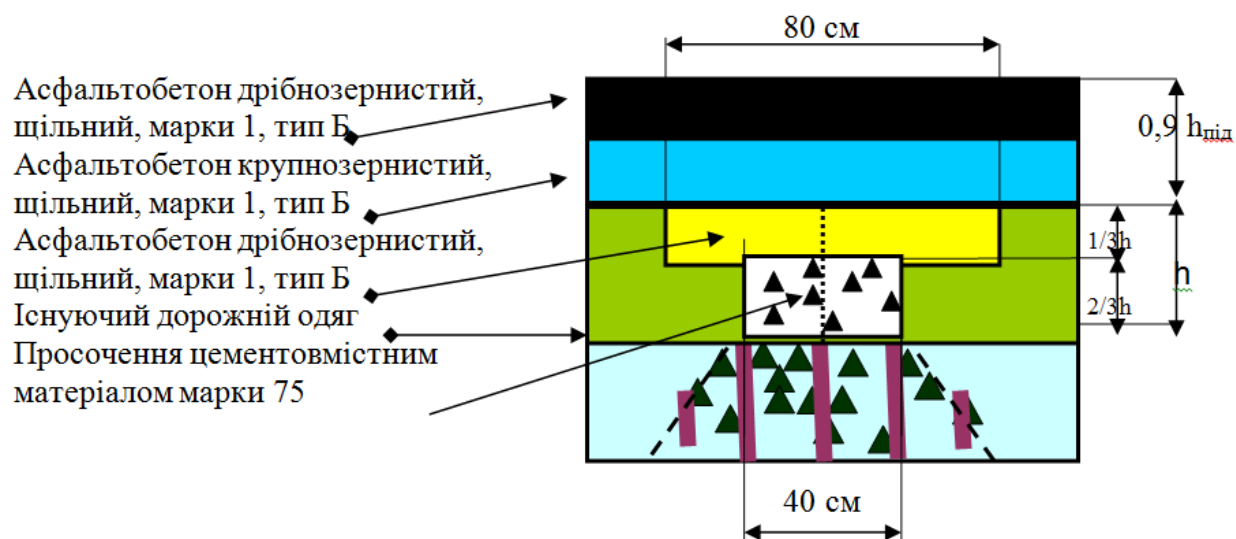


Рисунок В.1 – Конструкція дорожнього одягу в зоні поперечної тріщини з наявними руйнуваннями у вигляді вибоїн, просядок, обломів, розтріскування в зоні тріщини

ДОДАТОК Г
ДОВІДКИ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОЗРОБОК



Державне агентство автомобільних доріг України
(УКРАВТОДОР)

Служба автомобільних доріг у Харківській області

61202 м. Харків, вул. Ахсарова, 2

тел. (057) 336-83-28,
факс (057) 336-80-55
E-mail: kh_sad@ukravtodor.gov.ua

“ 02 ” 07 2019 р. № 1380/05

Д О В І Д К А
про впровадження наукових розробок дисертаційної роботи
Густелева Олександра Олександровича

Наукові розробки та практичні рекомендації дисертаційних досліджень О.О. Густелева щодо ремонту автомобільних доріг з асфальтобетонним покриттям, що мають поперечні температурні тріщини, були впроваджені на автомобільних дорогах Харківської області. Зокрема, було застосовано методику оцінювання характеру розтріскування та обґрунтування вибору технології і механізмів для герметизації поперечних тріщин.

Безпосередньо наукові розробки було впроваджено на об'єктах:

- автомобільна дорога М-03 Київ-Харків-Довжанський (км 472 – км 516);
- автомобільна дорога М-29 Харків-Красноград-Перещепине (км 50 - км 68);
- автомобільна дорога М-20 Харків-Щербаківка (км 10 – км 38).

Начальник
Служби автомобільних
доріг у Харківській області



Є.М. Зражевець



ДЕРЖАВНЕ АГЕНТСТВО АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ УКРАЇНИ
(УКРАВТОДОР)

Державне підприємство

«Державний дорожній науково-дослідний інститут імені М.П. Шульгіна»
ДП «ДерждорНДІ»

03113, м. Київ,
проспект Перемоги, 57
код ЄДРПОУ 03450778



тел/факс (044) 456-34-15
e-mail: dornauka@dorndi.org.ua
www.dorndi.org.ua
www.facebook.com/dorndi/

04.07.2019 № 19.1-14-704

на № _____ від _____

**Довідка про впровадження
наукових розробок дисертаційної роботи
Густелева Олександра Олександровича**

Даною довідкою підтверджується, що результати досліджень дисертаційної роботи О.О. Густелева були використані при удосконаленні методики дослідження стану автомобільних доріг з асфальтобетонним покриттям, що має поперечні тріщини. Безпосередньо було враховано запропоновану дисертантом класифікацію поперечних тріщин.

Директор

Стасюк Б.О.
(044) 201-08-48



А.О. Безуглий

015074



УКРАВТОДОР
СЛУЖБА АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ У КИЇВСЬКІЙ ОБЛАСТІ

вул. Народного ополчення, 11-А, м.Київ, 03151,

тел.(044) 249-86-95, факс (044) 200-04-70

e-mail: kievoad@ukr.net, веб-сайт: <http://kiev.ukravtodor.gov.ua>, код ЄДРПОУ 26345736

04.07.19 № 08с/2290 на № _____ від _____

Д О В І Д К А
про впровадження наукових розробок дисертаційної роботи
Густєєва Олександра Олександровича

Результати досліджень дисертаційної роботи О.О. Густєєва, а саме розроблені вимоги до герметизуючих матеріалів для ремонту асфальтобетонного покриття, що має поперечні тріщини, було впроваджено на таких об'єктах ремонту автомобільних доріг Київської області:

- автомобільна дорога Р-01 Київ-Обухів на ділянці 0+000 - км 36+310;
- автомобільна дорога Р-03 Північно-Східний обхід м.Києва на ділянці км 0+000 - км 26+400.

Начальник



В.Р. Козак

ДОВІДКА

про впровадження дисертаційних розробок
здобувача наукового ступеня кандидата технічних наук
Густелєва Олександра Олександровича

Результати дисертаційних досліджень О.О. Густелєва знайшли використання при опрацюванні верифікаційних звітів Ініціативи з прозорості інфраструктури CoST, у межах яких були проведені дослідження і оцінювання якості проектних рішень та підрядних робіт на автомобільних дорогах з асфальтобетонним покриттям.

Директор Національного
Секретаріату CoST



Н. Форсюк

BUCHER
municipal

To whom it may concern

Datum: 16.07.2019

BESTÄTIGUNG

über die Umsetzung von Forschungsergebnissen der Doktorarbeit von Gustieliev Oleksandr Oleksandrovych.

Die Forschungsergebnisse von Gustieliev O.O., die in wissenschaftlichen Schriften veröffentlicht worden sind, werden in der Tätigkeit der Fa. BUCHER Municipal, vor allem bei der Überprüfung der Ausrüstung, umgesetzt.

Mit freundlichen Grüßen
Bucher Municipal AG

Bucher Municipal AG
Mürzlenstrasse 80
CH-8106 Niederweningen



BUCHER
municipal

Зацікавленим особам

Дата: 16.07.2019

ДОВІДКА

про впровадження наукових розробок дисертаційної роботи Густєльєва Олександра
Олександровича

Результати дисертаційних досліджень Густєльєва О.О., що викладені в наукових публікаціях,
отримали впровадження в діяльності фірми BUCHER Municipal, зокрема, під час випробування
обладнання.

3 пошаною

BUCHER Municipal AG (Підпис)

Штамп:
BUCHER Municipal AG
Murzlenstrasse 80
CH-8166 Niederweningen



July 1, 2019

Re: Mr. Oleksandr Gustieliev pavement maintenance research and practical work

Dear Sir/Madam,

The results of the dissertation research by Mr. Oleksandr Gustieliev and evaluation of practical work experience related to minimizing formation of cracking on asphalt concrete pavements on large city street, show high efficiency of the system of rehabilitation of cracks of different degrees of closure to achieve more durable and longer lasting pavement suitable for use in large cities.

We have used the results of Mr. Gustieliev's practical work experience to implement successful crack treating systems in several large cities in Eastern Europe and Ukraine.

Sincerely,

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "C. Grady", written in a cursive style.

Charles Grady
Vice President – Crafco International Group



A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Lois Meyer", written in a cursive style.



Straßmayr Sp. z o.o.
ul. Okrężna 14, Wysogotowo
62-081 Przeźmierowo
NIP: 777 315 58 20

tel: +48 61 8 680 166
fax: +48 61 8 680 235
www.strassmayr.com
office@strassmayr.com



ZAŚWIADCZENIE

o wprowadzeniu do przemysłu osiągnięć naukowych pracy doktorskiej

Gustieliev Oleksandr Oleksandrovich

Wyniki badań dysertacji Gustieliev O.O., zaprezentowane w publikacjach naukowych, znalazły zastosowanie w działalności firmy Straßmayr Sp. z o.o., w szczególności podczas testowania maszyn do naprawy nawierzchni drogowej.

Prezes Zarządu

PREZES ZARZĄDU

Ryszard Sowa

Straßmayr Sp. z o.o.
62-081 Przeźmierowo
Wysogotowo, ul. Okrężna 14
tel. 61/868 01 66 fax 61/868 02 35
NIP 777 315 58 20

ДОДАТОК Д
СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ТА
ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

Монографії:

1. Густелєв О.О., Гуляєв В.І., Гайдачук В.В., Мозговий В.В., Заєць Ю.О., Шевчук Л.В., Шлюнь Н.В. Термопружний стан багатошарових дорожніх покриттів : монографія. К.: НТУ, 2019. 252 с.

Статті у виданнях іноземних держав або у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз:

2. Густелєв О.О., Гайдачук В.В., Радкевич А.В., Шевчук Л.В., Шлюнь Н.В. Термонапружене деформування шаруватого покриття на вгнутій ділянці дороги // Опір матеріалів і теорія споруд : наук.-техн. збірник. 2019. Вип. № 102. С. 180-190.

3. Густелєв А.А., Мозговой В.В., Шевчук Л.В. Анализ механизма подкрепления армирующей сеткой многослойного покрытия // Вестник КаздорНИИ : научно-практ. журнал. 2019. №1-2 (61-62). С. 141-148.

4. Густелєв О.О. Оцінювання ефективності герметизуючих матеріалів при ремонті асфальтобетонного покриття з поперечними тріщинами // Галузеве машинобудування, будівництво : зб. наук. праць. 2019. Вип. № 1 (52). С. 166-169.

Статті у фахових виданнях:

5. Густелєв О.О., Осипов В.О. До питання вибору матеріалів для влаштування горизонтальної дорожньої розмітки на окремих ділянках вулично-дорожньої мережі // Нові технології в будівництві : наук.-техн. журнал. 2018. Вип. № 34. С. 47-49.

6. Густелєв О.О., Мозговий В.В., Гайдачук В.В., Заєць Ю.О., Шевчук Л.В., Куцман О.М. Механічні ефекти і парадокси явищ термопружного напруження в конструкціях дорожніх одягів // Дороги і мости : зб. наук. праць. 2018. Вип. № 18. С. 128-145.

7. Густелєв О.О., Гайдачук В.В., Мозговий В.В., Шевчук Л.В. Аналіз деформування дорожнього покриття на металевій плиті Південного моста // Промислове будівництво та інженерні споруди : наук.-виробн. журнал. 2019. № 1. С. 31-38.

8. Густелєв О.О., Гуляєв В.І., Мозговий В.В., Шлюнь Н.В., Куцман О.М., Баран С.А. Дослідження напружено-деформованого стану дорожнього одягу з укріпленою основою під поперечними тріщинами і швами // Вісник НТУ. Серія «Технічні науки»: наук.-техн. збірник. 2019. Вип. № 1 (43). С. 26-38.

Опубліковані праці апробаційного характеру:

9. Густелев А.А., Кияшко И.В. Концепция совершенствования технологии ремонтов слоев дорожных одежд на основе органических вяжущих. Современные технологии и материалы в дорожном строительстве : материалы международной научно-практической конференции. Харьков: 2006. С. 68-70.

10. Густелєв О.О., Жданюк В.К. On the issue of repair technique of asphalt pavements with through-the-thickness temperature cracks (04.10.2006 – 06.10.2006). Warszawa : I Polski kongres dogowy, 2006. С. 485-490.

11. Густелев А.А., Титарь В.С., Мартымянов С.В. Основные причины трещинообразования на асфальтобетонных покрытиях и пути их устранения. Научные исследования наносистемы и ресурсосберегающие технологии в стройиндустрии : мат. XVIII междун. наук.-практ. конф. (18.09.2007 – 19.09.2007 р.). Белгород, 2007. С. 144-149.

12. Густелев А.А., Кияшко И.В., Минаков О.С. Повышение трещиностойкости асфальтобетонных дорожных покрытий. Эффективные материалы, технологии, машины и оборудование для строительства и эксплуатации современных транспортных сооружений : мат. междун. наук.-практ. конф. молодых ученых (03 – 04 декабря 2009 г.). Белгород, 2009. С. 144-149.

13. Густелєв О.О., Осипов В.О. Вивчення впливу підвищених пішохідних переходів на курсову стійкість автомобілів. Новітні технології в автомобілебудуванні, транспорті і при підготовці фахівців : наук. праці міжн. наук.-практ. та наук.-метод. конф., присв. 85-річчю кафедри автомобілів з Дня народж. проф. А. Б. Гредескула (20 – 21 жовтня 2016 р., м. Харків). Харків, 2016. С. 76.

14. Густелєв О.О., Осипов В.О. Щодо впливу штучних нерівностей покриття автодоріг на курсову стійкість автомобілів. Створення, експлуатація і

ремонт автомобільного транспорту та будівельної техніки : мат. всеукр. наук.-техн. конф. (26 – 27 квітня 2017 р., м. Полтава). Полтава, 2017.

15. Густелєв О.О., Осипов В.О. Огляд інженерних рішень, які спроможні мінімізувати аварійність за участю автомобільного транспорту. Автомобільний транспорт і автомобілебудування. Новітні технології і методи підготовки фахівців. (19 – 20 жовтня 2017 р., м. Харків). Харків, 2017. С. 81-82.

16. Густелєв А.А., Гайдайчук В.В., Мозговой В.В., Шевчук Л.В., Шлюнь Н.В. Термонапряженное состояние дорожных покрытий. Сучасні методи і проблемно-орієнтовані комплекси розрахунку конструкцій і їх застосування у проектуванні і навчальному процесі: III міжн. наук.-практ. конф. (24 – 25 вересня 2019 р., м. Київ). Київ, 2019.

Свідоцтва та патенти:

17. Патент України на корисну модель № 113145 Україна, МПК (2017.01), E01F9/00. Спосіб влаштування горизонтальної дорожньої розмітки на проїзdnій частині доріг та вулиць / Густелєв О.О. Дата реєстрації 10.01.2017 р.

18. Патент України на корисну модель № 118040 Україна, МПК (2017.07), E01C23/14. Спосіб плавлення снігу на стаціонарному снігоплавильному пункті за допомогою умовно теплих господарсько-побутових вод / Густелєв О.О. Дата реєстрації 25.07.2017 р.

Опубліковані праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

19. Густелєв А.А., Кияшко И.В., Стороженко М.С. Влияние сквозных поперечных трещин на условия службы дорожных конструкций // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво: наук.-техн. збірник. 2004. Вип. № 71. С. 36-39.

20. Густелєв О.О., Стороженко М.С., Кияшко І.В. Формування однорідної якості асфальтобетону в залежності від параметрів і режимів технологічного процесу // Дороги і мости : зб. наук. праць. 2006. Вип. № 5. С. 305-311.