

Національний авіаційний університет
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ШАО Мейюй

УДК: 625.85

ДИСЕРТАЦІЯ

**ВИКОРИСТАННЯ ФІБРИ ІЗ ЗОЛИ ВІНОСУ ТЕПЛОВИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ
КИТАЮ В СУЧАСНИХ АСФАЛЬТОБЕТОННИХ СУМІШАХ**

192 Будівництво та цивільна інженерія
19 Архітектура та будівництво

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело



ШАО Мейюй

Науковий керівник

Марія Сергіївна Барабаш
доктор технічних наук, професор

Київ-2024

АНОТАЦІЯ

Шао Мейюй. Використання фібри із золи виносу теплових електростанцій Китаю в сучасних асфальтобетонних сумішах. Кваліфікаційна наукова робота з прав на рукописи.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 192 Будівництво та цивільна інженерія (19 Архітектура та будівництво). - Національний авіаційний університет МОН України, Київ, 2024.

Звичайні асфальтобетонні дороги (наприклад, в Україні) стикаються з передчасним руйнуванням через чутливість асфальту до погодних умов і транспортних навантажень. Це зумовлює потребу у дорожньому та передчасному ремонті.

Основна мета цієї дисертації - дослідити можливість покращення експлуатаційних характеристик асфальтобетону з використанням волокон золи-виносу з теплових електростанцій Китаю. Будучи недорогим та екологічно безпечним матеріалом, волокна золи-виносу забезпечують ефективну стратегію реагування на проблеми довкілля.

Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, загального висновку, списку використаних джерел і додатка.

У вступі надається загальний опис дослідження, зокрема демонструється актуальність обраної теми, зв'язок з науковою програмою, мета, об'єкт і предмет дослідження тощо.

Перший розділ дисертації присвячений огляду досліджень та існуючих напрацювань щодо волокон золи-виносу, а також гарячого литого, холодного литого, та епоксидного асфальтобетону. Як і в більшості країн, фактичний термін служби асфальтобетонних покриттів в Україні є нижчим за нормативний, що, безумовно, призводить до значних економічних витрат на будівництво нових доріг чи ремонт існуючих. Асфальт як термопластичний матеріал є чутливим до транспортних навантажень і кліматичних факторів, що швидко призводить до появи дефектів покриття, таких як тріщини та вибоїни. Зазвичай проблему дефектів асфальтобетону

можна попередити шляхом правильного добору (проектування) компонентів асфальтобетонної суміші. У цій дисертації розглядаються три типи асфальтобетону, модифіковані щодо наявних різновидів, які вже були застосовані на практиці з відмінними результатами. Литий асфальтобетон є будівельним матеріалом, який використовується для влаштування та ремонту дорожніх покриттів. За високих температур він відзначається високою плинністю, є водонепроникним і не потребує ущільнення. Гарячий литий асфальтобетон має добру довговічність і еластичність; він може витримувати тиск важкого транспорту і водночас зберігає певну еластичність у разі зміни температури, що знижує ризик утворення тріщин. Литий асфальт широко використовується на автомагістралях, міських дорогах, паркувальних майданчиках, злітно-посадкових смугах аеропортів та інших наземних поверхнях. Його також часто застосовують для покриття мостів і деяких промислових підлог, де потрібна висока стійкість до стирання.

Асфальтобетон холодного литого укладання дозволяє швидко відкривати відремонтовані ділянки та має значні переваги за вартістю. Не потребуючи високих температур, він може зберігатися і транспортуватися за кімнатної температури, що робить логістику доступнішою та економічнішою. Це дає змогу заощаджувати енергію та зменшувати викиди парникових газів.

Додавання епоксидних смол значно покращує властивості та збільшує термін служби асфальту, утворюючи епоксидний асфальтобетон. У порівнянні зі звичайним асфальтобетоном, епоксидний варіант характеризується вищою стійкістю до стирання, що робить його придатним для доріг та злітно-посадкових смуг аеропортів із інтенсивним рухом. Незважаючи на те, що епоксидний асфальт є дорожчим за традиційний, він зазвичай служить значно довше, зменшуючи частоту ремонтів та замін. Це забезпечує економічні переваги використання епоксидного асфальту протягом усього життєвого циклу дорожнього покриття. На відміну від звичайного асфальту, епоксидний асфальтобетон потребує певного часу для затвердіння.

Дослідження засвідчили, що добавки волокон можуть суттєво покращити фізико-механічні властивості асфальту. У цій дисертації ми використовуємо зольні

волокна з китайської теплоелектростанції, створені за зразком базальтових волокон. Також вивчаємо можливість модифікації гарячого литого асфальтобетону, холодного литого та епоксидного асфальтобетону за допомогою контрольованих експериментів.

У другому розділі дисертації розглядаємо застосування трьох типів асфальтобетону: Гарячий литий асфальтобетон переважно застосовується для грубої обробки тонких покриттів та існуючих поверхонь з асфальту та цементобетону. Виробництво та укладання такого матеріалу вимагає суворого дотримання робочих температур і досягнення оптимальних співвідношень асфальту та мінерального пилоподібного наповнювача. За умови дотримання технології гарячий литий асфальтобетон може використовуватися не лише для відновлювальних робіт, але й як якісний зносостійкий покривний шар із терміном служби понад 20 років. Холодний литий асфальтобетон широко використовується на велосипедних доріжках, в аеропортах та паркових зонах. Для нього притаманні високі експлуатаційні характеристики, екологічність та низька вартість. Ключовим показником для даного матеріалу є коефіцієнт зчеплення. У цьому розділі досліджуються асфальт, емульгатори та полімерні модифікатори, які суттєво впливають на цей показник. Вчені погоджуються, що важкі нафтопродукти з високим вмістом смол, низьким вмістом парафіну і значною кількістю нафтенароматичних вуглеводнів найкраще підходять для технології холодного лиття асфальтобетону.

Проте такі продукти є дуже дорогими через труднощі їх видобутку. Застосування модифікованого бітуму дозволяє використовувати окислений асфальт та поверхнево-активний щебінь. Для покращення міцності зчеплення холодного литого асфальтобетону пропонується два ключових способи: використання спеціальних емульгаторів, полімерних добавок або реакційних наповнювачів у складі асфальтових емульсій, або застосування полімерних модифікаторів для підвищення експлуатаційних характеристик існуючих на ринку типів емульсій. На додаток, дослідження довело можливість використання інден-кумаронової смоли як модифікатора для підвищення температури розм'якшення асфальту та його адгезії

до мінеральних матеріалів. Епоксидний асфальтобетон: епоксидні смоли та затверджувачі формують жорстку полімерну мережу, яка з моменту її появи демонструє відмінні технічні характеристики при застосуванні у інженерних цілях. Активні дослідження епоксидного асфальту проводилися в ряді країн світу, підтвердивши його вищу механічну міцність, кращу хімічну стійкість та менші втрати маси внаслідок зносу. Для модифікації асфальту використовуються в основному фізичні та хімічні методи. Серед різноманітних варіантів особливо ефективним вважається введення волокон з високими механічними властивостями для забезпечення покращених міцносних характеристик асфальтобетонних композитів.

Розділ 3 присвячений вихідним характеристикам матеріалів для експериментального обладнання та дослідження трьох типів асфальтобетону, що використовуються у дослідках. Для гарячого литого асфальтобетону ми застосували щебінь габро розміром 5-20 мм, подрібнений і відсіяний гранітний пісок, вапняковий мінеральний порошок МП-1 та асфальт БНД 100/150. Для холодного литого асфальтобетону використали камінь, мінеральний порошок і воду відібрані відповідно до національних стандартів, а також нетрадиційні модифікатори: $Al_2(SO_4)_3$ та емульгатор Redicote зі Швеції. Для приготування епоксидного асфальтобетону були взяті асфальт БНД 50/70 від "Укртатнафти", гранітний камінь, мінеральний порошок за національними стандартами, епоксидна смола CHS-EPOXY з Чехії, затверджувач Telalit та інші. Крім того, до всіх трьох типів асфальтобетону додавалися зольні волокна з китайської ТЕС, їх параметри також було зазначено. Даний розділ також описує експерименти з визначення глибини проникнення голки, температури розм'якшення, температури крихкості, гнучкості та сумарної поверхневої активності асфальтового каменю. Усі аналізи проводяться згідно з українськими національними стандартами.

Розділ 4 дисертації зосереджується на принципах взаємодії матеріалів у модифікованому литому асфальтобетоні та епоксидному асфальтобетоні. Відбувається певна хемосорбція між активними частинками золи, асфальтенами та асфальтовими смолами, що покращує адгезійні властивості асфальту до

мінеральних матеріалів. Ми також протестували чотири первинних асфальти (два дистильованих і два окиснених) і один модифікований асфальт. Дані свідчать про те, що структурна класифікація асфальтів за критеріями ГХС та індексом $K_{ста}$ не завжди дає послідовні результати. Окиснений асфальт за допомогою модифікації може демонструвати гарні властивості при приготуванні асфальтових емульсій, що потенційно зменшує витрати. У цьому розділі також зазначено міцність зчеплення холодного литого асфальтобетону, яка може використовуватися для перевірки ефективності емульсій. Що стосується епоксидного асфальтобетону, визначення вмісту асфальтенів дозволяє продемонструвати значне збільшення концентрації полімерних сполук асфальтенів і агломератів, утворених з епоксидних смол, волокон і молекул асфальтенів.

Епоксидні групи можуть вступати в реакцію зшивання з такими функціональними групами як карбонові кислоти, гідроксили або аміни в асфальтені. Дана реакція формує більш стабільну сітчасту структуру, що посилює механічну міцність і термостабільність матеріалу. Одночасне додавання епоксидної смоли та волокон у масовій частці понад 2,0% збільшує енергію активації асфальту завдяки агрегації добавок, що призводить до утворення розширеної надмолекулярної структури. Проведені випробування на старіння асфальту також засвідчили, що модифікований асфальт має меншу втрату маси. Розширення пластичного інтервалу бітуму з додаванням епоксидних смол і волокон можна пояснити збільшенням вмісту ароматичних сполук в елементному складі бітумної групи, що є результатом утворення структурних зв'язків між частинками зольних волокон і вільними функціональними групами бітуму. У модифікованого бітуму також покращилися його зв'язуючі властивості та зросла робота адгезії (з 0,43 до 0,60) після додавання епоксидної смоли та зольних волокон.

Розділ 5 дисертації присвячений випробуванням литого асфальтобетону та епоксидного асфальтобетону, модифікованого зольними волокнами. Проведено низку експериментів для підбору складів сумішей та визначення фізико-механічних властивостей, стійкості до зсуву та втрат маси внаслідок зносу кожного бетону. Варто відзначити, що модифікований гарячий литий асфальтобетон виявився менш

чутливим до температурних змін, а отже, більш стійким до нагрівання та утворення тріщин. Показники міцності асфальтобетону після додавання зольних волокон також значно зросли. Також проводилась перевірка здатності модифікованого асфальтобетону протистояти деформаційним навантаженням за низьких температур. Оновлений асфальтобетон продемонстрував добрі результати при температурі -5°C , перевершуючи вихідний асфальтобетон в середньому на 30%. Крім того, додавання зольних волокон з китайської ТЕС зробило структуру литого асфальтобетону щільнішою, що сприяло підвищенню водостійкості покриття.

Для холодного литого асфальтобетону, де велике значення має швидкість набору міцності зчеплення, у ході контрольованих експериментів підтверджено, що $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ та зольні волокна з китайської ТЕС можуть використовуватися як добавки з гарними експлуатаційними характеристиками. Зокрема, можливе відкриття руху зі швидкістю до 40 км/год вже через 1-1,5 години, а критерій нелімітованої швидкості досягається за 3 години. В ході випробувань асфальтобетон з $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ та зольними волокнами також продемонстрував поліпшені адгезію та когезію. Висока ефективність використання $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ має велике значення для зниження собівартості модифікованого холодного литого асфальтобетону. У розділі 5 ми експериментально показали, як набирає міцність епоксидний асфальтобетон. Експериментальним шляхом також підтверджено, що асфальт з епоксидною смолою та волокнами має міцнішу адгезію до заповнювача (збільшення на 32% порівняно з вихідним асфальтобетоном), нижчу температурну чутливість (збільшення коефіцієнта температурної чутливості на 23-28%), вищу міцність та кращу стійкість до зсуву (стійка до колієутворення майже втричі краща через 42 дні). На підставі контрольованих випробувань найкращим вважається склад добавок з 3,5% епоксидної смоли та 4,0% волокон. Насамкінець, запропоновано метод приготування та технічний опис епоксидного асфальту.

Підсумовуючи, у дисертації доведено, що зольні волокна з китайської ТЕС значно покращують експлуатаційні якості трьох типів асфальтобетону. Використання такого матеріалу вважається екологічно та економічно доцільним, через що варто розглянути можливість його широкого застосування.

Ключові слова:

Асфальтове в'язуче, продукти згоряння вугілля, зола, зольні волокна, модифікуючі добавки, композити, асфальтобетон, бетон, модифіковані бетонні матеріали, ремонт покриття, дорожнє покриття, емульгований асфальт, метод модифікації бетону, транспортно-експлуатаційні умови, аеродромне покриття

ABSTRACT

Shao Meiyu. The use of fiber from the fly ash of thermal power plants in China in modern asphalt concrete mixtures. Qualifying scientific work on manuscript rights.

Dissertation for obtaining the scientific degree of Doctor of Philosophy in specialty 192 Construction and Civil Engineering (19 Architecture and construction). - National Aviation University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2024.

Conventional asphalt concrete roads (e.g., Ukraine) face early deterioration due to the sensitivity of asphalt to weather and traffic loads. This condition means expensive and premature repairs.

The main purpose of this dissertation is to explore the possibility of improving the performance of asphalt concrete using fly ash fibers from thermal power plants in China. As a low-cost and environmentally friendly material, fly ash fiber provides an effective environmental response strategy.

The dissertation includes an introduction, five chapters, a general conclusion, a list of references, and an appendix.

The introduction provides a general description of the research, particularly demonstrating the relevance of the chosen topic, the connection with the scientific program, the purpose, object, and subject of the study etc..

The first chapter of the dissertation focuses on the research background and related existing studies on fly ash fibers and hot cast, cold cast, and epoxy asphalt concrete. As in most countries, the actual service life of asphalt concrete pavements in Ukraine is lower than the standard service life, which undoubtedly entails substantial economic costs for building new roads or repairing existing ones. Asphalt, as a thermoplastic material, is sensitive to transportation loads and climatic factors, quickly leading to defects such as cracks and potholes in pavements. Defects in asphalt concrete are usually avoided by proper selection (design) of asphalt concrete components. This dissertation examines three types of asphalt concrete, modified from their existing ones, which have been used with excellent results in practice. Hot cast asphalt concrete is a construction material used for road paving and repairing. It has high fluidity under high temperatures, is waterproof, and does not need to be compacted. Hot cast asphalt concrete also has good durability and

elasticity; it can withstand the pressure of heavy traffic and, at the same time, maintains a certain degree of elasticity in the temperature change to reduce the occurrence of cracks. Hot cast asphalt is widely used in highways, city roads, parking lots, airport runways and other ground surfaces. It is also often used for bridge decking and some industrial floors that require high abrasion resistance. Cold cast asphalt concrete quickly opens repair areas and offers significant cost advantages, not requiring high temperatures, it can be stored and transported at room temperature, which makes logistics more accessible and more economical, saves energy and reduces greenhouse gas emissions. Epoxy asphalt concrete significantly improves the properties and service life of asphalt by adding epoxy resins. Epoxy asphalt concrete has higher abrasion resistance than ordinary asphalt concrete and is suitable for roads and airport runways subject to heavy traffic. Although epoxy asphalt is more expensive than traditional asphalt, epoxy asphalt concrete typically lasts longer than conventional asphalt concrete, reducing the frequency of repairs and replacements, and there are still cost advantages to using epoxy asphalt throughout the asphalt's life cycle. Unlike traditional asphalt, epoxy asphalt concrete takes time to cure and harden. Research has shown that fibers can significantly improve the physical mechanical properties of asphalt; in this dissertation, we used fly ash fibers from a Chinese thermal power plant modelled after basalt fibers, and in this dissertation, we investigate the possibility of modifying hot cast, cold cast, and epoxy asphalt concrete through controlled experiments.

The second chapter of the dissertation explains the application of the three types of asphalt concrete. Hot cast asphalt concrete is mainly used for roughening thin pavements and existing asphalt and cement concrete pavement surfaces. It requires strict attention to operating temperatures and optimal ratios of asphalt to mineral dust during production and paving; with the right proportions and materials combined with the right technology, hot cast asphalt concrete can be used not only for restoration work but also for a quality wear layer that lasts more than 20 years. Cold cast asphalt concrete has been widely used in bike paths, airports, and parks and is characterized by high performance, environmental friendliness, and low cost. The cohesion rate of cold cast asphalt concrete is a key indicator, and this chapter discusses the asphalt, emulsifier, and polymer modifier products that affect the cohesion rate. National and international researchers agree that heavy, highly

resinous, low paraffin oil and high acid distillate bitumen containing naphthenic aromatic hydrocarbons are most suitable for cold cast asphalt concrete technology.

Still, this distillate bitumen is very costly due to the difficulty of mining and extracting. The advantage of Redipave is that it allows oxidized asphalt and surface-active stone use. There are two general ways to improve the cohesive strength of cold cast asphalt concrete: the use of special emulsifiers, polymer additives, or reactive fillers in asphalt emulsion formulations (Redicote 505, Redicote 540, and Stabiram are more commonly used in Ukraine) and the use of polymer modifiers to improve the performance of oxidized asphalt and cationic asphalt emulsions based on them, which have traditionally been used in the Ukrainian market. Cationic asphalt emulsions (Toptex A, Toptex B, AlGoltex C, and Butonal NS 198 are commonly used in Ukraine). In addition, the research proved the possibility of using Indene-Coumarone Resin as a modifier to increase the softening temperature of asphalt and its adhesion to mineral materials. Epoxy resins and hardeners in epoxy asphalt concrete form a rigid polymer network that has performed well in engineering since its invention. Active research on epoxy asphalt has been conducted in the former Soviet Union, Europe, and other countries and regions, and it has been shown that epoxy asphalt has higher mechanical strength, better chemical resistance, and less wear mass loss. The means of modifying asphalt are mainly physical and chemical methods; physical methods include microwave, ultrasonic, magnetic field, electric field, etc., and chemical methods primarily use modifiers to modify asphalt. Among all the means of modifying asphalt, fibers, especially those with high mechanical properties, are considered an effective means of improving the strength properties of composite asphalt materials.

Chapter 3 focuses on the experimental equipment's initial material characteristics and data and the three types of asphalt concrete used for the experiments. We used 5-20 mm gabbro-igneous intrusive rock rubble, crushed and screened granite sand, limestone mineral powder MP-1, and asphalt BND 100/150 for hot cast asphalt concrete. Concerning cold cast asphalt concrete, we used stone, mineral powder, and water selected according to the national standards and introduced unconventional attenuation modifiers, $Al_2(SO_4)_3$, and Redicote from Sweden Emulsifier. For the preparation of epoxy asphalt concrete, we

used BND 50/70 asphalt from Ukrtatnafta, granite stone, mineral powder according to the national standards, CHS-EPOXY epoxy resin from the Czech Republic, Telalit curing agent, and others. In addition, the fly ash fibers from the Chinese thermal power plant added to all three types of asphalt concrete were marked with their parameters. This chapter also describes experiments to determine the needle penetration, softening point, brittleness temperature, flexibility, and total surface activity of asphalt stone. All were tested using Ukrainian national standards.

Chapter 4 of the dissertation focuses on the principles of interaction of materials in modified cast asphalt concrete and epoxy asphalt concrete. Some chemisorption occurs between the active particles of fly ash, asphaltenes, and asphalt resins, which improves the adhesion properties of asphalt to mineral materials. We also tested four virgin asphalts (two distilled and two oxidized) and one modified asphalt. The data suggest that the structural classification of asphalts by the Γ XC criteria and the K_{cra} index does not maintain consistency and that there is also a potential for oxidized asphalt to exhibit good properties in the preparation of asphalt emulsions through modification, which may reduce costs. This chapter also indicates the bond strength of cold cast asphalt concrete, which can be used to test the effectiveness of emulsions.

Concerning epoxy asphalt concrete, the determination of asphaltenes allows us to demonstrate a significant increase in the concentration of asphaltene polymer compounds and agglomerates formed from epoxy resins, fibers, and asphaltene molecules since these epoxy groups can undergo a cross-linking reaction with functional groups such as carboxylic acids, hydroxyls, or amino in the asphaltene. This cross-linking reaction forms a more stable network structure that enhances the material's mechanical strength and thermal stability. When epoxy resin and fiber are added simultaneously and exceed 2.0 wt.%, the activation energy of the asphalt increases due to the aggregation of additives to form an extended supramolecular structure. Through aging tests of the asphalt, we have also demonstrated that the modified asphalt has reduced mass loss during aging. The widening of the plastic interval of the bitumen with the addition of epoxy resins and fibers can be explained by the increase in the content of aromatic compounds in the elemental composition of the bitumen group, which results from the formation of structural bonds

between the particles of fly ash fibers and the free functional groups of the bitumen. The bonding properties of the modified bitumen were also improved, with an increase in the work of adhesion (from 0.43 to 0.60) with the addition of epoxy resin and fly ash fibers.

Chapter 5 of the dissertation tested cast asphalt concrete and fly ash fiber modified epoxy asphalt concrete. Separate experiments were conducted to select compositions and determine each concrete's physical and mechanical properties, shear resistance, and wear mass loss. Of particular note, the modified hot cast asphalt concrete was less sensitive to temperature and, therefore, more resistant to heat and cracking; the strength of the asphalt concrete with the introduction of fly ash fibers was also significantly increased; we also tested the modified asphalt concrete's ability to resist deformation loads at low temperatures, and the revised asphalt concrete performed well at -5°C , outperforming the original asphalt concrete by an average of 30%; in addition, the addition of fly ash fibers from China's thermal power plants made the structure of the cast asphalt concrete denser, which helped improve the water-resistance of the pavement.

In the case of cold cast asphalt concrete, where the acquisition of cohesive strength is of great interest, controlled experiments were conducted to confirm that $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ and fly ash fibers from a Chinese thermal power plant can be used as additives with good performance (opening up to traffic speeds of up to 40 km/h in 1-1.5 hours, and reaching the no-speed-limit criterion in 3 hours). The asphalt concrete with $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ and fly ash fibers from a Chinese thermal power plant also showed better adhesion and cohesion in the abrasion experiments. The excellent performance of $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ is of great significance in reducing the cost of the modified cold cast asphalt concrete. Within Chapter 5, we experimentally demonstrated how epoxy asphalt concrete gains strength. We also experimentally confirmed that asphalt with epoxy resin and fibers has stronger adhesion to aggregate (32% increase over virgin asphalt concrete), lower temperature sensitivity (23-28% increase in temperature sensitivity factor), higher strength, and better shear resistance (nearly three times better rutting resistance after 42 days). Using controlled tests, we conclude that adding 3.5% epoxy and 4.0% fiber is the most beneficial addition for asphalt concrete. Finally, the preparation method and technical description of epoxy fiber asphalt are given.

In summary, fly ash fibers from a Chinese thermal power plant have been shown to improve the performance of the three types of asphalt concrete in the dissertation. They are environmentally friendly and cost-effective enough to be considered for widespread use.

Keywords:

Asphalt binder, coal combustion products, fly ash, fly ash fiber, modifying additives, composites, asphalt concrete, concrete, modified concrete materials, pavement repair, concrete pavement, emulsified asphalt, concrete modification method, transport and operating condition, aerodrome pavement

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

1. Bieliatynskiy, A., Yang, S., Pershakov, V., Shao, M., & Ta, M. (2022). Investigation of the properties and technologies of epoxy asphalt concrete preparation with the addition of fiber from fly ash of thermal power plants. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 27(5), 2070-2087. <https://doi.org/10.1080/19648189.2022.2110160>. (Included in Web of Science database)

2. Bieliatynskiy, A., Yang, S., Pershakov, V., Shao, M., & Ta, M. (2022b). Investigation of the properties of cast asphalt concrete mixture with the addition of fiber from the fly ash of Thermal power plants. *Materials Science-Poland*, 40(4), 125-146. <https://doi.org/10.2478/msp-2022-0042>. (Included in Web of Science database)

3. Bieliatynskiy, A., Yang, S., Pershakov, V., Shao, M., & Ta, M. (2022c). The use of fiber made from fly ash from power plants in China in road and airfield construction. *Construction and Building Materials*, 323, 126537. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126537>. (Included in Web of Science database)

Наукові праці апробаційного характеру:

4. Bieliatynskiy, A., Yang, S., Pershakov, V., Shao, M., & Ta, M. (2022c). Study of concrete properties based on crushed stone sand mixture and fiber of fly ash of thermal power plants. *Science and Engineering of Composite Materials*, 29(1), 412-426. <https://doi.org/10.1515/secm-2022-0167>. (Included in Web of Science database)

5. Bieliatynskiy, A., Yang, S., Pershakov, V., Shao, M., & Ta, M. (2022d). Study of crushed stone-mastic asphalt concrete using fiber from fly ash of Thermal power plants. *Case Studies in Construction Materials*, 16. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00877>. (Included in Web of Science database)

6. Bieliatynskiy, A., Yang, S., Pershakov, V., Shao, M., & Ta, M. (2022c). Peculiarities of the use of the cold recycling method for the restoration of Asphalt Concrete Pavements. *Case Studies in Construction Materials*, 16. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00872>. (Included in Web of Science database)

7. Yang, S., Bieliatynskiy, A., Pershakov, V., Shao, M., & Ta, M. (2022). Asphalt concrete based on a polymer-bitumen binder nanomodified with carbon nanotubes for road and airfield construction. *Journal of Polymer Engineering*, 42(5), 458-466. <https://doi.org/10.1515/polyeng-2021-0345>. (Included in Web of Science database)
8. Bieliatynskiy, A., Yang, S., Pershakov, V., Shao, M., & Ta, M. (2022a). Features of the hot recycling method used to repair asphalt concrete pavements. *Materials Science-Poland*, 40(2), 181-195. <https://doi.org/10.2478/msp-2022-0021>. (Included in Web of Science database)
9. Bieliatynskiy, A., Yang, S., Pershakov, V., Shao, M., & Ta, M. (2022e). Study of Carbon Nano-modifier of fly ash in cement concrete mixtures of civil engineering. *Science and Engineering of Composite Materials*, 29(1), 227-241. <https://doi.org/10.1515/secm-2022-0018>. (Included in Web of Science database)
10. Bieliatynskiy, A., Yang, S., Pershakov, V., Shao, M., & Ta, M. (2022a). Comparative analysis of the influence of various materials on the state of the roadside environment during the road repair. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(6), 15523-15530. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23212-4>. (Included in Web of Science database)
11. Bieliatynskiy, A., Yang, S., Pershakov, V., Shao, M., & Ta, M. (2023). State of the roadside environment from repair works using various materials. *Materialwissenschaft Und Werkstofftechnik*, 54(6), 717-724. <https://doi.org/10.1002/mawe.202200244>. (Included in Web of Science database)
12. Yang, S., Bieliatynskiy, A., Pershakov, V., Shao, M., & Ta, M. (2023). Exploring the use of modern fly ash materials from Chinese power plants in road and airfield infrastructure. *Environmental Engineering and Management Journal*, 22(3), 527-537. <https://doi.org/10.30638/eemj.2023.041>
13. International conference “World Conference on Nanotechnology and Materials”, online, Nov. 18-20, 2022.
14. International Academic Conference on Aviation, Water and Land Sustainable Transportation Technology in the 21st Century, Yinchuan, China, November 6-8, 2023.

15. World Congress "XXII International scientific and practical conference of higher education graduates and young scientists "Polit. Modern problems of science", Kyiv, April 4-7, 2023.

16. The Tenth World Congress "Aviation in the XXI-st century" - "Safety in Aviation and Space Technologies", Kyiv, September 28-30, 2022.

17. The 4th International Conference on Advances in Civil and Ecological Engineering Research (ACEER 2022), Xi'an, July 4th-7th, 2022.

18. VI International scientific and technical conference "Effective technologies in construction", KNUBA, Kyiv, October 26-27, 2021.

19. XII International Scientific and Practical Conference "Architecture and Ecology", National Aviation University, Kyiv, November 9-11, 2021.

20. World Congress "Polit. Modern problems of science", Kyiv, April 5-9, 2021.

21. XV International scientific and technical conference "AVIA-2021", Kyiv, April 20-22, 2021.

ЗМІСТ

1. АКТУАЛЬНІСТЬ ДОСЛІДЖЕННЯ	32
1.1 Волокна на основі золи-виносу	32
1.2 ГЛАБ and ЛЕМС.....	40
1.3 Епоксидний асфальтобетон.....	45
1.4 Основні методи модифікації бітуму в асфальтобетоні	48
2.ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОБЛЕМ ЗАСТОСУВАННЯ ЛИТОГО АСФАЛЬТОБЕТОНУ ТА ЕПОКСИДНОГО АСФАЛЬТОБЕТОНУ	55
2.1 Дослідження застосування литого асфальтобетону.....	55
2.1.1 Гарячий литий асфальтобетон.....	55
2.1.2 Холодний литий асфальтобетон (лита емульсійно-мінеральна суміш).....	57
2.1.3 Шляхи підвищення швидкості нарощування інтенсивності зчеплення ЛЕМС	60
2.2 Огляд конструктивного аналізу міцних епоксидно-асфальтових покриттів	64
2.2.1 Використання "Шелл Епоксі Асфальту"	64
2.2.2 Дослідження полімербетону на епоксидних смолах, виконані в "СоюздорНИИ"	66
2.2.3 Дослідження епоксидного асфальту в Європі та інших країнах.....	68

3. ПОЧАТКОВА ХАРАКТЕРИСТИКА МАТЕРІАЛІВ ТА МЕТОДОЛОГІЯ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	78
3.1 Характеристики вихідних матеріалів для гарячого литого асфальтобетону та методи випробувань	78
3.1.1 Властивості первинного бітуму.....	78
3.1.2 Властивості мінеральних матеріалів асфальтобетону.....	81
3.1.3 Характеристики ФЗВК.....	84
3.2 Характеристики сировини та методи випробувань для холодної литого асфальтобетону (ЛЕМС).....	84
3.2.1 Емульгований бітум.....	84
3.2.2 Кам'яний матеріал.....	85
3.2.3 Мінеральний наповнювач	86
3.2.4 Регулятор розпаду	86
3.2.5 Вода	87
3.2.6 Методологія дослідження	87
3.3 Характеристики сировини та методи випробувань епоксидного асфальтобетону.....	92
3.3.1 Властивості асфальтобетону.....	92
3.3.2 Властивості мінеральних матеріалів.....	93

3.3.3 Епоксидні смоли	93
3.3.4 Вибрані компоненти сумішей.....	94
4. ПРИНЦИПОВЕ ВИВЧЕННЯ ВЗАЄМОДІЇ МАТЕРІАЛІВ У МОДИФІКОВАНОМУ ЛИТОМУ БЕТОНІ ТА ЕПОКСИДНОМУ АСФАЛЬТОБЕТОНІ.....	99
4.1 Основи вивчення впливу ФЗВК на структурно-механічні властивості асфальту та емульгованого асфальту в литому асфальтобетоні	99
4.1.1 Вплив ФЗВК на структуру та властивості асфальту в гарячому литому асфальтобетоні	99
4.1.2 Розробка дорожнього нафтового бітуму для ЛЕМС.....	100
4.1.3 Фізико-механічні властивості асфальтобетону та використання проектних критеріїв для визначення типу конструкції.....	103
4.1.4 Взаємодія компонентів асфальтових емульсій для приготування холодного литого асфальтобетону (ЛЕМС).....	108
4.1.5 Основні показники швидкості набору міцності зчеплення холоднолитого асфальтобетону (ЛЕМС) з добавкою зольного волокна	109
4.2 Основне дослідження взаємодії асфальту, епоксидної смоли та ФЗВК при виготовленні епоксидного волокнистого асфальтобетону	112
4.2.1 Встановлення впливу епоксидних смол та волокон на структурно- композиційні зміни бітуму	112

4.2.2	Зміна структури бітуму, модифікованого епоксидною смолою та ФЗВК.....	117
4.2.3	Вивчення процесу старіння модифікованого бітуму.....	120
4.2.4	Визначення основних властивостей модифікованого бітуму.....	122
4.2.5	Дослідження впливу введення епоксидної смоли та ФЗВК	126
5.	ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ З ВИЗНАЧЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЛИТОГО Й ЕПОКСИДНОГО АСФАЛЬТОБЕТОНУ З ДОДАВАННЯМ ВОЛОКОН ЛЕТЮЧОЇ ЗОЛИ	132
5.1	Експериментальне дослідження з визначення властивостей литого асфальтобетону з додаванням волокон летючої золи	132
5.1.1	Підбір компонентів для литого асфальтобетону з ФЗВК.....	132
5.1.2	Визначення фізико-механічних властивостей модифікованого ЛЕМС	135
5.1.3	Підбір компонентів холоднолитого асфальтобетону з ФЗВК.....	139
5.1.4	Визначення втрати маси при зношуванні мокрих абразивів	148
5.2	Експериментальне дослідження з визначення властивостей епоксидного асфальтобетону з додаванням ФЗВК.....	149
5.2.1	Дослідження фізико-механічних властивостей вибраних складів епоксидно-волокнистого асфальтобетону	149

5.2.2	Визначення температурної чутливості епоксидно-волокнистого асфальтобетону	152
5.2.3	Дослідження властивостей зсуву та оптимального вмісту модифікатора для епоксидно-волокнистого асфальтобетону	154
5.2.4	Технічне обґрунтування приготування та застосування епоксидно-волокнистого асфальтобетону	160
	ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	166
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	174
	ДОДАТОКИ.....	185

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ГЛАБ- Гарячий литий асфальтовий бетон

ЛЕМС- Холодний литий асфальтовий бетон(Лита емульсійно-мінеральна суміш)

ПЩ- Портландцемент

ТП- Тонкошарове покриття

БНД- Бітум нафтовий дорожній

ФЗВК- Фібри із золи-виносу теплових електростанцій виробництва Китай

МТ- Модуль упругості

ДСТУ Б В.- Державний стандарт України

ІКС- Інден-кумаронова смола

ВСТУП

Причини вибору теми дослідження:

Сьогодні, як і в більшості країн, фактичний термін експлуатації асфальтобетонних покриттів в Україні нижчий за існуючий нормативний термін. Передчасний ремонт та відновлення дорожнього покриття вимагають витрат у мільйони доларів, які могли б бути спрямовані на будівництво нових та реконструкцію вже існуючих доріг. Однією з основних причин швидкого руйнування покриттів в умовах інтенсивного та важкого навантаження на дороги є властивості самого асфальту. [1] Порівняно з іншими дорожньо-будівельними матеріалами, асфальт є найбільш чутливим до впливу транспортних навантажень, погодних та кліматичних чинників. Як термопластичний матеріал, він розм'якшується за високих літніх температур та стає крихким у зимовий період. Це, у поєднанні зі слабкою адгезією асфальту до каменю, може призводити до появи колійності, тріщин, вибоїн та руйнування дорожнього покриття. [2-4]

З огляду на вищезазначене, цілеспрямована зміна властивостей асфальту є найбільш ефективним способом покращення експлуатаційних характеристик та довговічності дорожнього покриття.

Модифікація асфальту та асфальтобетону різноманітними добавками та полімерами стала звичайною практикою. У даній дисертаційній роботі зосереджено увагу на трьох типах асфальту та асфальтобетону: гарячолитому асфальтобетоні, холоднолитому асфальтобетоні та епоксiasфальтобетоні.

Одним із провідних сучасних методів, що дозволяє вирішити завдання захисту верхніх шарів дорожнього покриття та в найкоротші терміни відновити транспортно-експлуатаційні показники, є влаштування тонких шарів покриттів (ТП) із застосуванням гарячолитих асфальтобетонних сумішей або литих емульсійно-мінеральних сумішей (ЛЕМС).

Завдання влаштування ТП із зазначених матеріалів полягає у продовженні терміну служби існуючих покриттів шляхом заповнення дрібних тріщин і невеликих вибоїн, значному покращенні показників рівності й зчеплення, однорідності покриття, попередженню появи тріщин, водовідштовхуванню та, у цілому -

відновленню зруйнованого в процесі експлуатації.

Головною відмінністю гарячолитих асфальтобетонних сумішей від традиційних є підвищений вміст мінеральних матеріалів (до 25%) та бітуму (до 12%). За рахунок цього суміш має підвищену технологічну плинність, для її ущільнення не потрібні спеціальні засоби. Водночас, для забезпечення довговічності шару литого асфальтобетону потрібно приділяти значну увагу підбору складу суміші, особливо щодо кількості бітуму, в пов'язаності з кількістю заповнювачів з розмірами менше 0,071 мм.

А історія використання ТП з ЛЕМС розпочинається у 1930-х роках, коли у Німеччині для посилення злітно-посадкової смуги аеропорту Берлін-Старкен була вперше використана суміш дрібного щебеню, асфальтового в'язучого та води. Ця суміш була відома як «шлам», і з часом ця ще рідкісна на той час технологія, була використана також для відновлення автострад Німеччини. Проблеми впровадження даної технології вивчали протягом наступних кількох років, але лише з 1960-х років шлам почав отримувати більш активне розповсюдження в зв'язку з появою нових емульгаторів для отримання асфальтових емульсій та компонентів механізмів змішування, здатних якісно перемішувати асфальтні компоненти.

Починаючи з 1960-х років, від ліквідації дефектів покриття поступово переходять до індустріалізованого й економічного профілактичного їх захисту з боку верхнього покриття. Робота профілактичного характеру була зведена до відновлення водонепроникності верхнього шару за допомогою рідкої суміші, цілком рівномірно розподіленої по поверхні та складається з в'язучого матеріалу, дрібного гравію, цементу та хімічних добавок, та одночасно з цим дозволяє збільшити адгезійні властивості покриття. Необхідність зниження норм витрати в'язучого та собівартості виконуваних робіт спричинила застосування у складі даних технологій в'язучих матеріалів в формі емульсії. Завдяки застосуванню асфальтових емульсій для влаштування тонкошарового захисного покриття норма витрати в'язучого знижується у 8-10 разів, у порівнянні з гарячим асфальтобетоном і у 35-40% - у порівнянні з поверхневими обробками із застосуванням гарячих в'язучих. Водночас покращується якість транспортно-експедиційних операцій обслуговування

покриття.

В середині 70-х років технологія набуває якісно нового рівня влаштування тонкошарових покриттів з холоднолитого асфальтобетону на модифікованих емульсіях - Microsurfing. Німецька фірма «Рашик» розробила технологію на базі емульсій, які виготовляються за французьким патентом 1967 року. Фірма «Краусс» (Робдорф, Німеччина) стала першою, хто виконав роботи з влаштування тонкошарових покриттів з холоднолитого асфальтобетону на тротуарах. За рахунок введення в нього полімерних добавок фізико-механічні і експлуатаційні властивості покриття, що влаштовується, були значно покращені.

Суміші типу Slurry Seal стали одними з перших матеріалів, здатних одною операцією утворити захисний зносостійкий шар та відновити рух у найкоротші терміни. Даний вид сумішей все ширше впроваджується у розвинених країнах, наприклад у Німеччині, де вони відомі, у Франції - Schlämme, за назвою microsurfacing - холодно литий асфальтобетон. У Радянському Союзі подібні суміші, а саме зчеплювальні на основі аніонних емульсій типу ЛЕМС розроблялися у «СоюздорНИИ». Але через відсутність емульсій з необхідними стабілізуючими властивостями, матеріально-технічної та технологічної бази по влаштуванню ТП з ЛЕМС розпочаті у «СоюздорНИИ» роботи зупинилися, а набутий при роботі досвід був втрачений. [5,6]

Дана технологія в Україні тільки з 90-х років знову починає отримувати визнання, але широкого розповсюдження так ще не отримала у зв'язку з недостатньою вивченістю питання проектування складу сумішей. Одним з виділених проблемних питань у використанні даної технології є використання мінеральних матеріалів в якості регуляторів розкладання матеріальних сумішей, що зменшує темпи набору зчепної міцності укладених литих сумішей, а відтак і затвердіння щільно сформованих тонких шарів покриттів та своєчасного відкриття руху по ним. [7]

Крім того, останнім часом спостерігається великий інтерес до застосування як модифікаторів термореактопластів (наприклад, епоксидних смол) у західноєвропейських країнах, Америці та Австралії. Різного типу асфальтобетонні

суміші з вмістом епоксидних смол отримали назву епоксифасфальт.

Виконані дослідження продемонстрували економічну обґрунтованість застосування відносно дорогих епоксидно асфальтових покриттів на ділянках доріг з високою інтенсивністю руху, що мають тривалий міжремонтний термін служби (30 років і більше) при відсутності витрат на ремонт та утримання. [8]

За результатами досліджень було встановлено високі транспортно-експлуатаційні показники епоксифасфальтових покриттів. При заміні 20-35% бітуму епоксидним компаундом різко поліпшуються міцнісні характеристики дорожніх покриттів з асфальтобетону, особливо за високих температур, збільшиться їх стійкість проти утворення без погіршення показників низькотемпературної деформативності. [9] Але разом з тим добре відомо, що однією з характерних особливостей епоксидно-асфальту являється здатність набору міцності впродовж тривалого терміну експлуатації (до одного року), що виявляється недоліком застосування цих покриттів на верхньому шарі одягу. [10]

Це у свою чергу призведе до затримок з відкриттям руху, особливо на дорогах вищих категорій, що, у свою чергу, призведе до зриву термінів виконання будівництва та незручностей, для руху легкового транспорту.

Крім того, потрібно приймати до уваги, що за умовами тривалого затримання будівництва при великих інтенсивностях і щільностях руху, що характеризує ділянки доріг вищих категорій, може приводити до появи деформацій (пластичності) та скорочення строку служби. [11]

Виходячи із запропонованих вище властивостей бітуму і обмежень використання трьох типів асфальтобетону, для усунення даних недоліків та поліпшення експлуатаційних показників з збільшенням міжремонтних термінів служби покриттів пропонується розглянути впровадження у задані три типи асфальтобетонів зольних волокон із теплових електростанцій Китаю. Якщо буде можливим реалізувати дану ідею, влаштування покриттів з асфальтобетону стануть більш економічно обґрунтованим та забезпечать новий вид утилізації золи-виносу - відходу промисловості.

Мета та завдання дослідження з урахуванням предмета та об'єкта дослідження:

Отже, завданнями даного дослідження стали проектування складів та вивчення властивостей гарячолитого асфальтобетону та холоднолитих емульсійно-мінеральних сумішей з використанням зольних волокон з теплових електростанцій Китаю для використання в тонких шарах покриттів доріг різних категорій і значень, розробка складів гарячолитого дрібнозернистого асфальтобетону з додаванням епоксидних і вітчизняних теплоелектростанцій зольних волокон, вивчення фізико-механічних властивостей асфальтобетону з додаванням епоксидних волокон.

Об'єкт дослідження: Гарячий литий асфальтобетон, холодний литий асфальтобетон, епоксидний асфальтобетон з додаванням зольних волокон з теплових електростанцій Китаю

Предмет дослідження: Можливість та вплив модифікації зольними волокнами із теплових електростанцій Китаю на гарячолитий асфальтобетон, холодний литий асфальтобетон, епоксид-асфальтобетон

Методи дослідження: Проф. М.С. Барабаш дав поради та рекомендації стосовно логіки дослідження та методів дослідження. Досліджується введення волокон із золи-виносу з теплових електростанцій, виготовлених у Китаї, як армуючої та структурної добавки в гарячий литий асфальтобетон, холодно литий асфальтобетон та епоксид-асфальтобетон, що у разі успіху може дозволити прискорити формування покриття та зміцнити асфальтобетон.

Задачами даного дослідження стали проектування складів та вивчення властивостей гаряча литого асфальтобетону та холодно литих емульсійно-мінеральних сумішей з використанням зольних волокон із теплових електростанцій Китаю для використання в тонких шарах покриттів доріг різних категорій і значень, розробка складів гарячолитого дрібнозернистого асфальтобетону з додаванням епоксидної смоли і вітчизняних теплоелектростанцій зольних волокон, вивчення фізико-механічних властивостей асфальтобетону з епоксидними волокнами. Виходячи з результатів виконаного аналізу літератури, ми висуваємо гіпотезу про те, що волокна допоможуть покращити термін служби і показники експлуатації дорожніх

покриттів всіх трьох типів асфальтобетону.

Ґрунтуючись на висвітлених вище меті та завданнях, основними ми обрали методи літературного огляду, аналізу та експерименту.

За результатами зібраних існуючих досліджень з аналізу зольних волокон з теплових електростанцій Китаю було відмічено можливість модифікації цим видом модифікатора асфальтобетону і створення відповідної інфраструктури. До зольних волокон за своїми властивостями близькі базальтові, за допомогою яких у сфері асфальтобетонів був отриманий позитивний ефект, але через їх високу вартість дані методи є менш економічно обґрунтованими. Зольні ж волокна мають порівняно невисоку собівартість, та крім того, зола-винос являється промисловим відходом, що у разі реалізації практичних проєктів призведе до скорочення витрат, що дасть вклад у захист навколишнього середовища. Метод проведення експериментальних робіт є базовим способом для перевірки можливості зольними волокнами з теплових електростанцій Китаю покращити характеристики даних трьох видів асфальтобетону. Попередньо шляхом проведення випробувань відповідно до нормативних документів України були підібрані вихідні матеріали для виконання наступних експериментів. На зразках асфальтобетону був проведений комплекс тестів на вивчення механічних властивостей, вивчення поведінки матеріалу за умов старіння та вивчення теплостійкості асфальтобетону без вмісту та з вмістом волокон. Автоматизованими методами перевіряло міцність на стиск, міцність на згин, міцність на розтяг тощо.

Для уможливлення оцінки отриманих результатів паралельно досліджувалися зразки епоксидно асфальтобетону без волокнистих наповнювачів та класичні зразки дрібнозернистого бетону.

У роботі використовувались нормативні методи та методика досліджень з використання мрегуляторних документів України.

Результати дослідження подані у даній роботі.

Наукова новизна отриманих результатів: Вперше доведена можливість, принцип та ефект модифікації зольними волокнами з теплової електростанції Китаю гарячолитого асфальтобетону, холоднолитого асфальтобетону та епокси-

асфальтобетону, завдяки чому розкрита ідея модифікації асфальтобетону та додатково збільшена сфера використання зольних волокон, що призводить до економічного та екологічного ефекту.

Завдяки порадам і рекомендаціям Професор Марії Барабаш щодо логіки написання та методології роботи. Дослідження було спільно завершено командою, до якої входять Андрій Белятинський, Шилинь Ян, Валерій Першаков, Мін'ян Та та я. Члени команди також зробили свій внесок у перевірку, налагодження та зміну ідей дисертації. Мої основні внески - організація літератури, розробка та перевірка експерименту, організація та аналіз даних, розробка структури дисертації та її написання.

Було представлено результати дисертаційного дослідження:

International conference "World Conference on Nanotechnology and Materials", online, Nov. 18-20, 2022.

International Academic Conference on Aviation, Water and Land Sustainable Transportation Technology in the 21st Century, Yinchuan, China, November 6-8, 2023.

World Congress "XXII International scientific and practical conference of higher education graduates and young scientists "Polit. Modern problems of science", Kyiv, April 4-7, 2023.

The Tenth World Congress "Aviation in the XXI-st century" - "Safety in Aviation and Space Technologies", Kyiv, September 28-30, 2022.

The 4th International Conference on Advances in Civil and Ecological Engineering Research (ACEER 2022), Xi'an, July 4th-7th, 2022.

VI International Scientific and Technical Conference "Effective technologies in construction", KNUBA, Kyiv, October 26-27, 2021.

XII International Scientific and Practical Conference "Architecture and Ecology", National Aviation University, Kyiv, November 9-11, 2021.

World Congress "Polit. Modern problems of science", Kyiv, April 5-9, 2021.

XV International scientific and technical conference "AVIA-2021", Kyiv, April 20-22, 2021.

Структура цієї дисертації складається зі вступу, списку публікацій, змісту, списку абревіатур, п'яти розділів, списку використаних джерел та додатків, загальним обсягом 199 сторінок, із яких вступ займає близько 8 сторінок, та головним чином забезпечує детальний огляд роботи. Перший розділ має 24 сторінок і спеціально представляє та аналізує матеріал, висвітлений у дослідженні шляхом огляду літератури. Другий розділ складається з 24 сторінок та є переважно оглядом літератури, та являє собою теоретичне дослідження трьох типів асфальтобетону. Третій розділ займає 23 сторінок, в основному шляхом опису даних та представлення методів випробувань вихідних матеріалів для кожного з асфальтобетонів. Четвертий розділ, який налічує 34 сторінок, містить здебільшого аналіз принципу взаємодії вихідних матеріалів асфальтобетону, модифікованого зольними волокнами. П'ятий розділ складається з 35 сторінок і включає переважно експериментальне дослідження та аналіз результатів щодо властивостей модифікованого асфальтобетону. Для кожного розділу надаються підсумки. У додатку міститься список публікацій, сертифікати важливих конференцій та практичні докази результатів досліджень.

1. АКТУАЛЬНІСТЬ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Волокна на основі золи-виносу

Сьогодні, як і в більшості країн, фактичний термін служби асфальтобетонних покриттів в Україні є нижчим у порівнянні з нормованим стандартом. Передчасні ремонти та повторні покриття вимагають мільйонів доларів додаткових витрат, які могли б бути спрямовані на будівництво нових і реконструкцію вже існуючих доріг. Однією з головних причин швидкого руйнування дорожніх покриттів за умов інтенсивного і великовантажного руху транспорту є властивості асфальтобетону. З усіх дорожньо-будівельних матеріалів асфальтобетон виявляє найбільшу чутливість до впливу як транспортних навантажень, так і кліматичних факторів. Оскільки це термопластичний матеріал, влітку за високих температур він розм'якшується, а взимку за низьких температур стає ламким. Це, разом зі слабкою адгезією асфальтобетону до каменю, може призвести до утворення колій, тріщин, вибоїн та ям на покритті. Багато дефектів (утворення колій, тріщин, в тому числі та низькотемпературне розтріскування тощо) асфальтобетонних дорожніх покриттів доріг з високою інтенсивністю руху можна уникнути завдяки правильному підбору (проектуванню) складів асфальтобетонних сумішей. [12]

Одними з найпоширеніших причин появи колійності на покриттях є надлишкова кількість асфальтов'язучого засобу, застосування надлишкових олійних (або інших пластифікаторів) полімерів та асфальтов'язучих засобів у компактувальній галузі, застосування надмірної кількості округлих частинок щебеню та піску.

Асфальтобетонні суміші, що містять велику кількість природного піску та неподрібненого гравію, схильні до утворення надмірної колійності спочатку за сучасних умов і навантажень від руху транспорту, що підтверджує передовий зарубіжний досвід. Деякі країни забороняють застосування природного піску в сумішах для доріг з високою інтенсивністю руху або обмежують його вміст до 10-25 %. [13] Напрямок, який може покращити стійкість до утворення колій, є застосування різних видів волокон в асфальтобетонних сумішах: мінеральних волокон, базальтових волокон, металевих волокон, целюлозних волокон, скляних

волокон, синтетичних волокон тощо. [14] У вітчизняній практиці недостатньо досліджень щодо характеру застосування різних видів волокон, розмірів, особливостей застосування, впливу на робочі характеристики матеріалу та його застосування конкретно в асфальтобетоні. Найскладнішим завданням в процесі включення волокон в асфальтобетон для поліпшення його властивостей є отримання однорідної асфальтобетонної суміші - рівномірний розподіл волокон за об'ємом.

Приготування асфальтобетону зі скляними волокнами потребує суворого дотримання технологічних режимів і співвідношень компонентів. Наприклад, при введенні синтетичних волокон слід суворо відстежувати температуру, оскільки за високих температур більшість волокон плавиться. [15] До недавнього часу обмежуючими факторами в процесі впровадження армуючих стержнів, бетонних виробів та інших видів волокон (скляних, полімерних, металевих) були низька хімічна стійкість скляних волокон у затверділому цементному тісті, висока вартість синтетичних волокон, низька ефективність, корозія, низька адгезія до цементу, різні коефіцієнти розширення з бетоном та багато інших недоліків, котрі призводять до розтріскування бетону. [16]

Базальтове волокно - це високопродуктивне волокно з кількома перевагами, такими як висока міцність та довговічність, стійкість до високих температур, корозійна стійкість, зменшення ваги, електроізоляція, екологічність та відновлюваність тощо. Ці властивості роблять базальтові волокна придатними для широкого застосування у сферах будівництва, аерокосмічної галузі, автомобілебудування та високотемпературної промисловості.

Базальтове волокно - це новий тип мінерального волокна. Вперше його широкомасштабне виробництво як військового та аерокосмічного матеріалу було започатковано у 1960-х роках у Радянському Союзі, а потім США та інші західні країни провели багато досліджень щодо технології виробництва базальтового волокна. Однак лише у 1995 році ця технологія була розсекречена та почала використовуватися для цивільної продукції. Процес виробництва базальтового волокна в основному поділяється на такі етапи: дроблення природного базальту → високотемпературне плавлення → витягування → процес зневоднення → переробка

у волокна, а потім глибока обробка готових виробів з базальтового волокна. У порівнянні з іншими волокнами, базальтове волокно має наступні переваги:

(1) Скловолокно втрачає міцність на розрив під дією води при 70°C за 200 годин, тоді як базальтове волокно може зберігати міцність на розрив до 1200 годин; (2) Відмінна хімічна стійкість у порівнянні з лігніновим волокном: хороша кислотостійкість, лугостійкість, водостійкість і стабільність при високих температурах; (3) Хороші ізоляційні властивості та проникність для електромагнітних хвиль; (4) Відмінні механічні властивості: міцність на розрив у 10 разів більша, ніж у лігнінового волокна, та в 6 разів - ніж у поліефірного волокна. А модуль пружності та подовження при розриві є дуже великими; (5) Хороша водостійкість: водопоглинання менше 0,2%, а швидкість поглинання вологи не змінюється з часом; (6) Екологічно безпечний матеріал, може перероблятися. Через великі запаси сировини виробничий процес є зрілим, а поточна ціна також відносно доступна.

Завдяки переліченим вище чудовим характеристикам базальтового волокна, у 1990-х роках його технологія виробництва була розсекречена та привернула увагу дослідників. Його перше застосування в асфальтовому покритті відбулося в 1990 році, коли в США було прокладено перше асфальтове покриття зі змішаним базальтовим волокном і досягнуто хорошого модифікуючого ефекту. Після цього вчені різних країн також провели багато досліджень базальтового волокна в цивільному будівництві.

(Sim et al., 2005) використовували базальтові волокна російського виробництва з міцністю на розрив 1000 МПа. У ході прискорених випробувань на старіння з'ясували, що базальтові волокна забезпечують кращу стійкість, ніж скляні. А в тестах на оцінку зміцнення при вигині армування базальтовим волокном збільшило межу текучості та міцність зразків балок на 27%. [17] (Carmisciano et al., 2011) досліджували композити з вінілового ефіру, армовані базальтовою тканиною: базальтові волокнисті композити мали вищий модуль вигину та видиму міжшарову міцність на зсув у порівнянні з безлужним склом, але нижчу міцність на вигин та подібні електричні властивості. [18] (Subagia et al., 2014) дослідили вплив різної

послідовності укладання вуглецевих і базальтових волокон на властивості вигину гібридних композитних ламінатів та показали, що міцність і модуль вигину гібридних композитних ламінатів сильно залежать від порядку армування волокон. [19] (Dhand et al., 2015) презентували короткий огляд базальтових волокон, що використовуються як арматура композитів, та обговорили використання базальтових волокон як альтернативи скляним волокнам. (Kizilkanat et. al., 2015) проаналізували використання базальтових та скляних волокон як волоконно-армуючих матеріалів у високоміцному бетоні, і результати показали, що добавка волокон не мала суттєвого впливу на міцність на стиск і модуль пружності бетону. Міцність на розкол та на згин бетону, армованого базальтовим волокном, збільшувалася зі збільшенням кількості волокон, тоді як міцність бетону, армованого скляним волокном, не зростала понад 0,50% дозування волокон. [20] (Wang et al., 2019) дослідили механічні властивості високоміцного бетону, армованого базальтовим волокном та поліпропіленовим волокном, та дійшли висновку, що синергетичний ефект змішування волокон був найкращим, коли вміст базальтового волокна становив 0,15%, а поліпропіленового волокна - 0,033%. При цьому міцність на стиск, міцність на вигин та міцність на розкол збільшилися на 14,1%, 22,8% і 48,6% відповідно в порівнянні з ВМБ без волокон. [21]

Очевидно, що переваги базальтового волокна підходять для модифікації бетону і були перевірені. З усіх матеріалів, що використовуються для виробництва волокон, лише вуглець може конкурувати з базальтовими волокнами за своїми механічними, хімічними та термічними властивостями, але він значно дорожчий. Волокно з летучої золи - це матеріал, який отримують з летучої золи на китайських електростанціях, і його використання вирішує економічну проблему. Вторинне використання золи може значно полегшити тиск на навколишнє середовище, який вона створює. [22]

З розвитком економіки збільшується споживання електроенергії, а отже, кількість утвореної золи-виносу зростає з кожним днем. Зола-винос — це кремній-алюмінієвий залишок, що викидається плавильними заводами, тепловими електростанціями та хімічними заводами. Вона пориста, пухка, дрібнозерниста та

легка, за зовнішнім виглядом схожа на цемент, кольором від молочно-білого до сірувато-чорного. Кількість утвореної золи-виносу складає від 2,5 % до 5,0 % від кількості спожитого вугілля. Зола-винос містить переважно аморфне скло (близько 59,7 %) і вкрай варіативний вміст вуглецю (1,2 %-23,6 %), тоді як у кристалічних фазах переважають муліт (близько 20,7 %) та кварц (близько 6,4 %), а також невелика кількість магнетиту, гематиту, кальциту тощо. На зображенні нижче представлено мікрофотографію золи-виносу:

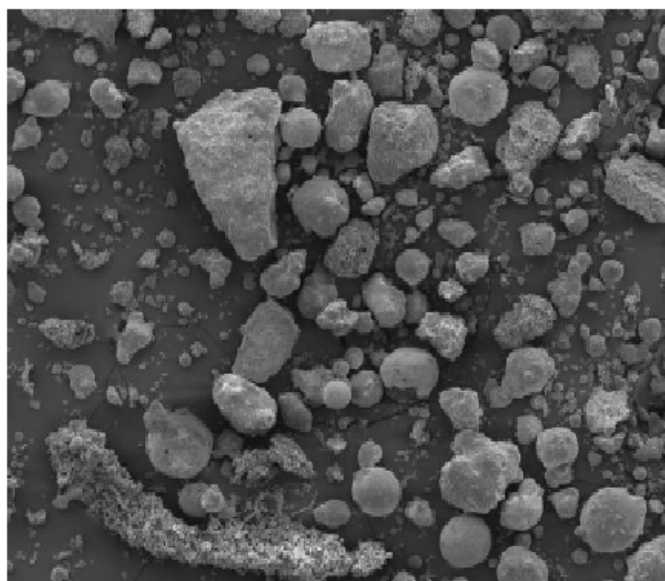


Рис. 1.1 Мікрофотографія золи-виносу

Україна щороку виробляє 6-7 мільйонів тонн зольних відходів. Поки вугілля є основним джерелом енергії, зола-винос утворюється всюди, де працюють вугільні теплові електростанції. У Європі переробляється до 92% відходів золи. В Україні про ці показники говорити зарано, адже лише мала кількість підприємств працює із утвореним забрудненням, більшість же не мають належних технологій та умов, що ускладнює проблему забруднення навколишнього середовища та накопичення золи-виносу. На щастя, шлакові матеріали успішно використовуються у виробництві цементу, бетону, будівельних сумішей, а відтепер і в дорожньому будівництві. Використання відходів одних галузей як сировини для інших - основний принцип циркулярної економіки та основа сталого розвитку країн та підприємств.

Відповідно, безперервно розвиваються і дослідження комплексного використання золи-виносу, особливо враховуючи швидкий розвиток національної мережі автомобільних доріг у останні роки - завдяки цьому рівень використання

золи-виносу значно зростає, ефективно перетворюючи відходи на скарб. Використання золи-виносу в різних проектах не тільки значною мірою знижує вартість проекту, але й дозволяє зберігати земельні ресурси, і має далекосяжне значення для захисту навколишнього середовища.

Наразі шляхи комплексного використання золи-виносу в країні та за кордоном включають наступне: будівельні матеріали, дорожнє будівництво, стінові матеріали, спікання керамічного грануляту, цегла з золи-виносу тощо. Кращим варіантом використання є її поєднання з полімерами для утворення гідроізоляційних, антикорозійних матеріалів, покриттів тощо. Вчені неодноразово намагалися використати золу-винос в якості матеріалів для будівництва дорожнього покриття: (Chindaprasirt et. al., 2004 та 2005) дослідили вплив тонкості золи-виносу на міцність, усадку при висиханні та сульфатостійкість змішаних цементних розчинів, а також вплив пористості та тонкості золи-виносу на водопотребу та розподіл пор за розміром у затверділій цементній пасті. [23] (Sakai et. al., 2005) У науковому звіті про гідратацію цементів із золи-виносу було висвітлено вплив вмісту скла та лужності склофази на гідратацію таких цементів, а також тривалість гідратації при довгостроковому використанні. [24] (Ahmaruzzaman, 2010) у своїй праці обговорює використання золи-виносу в будівництві як низькозатратного адсорбенту для легких заповнювачів, заповнення вироблених ділянок копалень, дорожньої основи та синтеза цеоліту [25] (Saha, 2018) оцінив застосування золи-виносу класу F як часткової заміни в'язучого в бетоні. [26] (Moghaddam та співавт., 2019) провели експериментальне дослідження впливу тонкості золи-виносу на теплоту гідратації, мікроструктуру, плинність і міцність на стиск змішаних цементних паст і порівняли їх із контрольними цементними пастами. [27] Дослідження Пінки Деб та співавт. у 2023 році показало, що стійкість до колієутворення та втома холодної асфальтобетонної суміші з додаванням золи-виносу була на 13,7% та 9,39% вищою, ніж у гарячої асфальтобетонної суміші, що відкриває хороші перспективи для використання золи-виносу у виробництві холодної асфальтобетонної суміші. Перспективи використання золи-виносу для цих цілей залежать від її властивостей та низької вартості. [28]

Поява волокон на основі золи-виносу відкриває новий шлях комплексного використання золи, а перспективи їх розробки та застосування - багатообіцяючі. Волокна золи-виносу зазвичай виготовляються шляхом змішування золи з іншими хімічними речовинами та проходження певного технологічного процесу для отримання волокнистого матеріалу. Основними властивостями таких волокон є легкість, висока міцність та термостійкість. Вони також можуть мати гарні характеристики ізоляції та стійкості до корозії. Волокна золи-виносу є екологічним функціональним матеріалом з надзвичайно низькою вартістю сировини та без забруднення навколишнього середовища. В 50-60-х роках 20-го століття мінераловатна вата в деяких розвинених країнах (Японія, США, Італія та інші країни) почала використовуватися, а потім отримала широке застосування як теплоізоляційний матеріал; після появи її використання в паперовій технології. Досі дослідження, які використовують волокна золи-виносу у модифікації асфальтобетону, проводяться дуже рідко.

Найгострішою проблемою асфальтобетону в ході інженерної практики (як згадувалося раніше) є покращення властивостей асфальту. Модифікація властивостей асфальту є найефективнішим способом покращення ходових якостей та довговічності дорожніх покриттів. Ця проблема вирішується шляхом зміни властивостей асфальту та асфальтобетону шляхом додавання різних добавок, волокон та полімерів. Основними типами асфальтобетонних покриттів є асфальтобетонні суміші, покриття за методом холодного та гарячого оновлення, епоксидно-асфальтові покриття (які використовуються на найскладніших ділянках, таких як мости, шляхопроводи та аеропорти). Ця дисертація зосереджена на використанні волокон золи-виносу з теплових електростанцій Китаю для асфальтобетонних покриттів, виготовлених холодним і гарячим способами, та епоксидно-асфальтобетонних покриттів.

Технологія, використана в цьому дослідженні для виробництва волокон золи-виносу з теплових електростанцій у Китаї, імітує технологію виробництва базальтових волокон, сировина для яких наведена в таблиці 1.1. Як згадувалося раніше, базальтові волокна широко використовуються для поліпшення

експлуатаційних характеристик матеріалів дорожнього покриття завдяки своїм добрим властивостям. На рисунку 1.2 показані волокна золи-виносу з теплових електростанцій Китаю.

Таблиця 1.1. Склад та вміст золи-виносу

Інгредієнт	Масова частка, %
Зола вугілля	85-93
Стабілізатор тепла	5-15
Пластифікатор	0,8-1
Диспергент	0,3-0,6
Модифікатор удару	0,4-0,7
Всього	100



Рис 1.2 Волокна золи-виносу з теплоелектростанцій Китаю

На основі наведених спостережень та розуміння золи-виносу, волокон золи-виносу та базальтових волокон, а також досліджень вчених з усього світу щодо властивостей і застосування базальтових волокон, стає очевидним, що базальтові волокна окремо або в синергії з іншими волокнами покращують властивості бетону. В цій дисертації використовуються волокна золи-виносу з китайської теплової електростанції, які мають подібний склад до базальтових волокон. Обґрунтовано припустити, що волокна золи-виносу з китайської теплової електростанції мають потенціал для покращення фізико-механічних властивостей асфальтобетону. Також передбачається подальше дослідження найбільш підходящої масової частки волокон

та інших дорожніх матеріалів для застосування спільно з ними. З огляду на вищевикладене, була зроблена спроба використати волокна, виготовлені із золи-виносу китайських теплових електростанцій, як армуючий та структурний додаток у гарячому литому асфальтобетоні (ГЛАБ), холодному литому асфальтобетоні (ЛЕМС) та розробленому епоксидному асфальтобетоні.

1.2 ГЛАБ and ЛЕМС

Нині литий асфальтобетон широко використовується як ефективний матеріал. Литий асфальтобетон розраховує на власну рухливість суміші для укладання та формування без утрамбовування. Це суміш асфальту з високим вмістом асфальту та мінерального порошку з менш ніж 1% порожнеч; тому покриття з литого асфальтобетону є водонепроникним [29]. В'язучими речовинами для литого асфальтобетону є звичайний або модифікований асфальт. Міські автомагістралі не витримують сучасної інтенсивності руху та змінних навантажень, які виникають внаслідок частих зупинок і розгонів автомобілів, що рухаються за міським циклом. Як наслідок, асфальтобетонні покриття, виготовлені зі звичайних фрезерованих сумішей, можуть не витримувати навіть 3 років експлуатації [30].

Минулого року Україна посіла 137 місце серед 144 країн світу за якістю дорожнього покриття.

Загалом країна має 169 600 кілометрів доріг, з них 2100 кілометрів - з бетонним покриттям. Більшість з них (97%) потребують ремонту, і лише 3% оцінюються Міністерством інфраструктури України як такі, що перебувають у «нормальному стані». Водночас у міністерстві підрахували, що 30% доріг потребують капітального ремонту. У проекті бюджету на 2018 рік на ремонт та будівництво доріг передбачено 40 млрд грн., у 2019 - понад 51 млрд грн., у 2020 - майже 70 млрд грн.

Крім того, зі збільшенням обсягу дорожнього руху, використання великогабаритних та перевантажених транспортних засобів термін служби дорожнього покриття значно скорочується. Серед причин великогабаритні та перевантажені транспортні засоби завдають дорожньому покриттю найбільш серйозної шкоди, що призводить до колієутворення, розтріскування, продавлювання та інших ранніх пошкоджень. Тому виникає необхідність докорінно покращити

якість дорожніх покриттів за рахунок підвищення їх ущільнення, стійкості до зсуву, розтріскування, стирання та шорсткості. У більшості регіонів потрібні більш щільні дорожні покриття, особливо зі змінених асфальтобетонних сумішей, здатних з часом витримувати стирання, корозію та розтріскування. Однією з сучасних технологій, здатною захистити будівельну конструкцію дорожнього покриття та швидко відновити його транспортно-експлуатаційні характеристики, є гарячий литий асфальтобетон та холодний литий асфальтобетон (тонкошарові укладачі для розливу емульсійно-мінеральних сумішей).

Основною відмінністю гарячих литих асфальтових сумішей від звичайних сумішей є підвищений вміст мінеральних матеріалів і асфальту. В результаті, ГЛАБ має хорошу пластичність та плинність під час будівництва, що полегшує його укладання та ущільнення, а також дозволяє більш рівномірно покривати дорожнє полотно. Не тільки це, ГЛАБ має високу міцність і здатність витримувати великі навантаження від важких транспортних засобів та напруги за різних кліматичних умов, що робить його довговічним варіантом дорожнього покриття. [31] Він швидко твердне після укладання, що дозволяє швидко вводити ділянку в експлуатацію, скорочуючи час очікування після будівництва та допомагаючи якнайшвидше повернути дороги в рух. ГЛАБ також забезпечує гладку та відносно тиху поверхню для руху, що підвищує комфорт і безпеку водіння. З точки зору охорони навколишнього середовища та переробки ресурсів, ГЛАБ може бути перероблений, а асфальт зі старого покриття може бути повторно використаний у новому дорожньому будівництві. Однак для забезпечення довговічності шару литого асфальтобетону необхідно ретельно підбирати його склад, особливо співвідношення асфальту до кількості мінеральних частинок розміром менше 0,071 мм.

Головне завдання тонкошарового укладача для розливу емульсійно-мінеральних сумішей - продовжити термін служби існуючих покриттів шляхом герметизації тріщин і ям. Застосування тонкошарових покриттів також призводить до значного підвищення шорсткості та зчеплення, а також однорідності покриття. Крім того, воно запобігає утворенню тріщин та захищає існуюче покриття від насичення водою. [32]

Розв'язуючи цю проблему, важливо враховувати досвід різних країн. Цікаве дослідження було проведено американським науковцем Caltrans спільно з Департаментом транспорту Каліфорнії. У роботі були проаналізовані результати реалізації протягом 35 років з 1983 по 2017 рік, включно з 37 стратегіями відновлення доріг, 17 для асфальту та 20 для покриття з портландцементу (надалі ПЦ). Було визначено 10 найкращих стратегій відновлення дорожнього покриття, географічні та часові зміни в обсягах відновлювальних робіт, експлуатаційні витрати та стан дорожньої мережі. Крім того, було розглянуто 10 варіантів відновлення дорожнього покриття, включаючи повторне використання старого покриття, заміну плит дорожнього полотна та латковий ремонт. Це масштабне дослідження показало, що заміна класичних асфальтобетонних покриттів є найпростішою у виконанні. Водночас близько 19% асфальтобетонних покриттів потребують щорічного латкового ремонту (по суті, асфальтобетонні покриття необхідно повністю змінювати кожні 5-6 років) порівняно з приблизно 12% покриттів із ПЦ. Разом з тим, на покриттях з ПЦ практично відсутні превентивні заходи, які зазвичай пов'язані з повною заміною дорожнього покриття і, в поодиноких випадках, із ремонтом на місці. Тому розробка нових ремонтпридатних покриттів є досить популярним напрямком, особливо покриттів з міцнішими характеристиками не меншими, ніж у цементобетонних плитних покриттів. [33,34]



Рис. 1.3 Різні пошкодження дорожнього покриття

Історія тонкошарових укладачів для розливу емульсійно-мінеральних сумішей (ЛЕМС) починається в 1930-х роках, коли суміш дрібного гравію, асфальтового в'язучого та води була вперше використана в Німеччині для посилення злітно-посадкової смуги в берлінському аеропорту Штаркен. Таку суміш називали "мулом", і з часом ця незвичайна тоді техніка була використана для відновлення німецьких автомагістралей. Протягом наступних кількох років проводилися дослідження щодо впровадження цієї технології, але лише в 1960-х роках "мул" почав широко використовуватися завдяки появі нових емульгаторів для асфальтових емульсій та технологій, які дозволяли якісно перемішувати компоненти сумішей.

Починаючи з 1960-х років, поступово почали відходити від ремонту дефектів покриття до промислового та економічно ефективного превентивного захисту верхнього шару покриття. Превентивні роботи зводилися до відновлення водостійкості верхнього шару за допомогою рідкої суміші, яка повністю і рівномірно розподіляється по поверхні та складається з в'язучого, дрібного гравію, цементу і хімічних добавок, одночасно покращуючи адгезійні властивості покриття [35]. У зв'язку з використанням в'язучого у вигляді емульсії в цих технологіях існує потреба в зниженні норми витрати в'язучого та зниженні експлуатаційних витрат. Завдяки використанню асфальтових емульсій для формування тонкого захисного шару витрати в'язучого скорочуються в 8-10 разів у порівнянні з гарячим асфальтобетоном і на 35-40% у порівнянні з гарячою поверхневою обробкою асфальтом, при цьому покращуються транспортно-експлуатаційні якості покриттів. [36]

У середині 1970-х років технологія досягла якісно нового рівня тонкошарових холодних литих асфальтобетонних покриттів на модифікованих емульсіях - мікросюрфейсинг (micro surfacing). Технологію розробила німецька компанія "Рашик" на основі емульсій, вироблених за французьким патентом з 1967 року. Компанія Krauss (Робдорф, Німеччина) першою почала укладати тонкі шари з холодного асфальтобетону на тротуарах. Завдяки застосуванню у своєму складі полімерних добавок були значно покращені фізико-механічні та експлуатаційні властивості ламінованого матеріалу.

Американська суміш "Slurry-Seal" (компанії Valley Slurry Seal Co. та ARKEMA Group) стала одним з перших методів формування захисного шару зносу за одну технологічну операцію та швидкого відкриття відремонтованої ділянки для руху транспорту через 1,5-2 години, при цьому дана технологія має значні економічні переваги, адже в результаті застосування цієї техніки вартість знижується втричі порівняно з технологією укладання асфальтобетонних сумішей [37]. Ці суміші набувають все більшого поширення в розвинених країнах, наприклад, у Німеччині їх називають Schlämme (мікросюрфейсинг), у Франції - холодним литим асфальтобетоном. У СРСР СоюздорНИИ розробляв аналогічні суміші, тобто адгезиви на основі аніонних емульсій, що називалися ЛЕМС. Однак було припинено започатковані СоюздорНИИ роботи зі створення матеріально-технічної і технологічної бази для будівництва ТШ для ЛЕМС через відсутність емульсій з необхідними стабілізуючими властивостями, а також втрату накопиченого досвіду з їх виробництва. [38]

В Україні ця технологія почала знаходити своє застосування з 1990-х років, але ще не набула широкого поширення у зв'язку з не повністю вивченим конструкторсько-технологічним етапом проектування складу сумішей. Однією з проблем використання цієї технології є її застосування в якості сповільнювача зчеплення для сумішей, що знижує швидкість набуття литими укладеними сумішами когезійної міцності, а також утворення та твердіння тонких покриттів і своєчасне відкриття руху транспорту.

У ході дослідження також розглядався вплив пігментів, оптичних і теплових властивостей покриття на довговічність дорожнього полотна. У результаті було встановлено, що яскравість кольору є основним відбиваючим фактором для видимого світла, але вона не впливала на коефіцієнт відбиття в ближній інфрачервоній області [39]. Коефіцієнт відбиття покриттів із легуванням хромом становив близько 60%, тоді як коефіцієнт відбиття в ближній інфрачервоній області був таким же високим, як і для білих покриттів. Співвідношення між відбиттям світла та відбиттям видимого світла є лінійним і становить близько 95% для темних і середньо забарвлених покриттів, тоді як для світлих покриттів воно зростає

експоненціально. Отже, дорожні суміші з більш високим коефіцієнтом відбиття світла меншою мірою схильні до впливу тепла і, таким чином, до пошкодження і відшарування. Водночас вони не повинні мати антивідбивних властивостей для безпеки дорожнього руху. Таким чином, антивідблискові властивості можуть забезпечити універсальне поєднання дорожніх матеріалів, що також необхідно враховувати при розробці таких матеріалів [40].

Метою цієї частини дослідження є розробка складу та вивчення властивостей ГЛАБ і ЛЕМС, в яких використовуються волокна із золи-виносу теплових електростанцій, для влаштування тонких покриттів на автомобільних дорогах усіх категорій та призначень. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- Проаналізувати проблемні питання дослідження гарячого та холодного литого асфальтобетону;
- Проаналізувати методику досліджень та визначити показники якості вихідних матеріалів ГЛАБ та ЛЕМС;
- Розробити технічні критерії проектування оптимального складу гарячого литого асфальтобетону з урахуванням розшарування та розпаду суміші;
- Визначити час формування зносостійкого шару, показник зносу покриття у вологому стані при використанні в цих видах литих сумішей;
- Визначити доцільність використання волокон із золи-виносу теплових електростанцій, виготовлених у Китаї, як армуючої та стабілізуючої добавки для ГЛАБ і ЛЕМС.

У цій роботі було використано стандартизовану методологію та методи дослідження відповідно до українських нормативних документів. [41]

1.3 Епоксидний асфальтобетон

Як було описано раніше, фактичний термін служби асфальтобетонних покриттів менший, ніж передбачається розрахунками згідно з чинними нормативами. У процесі експлуатації звичайний асфальтобетон не витримує особливо складних умов експлуатації: інтенсивного руху транспорту, різкого гальмування автомобілів, режимів розгону, розливів палива та мастил на автозаправних станціях та стоянках

[42, 43]. Передчасний ремонт та відновлення дорожніх покриттів потребують мільйонів доларів додаткових витрат, які могли б бути спрямовані на будівництво нових та реконструкцію існуючих доріг. Однією з основних причин швидкого руйнування покриттів під інтенсивним рухом є властивості асфальту. Найбільш чутливим асфальт є до дії транспортних навантажень та впливу кліматичних факторів. Як термопластичний матеріал, влітку за високих температур він розм'якшується, а посеред суворої зими - стає твердим і крихким. Це, у поєднанні з поганою адгезією асфальту до каменю, призводить до утворення колій, тріщин, ям та вибоїн у покритті.

З огляду на вищевикладене, безпосередня модифікація асфальту є найефективнішим способом покращення експлуатаційних характеристик та довговічності дорожніх покриттів. Нині в країнах Західної Європи, США та Австралії проявляється великий інтерес до використання термореактивних полімерів (тобто епоксидних смол) як модифікаторів. Різні типи асфальтобетонних сумішей, що містять епоксидні смоли, відомі як епоксидний асфальт. Проведені дослідження показали, що епоксидно-асфальтові покриття мають високі транспортно-експлуатаційні характеристики. При заміні 20-35% асфальту на епоксидний компонент значно покращилися міцнісні характеристики асфальтобетонних покриттів, особливо за високих температур, підвищилася їх стійкість до колієутворення без погіршення низькотемпературних показників. Епоксидний асфальт - це гарячий асфальтобетон, виготовлений із використанням в'язучого з високим вмістом епоксидної смоли та модифікованого затверджувачем [44]. Під час приготування асфальтобетонної суміші відбувається змішування та хімічна взаємодія смоли та затверджувача, в результаті чого утворюється жорстка полімерна сітка. Реакція призводить до незворотного затвердіння (термотвердіння) в'язучого.

За низьких температур реакція протікає повільно та значно прискорюється з підвищенням температури. Таким чином, температура навколишнього середовища визначає, як довго суміш залишається пластичною і може наноситися на покриття [45]. Зважаючи на властивості бітуму та епоксидних смол, вміст останніх значно

перевищує вміст термопластичного полімеру і становить від 20% до 35% від маси в'язучого [46]. Властивості полімеризованого бітумно-епоксидного в'язучого настільки відрізняються від вихідного бітуму, що мова йде не про поліпшення його якості, а про кардинальну зміну природи. Результати випробувань показують, що різниця в межах втоми за вигину між звичайним асфальтобетоном та епоксидно-асфальтом є щонайменше десятикратною, а термореактивна природа в'язучого запобігає зсуву та утворенню колійності в епоксидних асфальтобетонних покриттях.

Проте відомо, що однією із характеристик епоксидно-асфальту є здатність набирати міцність при тривалій експлуатації (до 1 року), що є недоліком при використанні таких покриттів у верхніх шарах дорожнього одягу [47,48]. Це призведе до затримки у відкритті руху транспорту, особливо на дорогах більш високих категорій, що спричинить порушення режиму руху та незручності для перевезення пасажирів. Крім того, необхідно мати на увазі, що приріст міцності протягом такого тривалого періоду часу в умовах високих інтенсивностей та щільності транспортних потоків, звичних для більш високих категорій доріг, може призвести до виникнення деформацій (пластичності) та скорочення терміну служби [49].

З метою прискорення часу схоплювання епоксидного асфальтобетону було досліджено введення до розроблених епоксидно-асфальтних складів волокон із золи-виносу вугільних теплових електростанцій як підсилювальної та структуруючої добавки, що дозволить прискорити цикл формування дорожнього покриття та посилити асфальтову матрицю в епоксидному асфальтобетоні. Введення волокон сприятиме збільшенню терміну служби дорожнього одягу з епоксидно-асфальту та дозволить забезпечити високі його експлуатаційні якості.

Щодо вартості, асфальто-епоксидне в'язуче в середньому в 12 разів дорожче за традиційний асфальт [50,51]. Однак технічні характеристики епоксидно-асфальту, такі як межа втоми при згині, межа постійних деформацій тощо, більш ніж у 10 разів перевищують відповідні показники вихідного асфальтобетону. Таким чином, збільшений термін служби епоксидно-асфальту робить матеріал економічно вигідним в особливо складних дорожніх умовах: ділянки доріг із високою інтенсивністю руху

(понад 20 000 автомобілів на добу), перехрестя, вулиці у великих містах та місця з високою концентрацією ДТП [52].

Метою дослідження є розробка складу та вивчення фізико-механічних характеристик гарячого дрібнозернистого асфальтобетону з додаванням епоксидної смоли та волокна із золи-виносу теплових електростанцій. Згідно з поставленою метою було визначено наступні завдання:

1. Визначити властивості бітуму та асфальтового в'язучого з додаванням епоксидної смоли та волокна із золи-виносу теплових електростанцій;
2. Встановити оптимальну кількість введення волокна в асфальтобетонну суміш;
3. Здійснити підбір складу асфальтобетону з додаванням епоксидного бітуму та волокна із золи-виносу теплових електростанцій;
4. Визначити ефективний спосіб введення волокна (в асфальтобетонну суміш);
5. Дослідити фізико-механічні та структурно-реологічні властивості епоксидного асфальтобетону;
6. Розробити технологію приготування епоксидно-волокнистого асфальтобетону.

1.4 Основні методи модифікації бітуму в асфальтобетоні

Основним компонентом епоксидно-асфальтобетону є модифікований асфальт, за рахунок якого забезпечуються його експлуатаційні показники та довговічність.

Відомо, що за останні десятиріччя термін служби асфальтобетонних покриттів на автомобільних дорогах, мостах, аеродромах тощо знизився у 2-3 рази. Понад 90 відсотків матеріальних, трудових та енергетичних ресурсів, що виділяються для дорожнього господарства, витрачається не на будівництво нових доріг, а на відновлення та реконструкцію старих асфальтобетонних покриттів. Таке становище стримує розвиток мережі доріг з твердим покриттям. Зі збільшенням вантажопідйомності автомобілів і інтенсивності транспортних потоків на дорожній одязі значно зросли динамічні навантаження, від чого підвищились вимоги до якості асфальтів [53-56].

Сучасне дорожнє будівництво вимагає використання високоякісних дорожньо-

будівельних матеріалів, в іншому випадку просто неможливо забезпечити високий рівень експлуатаційних властивостей та довговічності асфальтобетонних покриттів. Нафтові дорожні асфальти є найважливішим компонентом асфальтобетонних сумішей, а також вони найвразливіші до різних деформацій в процесі експлуатації [57]. Після модернізації нафтопереробних заводів асфальт проходить більш глибоку переробку, через що значніше втрачається легка, пластична частина. Низька якість дорожніх асфальтів та відсутність в них тріщиностійкості, еластичності, зчеплення (адгезії) є однією з основних причин передчасного руйнування асфальтобетонних покриттів на автомобільних дорогах, мостах та аеродромах [58].

Нині для отримання високої якості асфальту вживаються два основних прийоми забезпечення необхідних структурно-механічних властивостей залежно від стадії або фаз виробництва асфальту: методи компаундування в момент виробництва асфальту, і модифікація властивостей асфальтового матеріалу на етапі виготовлення товарних продуктів [59]. На рисунку 2.4 показано основні методи модифікації асфальту, кожен із яких має свої переваги та недоліки.

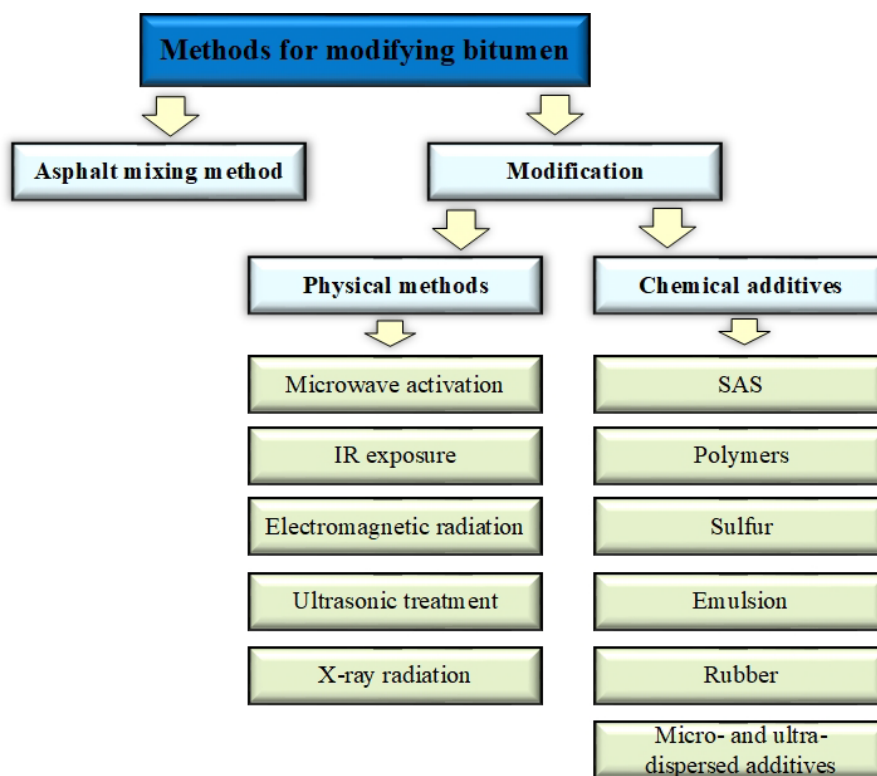


Рис. 2.4 - Основні методи модифікації асфальтобетону

При модифікації асфальту можна виділити такі основні методи: фізичні методи, що базуються на механічному та фізичному впливі на асфальтове середовище, та

хімічні методи, що базуються на внесенні до складу асфальту різних хімічних добавок.

Фізичними методами зміни властивостей та якості асфальту є: мікрохвильова активація, ультразвукова обробка, вплив магнітних, акустичних та електромагнітних полів, кавітація [60-64].

При модифікації асфальту можна виділити такі основні методи: фізичні методи, що базуються на механічному та фізичному впливі на асфальтове середовище, та хімічні методи, що базуються на внесенні до складу асфальту різних хімічних добавок. Фізичними методами зміни властивостей та якості асфальту є: мікрохвильова активація, ультразвукова обробка, вплив магнітних, акустичних та електромагнітних полів, кавітація [60-64]. Аналіз літератури показує, що перевагами мікрохвильових пристроїв для модифікації асфальту є висока ефективність перетворення електромагнітної енергії в теплову, рівномірний розподіл енергії по всьому об'єму матеріалу, що обробляється, малі габарити пристроїв, висока технологічність, гнучкість використання та легкість обслуговування. Тому використання мікрохвильової енергії для обробки органічних в'язучих є актуальною задачею, адже покращує фізико-механічні властивості та довговічність асфальтобетону. Покращується адгезія асфальту з каменем завдяки окислювальному процесу, який проходить в асфальті під дією мікрохвильового випромінювання. Збільшується вміст аліфатичних нафтонових і асфальтових кислот, ароматичних та гетероциклічних структур. Зміна складу асфальту впливає на його взаємодію з мінеральними матеріалами.

Ультразвукова обробка асфальту - це спосіб модифікації асфальту за допомогою ультразвукової технології, спрямований на покращення характеристик асфальту для адаптації до різних дорожніх умов та кліматичного середовища. Ультразвукова обробка може допомогти покращити стабільність та довговічність асфальту, надаючи йому кращу стійкість до деформації при високих температурах, важких навантаженнях або інтенсивному русі; вона може зменшити швидкість старіння асфальту, продовжуючи термін його служби та зменшуючи потребу в технічному обслуговуванні та ремонті; при ультразвуковій обробці асфальт може мати посилену

адгезію до заповнювачів, що може покращити загальні експлуатаційні характеристики покриття та його довговічність; порівняно з деякими традиційними методами модифікації, ультразвукова модифікація зазвичай не потребує додаткових хімічних добавок, що допомагає мінімізувати вплив на довкілля. Звичайно, ультразвукова модифікація асфальту має свої недоліки: вона дорожча, що може збільшити вартість будівництва чи реконструкції дороги; технічно складна; ультразвукова обробка може потребувати додаткового часу та етапів будівництва, що може вплинути на графік та терміни реалізації проєкту.

Модифікація асфальту хімічними способами за допомогою різних модифікаторів: в'язучих речовин, розчинників, пластифікаторів, структуруючих агентів, стабілізаторів [65].

Загальновідомо, що асфальтові в'язучі є, звичайно, практично відходами процесу переробки нафти [66]. Тому першочерговим завданням модифікації такого асфальту є покращення його фізичних, механічних та хімічних властивостей. З метою покращення довговічності та якості таких матеріалів до їх складу вводять різноманітні добавки, що дає змогу покращити властивості, притаманні асфальту, та відкоригувати їх у напрямі, що диктується практикою [67].

Добавки, які додають до асфальту, можна класифікувати за такими критеріями: матеріальний склад, функціональне використання та назви основних складових речовин, сполук і активних інгредієнтів. Залежно від матеріального складу добавки поділяють на: мінеральні добавки, органічні добавки та органо-мінеральні добавки [68].

Поділ добавок залежно від основних складових речовин може бути таким: мінеральні (азбест, шлаки тощо), низькомолекулярні органічні, полімерні тощо. Класифікацію добавок наведено в табл. 2.5.

Таблиця 2.5 - Класифікація добавок для модифікації асфальту

№	Допоміжні класифікаційні ознаки	Класифікація підгруп у межах допоміжних груп
1	Фізичний стан	Рідини, в'язкі речовини, пасти, тверді речовини (грудки та гранули), порошки

2	Спосіб внесення	Вносяться в асфальт, вносяться в суміш з перемішуванням
3	Тип взаємодії добавки з асфальтом	Хімічна модифікація, фізико-хімічна модифікація, фізична модифікація
4	Кількість компонентів у добавці	Однокомпонентні, двокомпонентні, багатоконпонентні
5	Кількість одержуваних функціональних ефектів	Монофункціональні, біфункціональні, поліфункціональні
6	Основні складники й сфера застосування компонентів асфальтових матеріалів	Наповнювач, емульгатор, стабілізатор

Найбільш широко при виробництві асфальтобетону застосовуються добавки з адгезійними властивостями - смоли, поверхнево-активні речовини та полімери. введення таких добавок покращує умови змочування на поверхні асфальтового мінерального матеріалу, формуючи адсорбційний шар полярних груп, повернених до поверхні мінерального матеріалу, та вуглеводневої фракції об'єму асфальту. це знижує температуру та час отримання однорідної суміші, а також значно знижує інтенсивність процесу старіння бітуму. завдяки застосуванню поверхнево-активних речовин на границі розділу мінерального матеріалу та бітуму може утворюватися мономолекулярний хемосорбційний шар, що сприяє утворенню міцних зв'язків між ними [62].

Каучук (полібутадиєн, натуральний каучук, неопрен, бутилкаучук), термопластичні полімери (поліетилен, поліпропілен, етиленвінілацетат), сірка, гранульована гума та інші полімери найчастіше використовуються при виробництві пбв (полімерно-бітумного в'язучого). [69]

Механізм дії полімерних добавок можна пояснити тим, що полімери створюють тривимірну просторову еластичну структуру при поєднанні з дорожнім асфальтом. основна мета введення полімерів в асфальт - зниження температурної сприйнятливості асфальту, тобто підвищення твердості влітку та зниження взимку, надання асфальту еластичності - здатності до оборотної деформації в усьому діапазоні експлуатаційних температур. якщо ця мета досягнута, асфальтобетон з пбв матиме вищу стійкість до зсуву, стійкість до низькотемпературного розтріскування

та довговічність.

Останнім часом у всьому світі проводяться дослідження щодо покращення структури асфальту із застосуванням волокнистих наповнювачів. крім того, ці волокнисті наповнювачі можуть використовуватися як адсорбенти, модифікатори хімічних реакцій. покращення властивостей асфальту, яке спостерігається при використанні волокон, пов'язане з фізико-хімічними процесами та явищами, що відбуваються на поверхні взаємодіючих фаз.

Серед волокнистих наповнювачів особливе місце займають волокна золи-виносу з теплових електростанцій, виготовлені в Китаї. завдяки впорядкованій мікроструктурі частинок волокна мають багато позитивних властивостей: гарну електропровідність та адсорбційні властивості, хімічну та термічну стабільність, високу міцність при високих значеннях пружної деформації. матеріали на основі волокон можуть успішно використовуватися як структурні модифікатори для конструкційних матеріалів.

Введення волокон із золи-виносу теплоелектростанції, виготовленої в Китаї, до складу асфальту суттєво підвищило міцність та еластичність отриманого асфальтового покриття. Було продемонстровано, що навіть невеликі кількості добавки (4-5% по масі) можуть збільшити міцність бітуму на стиск, залежно від глибини вдавлювання у зразок.

Найважливішою умовою міцності та довговічності асфальтобетону є адгезія асфальту до поверхні мінеральних матеріалів. Оскільки мінеральний матеріал є переважно гранітом, а адгезія асфальту до поверхні гранітних частинок недостатня, волокна, змішані з епоксидною смолою, мають дуже високі адгезійні властивості та забезпечують міцне зчеплення асфальту з мінеральним матеріалом. Армування досягається додаванням волокон та епоксидних смол до нафтового бітуму та його спільної структури. Це дозволяє створювати нові композити з унікальними властивостями та характеристиками.

Таким чином, волокнисті наповнювачі, особливо ті, що мають високі механічні властивості, вважаються ефективним засобом покращення міцності композитних асфальтових матеріалів. Волокна вводяться в асфальтобетонну суміш для її

армування та перетворення на композитний матеріал. Загалом волокна поведуться як "зародки" кристалів, але кристали витягнуті, тому що частинки не загострені, а видовжені. У процесі росту кристали переплітаються і частково врастають один в одного, утворюючи просторову сітку, яка пронизує і з'єднує всю асфальтобетонну суміш в єдине ціле, покращуючи її фізичні, механічні та реологічні властивості, забезпечуючи довговічність матеріалу в покритті.

2.ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОБЛЕМ ЗАСТОСУВАННЯ ЛИТОГО АСФАЛЬТОБЕТОНУ ТА ЕПОКСИДНОГО АСФАЛЬТОБЕТОНУ

2.1 Дослідження застосування литого асфальтобетону

2.1.1 Гарячий литий асфальтобетон

Гарячий литий асфальтобетон використовується для облаштування тонких покриттів та вирівнювання існуючих асфальтобетонних і цементобетонних покриттів доріг.

Гарячий литий асфальтобетон потребує влаштування за певними нормами: щоб підвищити стійкість до пластичної деформації, литий асфальтобетон готують на асфальтовому в'язучому з підвищеною в'язкістю.

Через високу в'язкість асфальтового в'язучого, яке використовується в литих сумішах, та для забезпечення необхідної технологічної плинності, литі суміші готують за високих температур (180-220°C). Суміш можна готувати на звичайному асфальтобетонному заводі, але час замішування при цьому збільшується на 25-50% порівняно зі звичайною гарячою сумішшю. Фірма "VIBAU" (Німеччина) випускає спеціальні мішалки для приготування литих сумішей, які відрізняються вертикальним розташуванням валів [70-71].

Низька в'язкість литої суміші призводить до її легкого розшарування. Крім того, є проблема підтримання високих робочих температур при транспортуванні до об'єкту виробництва робіт. Тому транспортування литої суміші на робоче місце здійснюють за допомогою спеціального асфальтозмішувача-термоса.

Температура суміші повинна складати 190-200 °C за температури повітря більше +10 °C та не нижче 220 °C за температури повітря від +10 °C до +5 °C. Без підігріву зберігати суміш у звичайних ємностях для зберігання сумішей неможливо, бо при її охолодженні вона втрачає плинність. За температури повітря більше +10 °C та дальності розвезення суміші на відстань 40-60 хвилин від асфальтобетонного заводу, литу суміш транспортують з АБЗ у кузовах самоскидів з тентовим укриттям. За температури повітря від +10 °C до +5 °C або за великої дальності розвезення литої суміші від асфальтобетонного заводу її транспортують за допомогою

асфальтозмішувача-термоса.

Виготовлення покриття відбувається асфальтоукладачем, після цього розподіляється та втоплюється чорний щебінь з витратою 5-6 кг/м².

Щебінь розподіляється рівномірно, а вже після охолодження покриття до 50 °С відбувається прикатування легким котком. Не втоплений щебінь підмітається з поверхні.

Для пришвидшення термінів відкриття руху покриття рекомендується обробити водоочисним розчином поверхнево-активної речовини (ПАР).

Суміші для облаштування литого асфальту та асфальтобетону мають багато переваг. Серед них можна відзначити:

- У високо текучих сумішах ущільнення не потрібне. Досить тільки якісне розрівнювання, після охолодження покриття можна відкривати для руху;

- Відсутня потреба в обробці основи емульсією чи бітумом, укладка литих сумішей може відбуватися за температури -15-20 °С;

- Водо-насичення литого асфальтобетону наближається до нуля, що забезпечує високу довговічність.

Разом з тим, литий асфальтобетон має ряд недоліків, які стримують його застосування. Основними з них є:

- Технічні складнощі через необхідність підтримання високих робочих температур та попередження розшарування суміші;

- Підвищена слизькість та низька стійкість до пластичних деформацій;

- Видалення литого асфальтобетону, наявного раніше, є необхідним при влаштуванні нового шару асфальтобетонного покриття.

Ці недоліки спричинили той факт, що нині литий асфальтобетон використовується тільки при відновленні асфальтобетонних та цементобетонних дорожніх покриттів [55].

З метою часткового усунення цих недоліків та розширення області застосування литих сумішей актуальним є правильний підбір складу асфальтобетонної суміші. При цьому слід керуватися принципом оптимального поєднання міцності та деформаційної здатності. Важливим при підборі складу є визначення оптимального

співвідношення бітуму і мінерального матеріалу.

Правильно підібрані литі асфальтобетонні суміші можуть бути використані не тільки для виконання відновлювальних робіт, але й для створення якісних шарів зносу з терміном служби більше ніж 20 років.

З метою оптимізації процесу приготування литого асфальтобетону та підвищення його фізико-механічних і експлуатаційних властивостей до складу було введено полімерні добавки, наповнювачі та поверхнево-активні речовини (ПАР). Волокна із золи-виносу, яка утворюється на теплових електростанціях Китаю, ніколи раніше в литих сумішах не використовувалися.

2.1.2 Холодний литий асфальтобетон (лита емульсійно-мінеральна суміш)

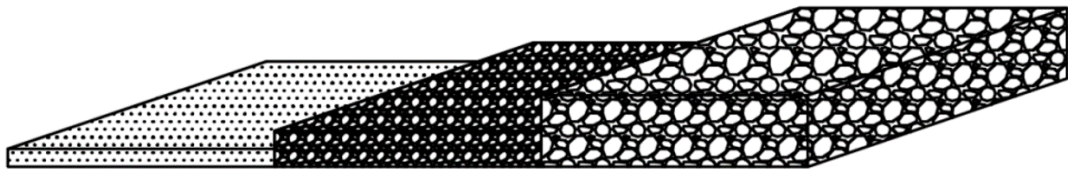


Рис. 2.1 Схематичне зображення пристрою з холодного литого асфальтобетону

Тонкі покриття, виготовлені із застосуванням технології поверхневої обробки, забезпечують високу експлуатаційну якість за низьку вартість. Сьогодні технології Slurry Seal та Microsurfing широко використовуються державними та приватними організаціями для утримання та облаштування покриттів велосипедних доріжок, проїжджих частин автомобільних доріг, аеропортів, парків (рис. 2.1) [73-76].

Над вирішенням проблем, пов'язаних із технологією ЛЕМС (холодний литий асфальтобетон), працює велика кількість дослідників з України та зарубіжних країн. Розробку технології покриттів з ЛЕМС пов'язують з науковими працями вітчизняних та зарубіжних вчених: А.П. Архіпової, Ж. Броссода, М. Одеона, О.В. Бернштейна та інших [77-81]. Прогресивну роль у розвитку та пропаганді цієї технології відіграє Міжнародна Асоціація Slurry Surfacing (ISSA). Німецька Асоціація контролю якості холодних сумішей та Французька центральна лабораторія мостів і доріг теж внесли вагомий вклад в науку приготування цих сумішей. Вітчизняна методика дослідження ЛЕМС розроблена співробітниками СоюздорНИИ в 70-80-і роки ХХ століття.

В Україні, дослідження властивостей щебеню з кількох кар'єрів дозволило дійти висновку про необхідність пред'явлення додаткових вимог до приготування асфальтобетону для ЛЕМС [78-90], на основі результатів досліджень було розроблено методку розрахунку ЛЕМС нежорсткого дорожнього одягу за двома критеріями: стійкістю на зсув та за рівнем прогину підстави з урахуванням впливу температури покриття і основи з огляду на характер короткочасного руху навантаження (автотракторної техніки з великовантажними причепами), розроблено рекомендації зі складання розрахункового складу бетону.

Ця технологія, на думку українських та білоруських науковців, успішно використовується під час поточного утримання та відновлювального ремонту автомобільних доріг загального користування, вулиць міст та під'їзних доріг до населених пунктів. Крім того, суміші застосовують для влаштування покриттів проїжджої частини мостів, тротуарів, аеродромних доріжок, злітно-посадкових смуг, доріжок у парках та зонах відпочинку. Однак головним призначенням ЛЕМС визнано можливість збільшення міжремонтних термінів служби існуючих цементобетонних та асфальтобетонних дорожніх одягів [87-90].

Аналіз ефективності застосування дорожньо-відновлювальних технологій на основі ЛЕМС у порівнянні з використанням традиційних гарячих сумішей показує, що виконання відновлювального ремонту покриття методом slurry seal тричі за розрахунковий 15-річний термін служби виявиться у п'ять разів економічнішим у порівнянні з проведенням двох ремонтів верхнього шару покриття з гарячого асфальтобетону за умови забезпечення міцності дорожньої конструкції. Зарубіжний досвід свідчить, що зараз 1 км міської вулиці (на смузі руху завширшки 9 м) за допомогою використання шару суміші типу Microsurfing товщиною 1-1,2 см ремонтуватимуть у 2,2 рази дешевше, ніж влаштування шару асфальтобетону товщиною 2,5 см, і в 3,5 рази дешевше ніж влаштування покриття з гарячого асфальтобетону товщиною 5 см, при цьому використання емульсійно-мінеральної суміші дозволяє виключити такі затратні технологічні операції: фрезерування, перестановка бортового каменю, інтенсивні роботи з автомобільного транспортування.

Актуальною проблемою будівництва та утримання автомобільних доріг у великих містах є вплив різних технологій на стан навколишнього середовища. Дослідження, проведені компанією "BASF", показали, що під час ремонту одного кілометра автошляху озоноруйнівний ефект від застосування Slurry Seal у чотири рази нижчий, ніж під час використання асфальтобетону. Одночасно Slurry Seal і Microsurfing зменшують викиди CO₂ і NO₂ на 1 кілометр у 3,8 та 4 рази відповідно. Шумність дороги буде на 10-15 % нижчою у порівнянні зі звичайними асфальтобетонними покриттями та на 15-20 % нижчою за покриття поверхневої обробки [91-92].

Крім економічного та екологічного ефекту, ЛЕМС також більше відповідає нормам безпеки дорожнього руху. Як показник для оцінки цієї складової безпеки на дорогах уведено коефіцієнт зчеплення. Вимірювання, проведені лабораторіями NASA в аеропортах із поверхнями Slurry Seal і Microsurfing, визначили, що коефіцієнт зчеплення з покриттям за швидкості руху 60 км/год та 90 км/год дорівнює відповідно 1,12 та 1,37, що в 2,9 рази вище, ніж для звичайних асфальтобетонних покриттів [93].

Особливий інтерес викликають роботи європейських дослідників, які наводять відомості про вплив цементу на покриття із Slurry Seal та дані фірми "Akzo Nobel" про фосфатні емульсійні системи.

Таким чином, узагальнення вітчизняних та зарубіжних даних показує, що технологія ЛЕМС має достатньо переваг у порівнянні з технологіями литого гарячого асфальтобетону та поверхневої обробки (розлив емульсій, механічне фрезерування тощо): низька енергоємність процесу, екологічність, низький рівень шуму, висока водостійкість, хороше зчеплення з існуючими поверхнями, можливість проведення робіт за середньодобової температури вище +5 °С. Крім того, покриття з холодного литого асфальтобетону є економічними, відповідають гігієнічним та екологічним вимогам (видалення поверхневих вод, відсутність пилу, зручність механізованого прибирання) та підвищують комфортність і безпеку руху. Структура поверхні тонкошарового покриття, влаштованого за технологією Slurry Seal, показана на рис.2.2.



Рис. 2.2 Поверхнева структура вирівняних тонких литих асфальтобетонних (ЛЕМС) покриттів

2.1.3 Шляхи підвищення швидкості нарощування інтенсивності зчеплення ЛЕМС

Технологія ЛЕМС - ефективний та комплексний метод відновлення доріг, який пред'являє певні жорсткі та специфічні вимоги до компонентів ЛЕМС. Існують дві основні проблеми, пов'язані із використанням цієї технології. Перша - висока сумарна поверхнева активність (реакційна здатність) мінеральних матеріалів. Сумарна поверхнева активність глинистих частинок, органічних добавок та небезпечних мінералів перевищує допустимі значення цього стандарту. [94]

Інша - використання поверх асфальту асфальтових емульсій, які не забезпечують необхідної швидкості нарощування зчеплення, необхідної для укладання литих сумішей, але допускають інтенсивне формування дорожніх покриттів і своєчасне відновлення дорожнього руху. До таких асфальтів відносяться високовмісні парафінні окислені нафтові асфальти з низькими кислотними показниками. Існування цих двох основних проблем та залежність ЛЕМС від температури та вологості довкілля обмежують застосування цієї технології.

Вітчизняні та зарубіжні дослідники сходяться на думці, що для технології емульгування асфальту, тобто ЛЕМС, найбільше підходять важкі, високов'язкі низькопарафіністі нафтові бітуми, що також містять циклоалканові ароматичні вуглеводні та характеризуються високим вмістом кислот - дистильовані бітуми.[95] Аналіз запасів важких нафт показує, що більшість їхніх світових резервів зосереджена в Канаді, Венесуелі та Туреччині. Важка нафта, також відома як мазут, - нафта, що залишається після видобутку з сирової нафти бензину та дизельного палива; характеризується великою молекулярною масою та високою в'язкістю.

Питома вага важкої нафти зазвичай становить від 0,82 до 0,95, а її теплотворна здатність становить близько 10 000 - 11 000 ккал/кг. Її склад - переважно вуглеводні, з деяким вмістом (близько 0,1-4%) сірки та мікроелементами неорганічних сполук. Це значення густини нафти було визначено та узгоджено на основі класифікаційного аналізу та інформації з баз даних багатьох дослідників, також воно відповідає межі, де видобуток, транспортування та переробка нафти починають ускладнюватися, що призводить до збільшення її собівартості. [96] Високосмілистими вважаються нафти з вмістом смол понад 13%. Високий вміст смол у нафті також призводить до технічних складнощів у процесі видобутку та транспортування нафти, а також у процесі її переробки. Крім того, високий вміст смол сприяє утворенню коксу в процесі переробки, що призводить до закоксування поверхні каталізатора та спричиняє високі економічні витрати. [97]

Таким чином, стає очевидним, що видобуток та використання важких, високов'язких нафт вимагає значних капіталовкладень. Альтернативою є використання готових дистильованих бітумів, що поставляються з-за кордону. На українському ринку добре зарекомендував себе бітум компанії Nynas, який відповідає міжнародним стандартам якості та екологічної безпеки. Крім того, цей бітум сертифікований для використання в Україні та рекомендований Державною службою автомобільних доріг України «Укравтодор» для технології емульгування асфальту. [98] Виробництво бітумів здійснюється фракційною перегонкою в перегінних колонах при атмосферному тиску та у вакуумних перегінних колонах. Особлива конструкція вакуумних перегінних колон дозволяє виділяти необхідні фракції без зниження температур, а час перебування в колоні менший (менше «старіння» бітуму). Але недоліком використання таких бітумів є їхня вартість. [99-108]

Отже, бітуми на основі важких, високов'язких нафт є найкращим вибором для технології ЛЕМС, але при цьому вони є дефіцитними та дорогими.

Компанія AkzoNobel surface chemistry (Нідерланди) після низки досліджень запропонувала використання системи ЛЕМС із рецептурами асфальтових емульсій, що складаються з нетрадиційної фосфорної кислоти та спеціальних емульгаторів,

замінивши хлористоводневу кислоту відповідним емульгатором. Ця система ЛЕМС називається Redipave (що перекладається з англійської як "швидке покриття"). Перевага Redipave полягає в тому, що вона дозволяє використовувати окислений асфальт і поверхнево-активований щебінь, які не є оптимальними для технології ЛЕМС. У той же час висока швидкість формування дорожніх покриттів за технологією ЛЕМС дозволяє зменшити вплив факторів навколишнього середовища (температура, вологість, час доби) на терміни відкриття руху після укладання шару. Проте недоліком цієї системи є складність підбору компонента ЛЕМС за критеріями розпаду, оскільки час розпаду залежить від вмісту цементу в суміші [109-113].

Одним із сучасних популярних варіантів підвищення швидкості нарощування зчеплення є використання спеціальних емульгаторів, полімерних добавок або реакційноздатних наповнювачів у рецептурах асфальтових емульсій. Компанія Akzo Nobel surface chemicals, продукція якої є популярною в Україні, розробила емульгатори Redicote 505 і Redicote 540 спеціально для використання в емульсіях на основі окисленого бітуму. Додавання певної кількості цих емульгаторів у водну фазу разом зі стандартними емульгаторами, що виробляються компанією, прискорює формування міцності зчеплення ЛЕМС. Конкурентом AkzoNobel surface chemistry на європейському ринку є французька компанія СЕСА, яка також розробила ряд спеціальних емульгаторів під назвою Stabiram. Продукт Stabiram MS8 вирішує проблему збільшення зчеплення в цьому асортименті та базується на похідному жирної аміни.

У США компанія Valley Slurry Seal розробила спеціальні продукти для швидкого затвердіння, такі як ливарні суміші Slurry Seal - амідні амінні емульгатори на основі жирних кислот, що містять кілька амінів, Roadchem micro-surfacing (імідазоліновий емульгатор Roadchem 200, Roadchem 201, Roadchem 236). Також розроблено спеціальний емульгатор на основі жирного діаміну Roadchem 400 для використання в емульсіях на основі різних типів бітуму, включаючи високовмісні парафінові бітуми з високим рівнем асфальтенів і низькою проникністю. Ці емульгатори можна використовувати окремо або у рекомендованих сполуках окремо чи з полімерами. Однак процес, за допомогою якого емульгатори набувають сили

зчеплення, недостатньо вивчений щодо вітчизняної сировини.

Іншим можливим способом підвищення швидкості нарощування зчеплення ЛЕМС є використання різних полімерних модифікаторів для поліпшення якості окислених асфальтів і катіонних асфальтових емульсій на їхній основі, які традиційно доступні на українському ринку. Найбільш поширеними модифікаторами асфальту й асфальтових емульсій є полімери, такі як натуральний каучук, стирол-бутадієнові сополімери, стирол-ізопренові сополімери, ізобутилен-ізопренові сополімери, поліхлоропрен та інші. Найбільш використовуваними полімерами в рецептурах катіонних емульсій в Україні є синтетичний латекс Tortex A і Tortex B та натуральний латекс Algoltex c від Algol Chemicals (Фінляндія/Швеція) і Butonal NS 198 від BASF (Німеччина). Tortex A і Tortex B є SBR (стирол-бутадієновий синтетичний каучук). Algoltex C - це модифікований натуральний каучуковий латекс. Латекс Butonal NS 198 належить до категорії термопластичних еластомерів типу SBR і є водною дисперсією сополімеру бутадієн-стиролу. Однак використання цих емульгаторів також є досить дорогим [73-76,98-99].

Дослідження показали, що інден-кумаронова смола (надалі ІКС) є речовиною з високими адгезійними та емульгуючими властивостями, яка може використовуватися як модифікатор асфальту та асфальтових емульсій. ІКС є сополімером індену, бензофурану, стиролу та їх похідних, а її вартість значно нижча за ціну модифікатора. [116] Проведені дослідження показали можливість модифікації асфальту смолами ІКС з метою підвищення його температури розм'якшення та адгезії до мінеральних матеріалів. Сировиною для виробництва смол ІКС може бути один із побічних продуктів коксохімічного виробництва - важкий бензол (далі - ВБ), який часто називають «важким бензином». ВБ є продуктом перегонки бензинової фракції, яка є результатом термічного руйнування органічної частини вугілля в процесі коксування. Модифікація нафтового асфальту ІКС не лише покращує властивості останнього, а й ефективно утилізує один із побічних продуктів коксохімічного виробництва (фракцію ІКС). Властивості бітуму, модифікованого ІКС, вказують на можливість підвищення швидкості приросту когезійної міцності ЛЕМС.[170]

Вивчено застосування фосфогіпсу, шлаку та сланців як активних наповнювачів. Проте ці добавки вводяться у вигляді порошку до складу мінерального порошку (5% від маси мінерального матеріалу). Вони розподіляються нерівномірно і потребують збільшення часу перемішування. Тому таке рішення не отримало широкого застосування.

У цій дисертації пропонується використання волокон золи виносу теплових електростанцій Китаю як добавки до мінеральних порошоків, яка при змішуванні з полімерами може стати найкращим способом покращення міцності та довговічності шарів холодноукладеного модифікованого бетону (ЛЕМС).

2.2 Огляд конструктивного аналізу міцних епоксидно-асфальтових покриттів

2.2.1 Використання "Шелл Епоксі Асфальту"

Загальновідомо, що звичайний асфальтобетон не витримує особливо складних умов експлуатації, руху важких вантажних автомобілів, різкого гальмування та розгону автомобілів, розливів палива та мастильних матеріалів на автозаправних станціях та автостоянках під час експлуатації [117-119].

У відповідь на це компанія Шелл у 1960-х роках розробила високоефективний асфальтобетон під назвою "Шелл Епоксі Асфальту" [120].

Епоксиасфальт Шелл - це гарячий асфальтобетон, виготовлений із використанням в'язучого, модифікованого епоксидною смолою та затверджувачем. Під час приготування асфальтової суміші смола та затверджувач змішуються, і відбувається хімічна реакція з утворенням жорсткої полімерної сітки. В результаті реакції в'язуче незворотно твердне (термореактивне). За низьких температур реакція протікає повільно, а за підвищених - значно прискорюється. Тому температура навколишнього середовища визначає, як довго суміш залишається пластичною та може бути застосована в покритті. [121]

З урахуванням властивостей бітуму та епоксидних смол вміст останньої значно перевищує вміст термопластичних полімерів, складаючи 20-35% від маси в'язучого. Властивості полімеризованого бітум-епоксидного в'язучого настільки відрізняються від властивостей вихідного бітуму, що йдеться не про поліпшення

його якості, а про принципову зміну його природи. За даними дослідницького центру Shell, основними характеристиками отриманого термореактивного бітуму є те, що він не розм'якшується під впливом тепла і не розчиняється в нафтових розчинниках.

Типові властивості епоксидного бітуму Шелл наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 Типові властивості епоксидних асфальтів Шелл

Характеристики	Епоксидний асфальтобетон	Звичайний асфальтобетон
Маршалівська стійкість, кН	45	7,5
Текучість по Маршаллу, мм	4,0	4,0
Маршалівська частинка	11,2	1,9
Модуль жорсткості, Н/м ² (3-точковий запуск, частота 10 Гц, відносна деформація $1,8 \cdot 10^{-4}$)		
0 °С	2,0-10 ¹⁰	1,5-10 ¹⁰
20 °С	1,2-10 ¹⁰	3,0-10 ⁹
40 °С	3,3-10 ⁹	4,0-10 ⁸
60 °С	19,5-10 ⁸	-
Межа витривалості при згинанні, кількість циклів до руйнування, (зразок: 50 мм шар асфальту на 10 мм сталевій пластині, постійне відхилення 1,0 мм, температура 25 °С, частота циклу навантаження 5 Гц)		
Склад в'язучого, 6 %	1,0-10 ⁶	3,0-10 ⁴
Склад в'язучого, 7 %	>2,0-10 ⁶	2,0-10 ⁵
Опір гідравлічної оливи ("Теллус-27")		
Міцність при стисненні, МН/м ² , 23 °С		
Початкова	16,0	3,7
Після 7 днів змащування та витримки	17,0	3,1
Після 30 діб	16,9	2,2
Після 56 діб	17,2	1,8

Перше виробниче випробування епоксидного асфальтового в'язучого Шелл було проведено в 1973 році на Грейт Вест Роуд в лондонському районі Хаммерсміт з метою використання в якості зносостійкого шару на дренажному асфальтовому покритті, яке має щоденний обсяг руху 30 тис. транспортних засобів. Після чотирнадцяти років експлуатації на покритті не спостерігалось пластичної

деформації або тріщин, незважаючи на дуже високі транспортні навантаження. Результати випробувань показали, що різниця в межі втоми при згині між звичайним асфальтобетоном та епоксидним асфальтом становила не менше ніж в десять разів. Термореактивна природа в'язучого усунула утворення зсувів та колієутворення на епоксидному асфальтовому покритті.

З 1987 року більше 50 000 тонн епоксидного асфальту було укладено на мостові настили з металу та бетону. Одним з перших застосувань епоксидного асфальту стало у 1987 році використання для дорожнього покриття над ортотропним сталевим прогоном мосту Сан-Метео-Хейворд через канал Сан-Франциско (США). Цей міст і сьогодні знаходиться в хорошому стані. Слід зазначити, однак, що через м'який клімат (майже без морозів) не використовувалися протижеледні матеріали. Також епоксидне асфальтове покриття схильне до значного впливу ультрафіолетового випромінювання [120,122,123].

2.2.2 Дослідження полімербетону на епоксидних смолах, виконані в "СоюздорНИИ"

У 70-х і 80-х роках Ленінградське відділення "СоюздорНИИ" проводило дослідження полімербетону, в якому як в'язучі використовувалися епоксидні смоли та суміші епоксидних смол, змішаних з бітумом марки МГ-70/130 у співвідношенні 100:50. Кількість епоксидного в'язучого становила 5-7% від маси мінерального матеріалу. Результати випробувань наведені в таблиці 2.2. Для порівняння в таблиці 2.2 наведені результати випробувань цементного бетону [122,124-126].

Таблиця 2.2 Результати випробувань цементного бетону

Назва показника	Показники атрибутів	
	Полімербетон	Цементний бетон
Об'ємна маса, г/см ³	2,2-2,3	2,2-2,3
Технологічна життєздатність суміші за температури повітря 25±10 °С, рік	Не менше 1/3	-
Границя міцності у віці 6 років, кгс/см ²		
При стисненні	250-450	-
при осьовому розтягуванні	20-45	-

Межа міцності при стисненні у віці 28 діб, кгс/см ²	800-1100	300-500
Знос, мм	0,5-0,8	1-1,3
У прісній воді	Більше 4000	Не менше 200
у 5 %-ному розчині хлористого натрію	більше 100	-
Коефіцієнт стійкості до автомобільного пального та оливи	Не менше 0,9	
Модуль пружності при стисненні, тис, кгс/см ²	200-300	200-400
Усадка, ‰	0,2	0,2
Коефіцієнт термічно-лінійного розтягування $\alpha \cdot 10^{-6}$ на 1 °С	12-14	8-12
Зчеплення з цементобетоном (при відриві), кгс/см ²	Не менше 15	-

Дослідження показало, що міцність на стиск епоксидного полімерасфальтобетону зростала протягом усього періоду старіння (особливо протягом першого місяця). Після 3 років зберігання міцність зразків полімербетону зросла в 1,5-1,8 рази порівняно з добовою міцністю.

Міцність полімербетону зросла в 1,3-1,5 рази після 4320 циклів заморожування-відтавання порівняно з добовою міцністю зразків, випробуваних після 4 циклів заморожування. Епоксидний полімербетон має дуже високу морозостійкість. Він витримав 4320 циклів заморожування-відтавання у прісній воді без зниження міцності більше ніж на 15 відсотків.

Стійкість матеріалу до зносу визначається на спеціальному пристрої, в якому на зразок подається навантаження 2 кг, і він піддається впливу абразивного матеріалу протягом 700 обертів. Після цього визначали втрату ваги та середню висоту зносу. Зносу зразків полімерасфальтобетону не збільшувався після 1500 циклів заморожування-відтавання, а після 2000-4320 циклів спостерігалось збільшення зносу на 5-8% у порівнянні зі зносом зразків, що зберігалися в повітрі за такої ж компенсації. [127-128]

Результати випробувань хімічної стійкості епоксидного полімербетону в різних середовищах наведені в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 Результати випробувань полімербетону на епоксидній смолі

Номер складу	Експериментальне середовище	Температура середовища, °С	Час витримування, доба	Коефіцієнт втрати міцності
1, 2, 3	Повітря	18	1	1
		40	(3 дні в кліматичній камері)	0,9
	Дистильована вода	18	10	1,01
			40	0,99
	Бензин	18	10	1,06
			40	0,99
	Гас	18	10	1,06
			40	0,98
	Дизельне паливо	18	10	0,98
			40	1,0
	Автол	18	40	0,98
			10	1,0

Згідно з результатами випробувань, епоксидний полімербетон, наведений у таблиці 2.3, має високу хімічну стійкість до бензину, гасу, дизельного пального та автомобільної оливи. Коефіцієнт втрати міцності полімербетону становив не менше 0,8 у всіх випадках при зберіганні в агресивному середовищі протягом 40 діб.

Таким чином, дослідження, проведені "СоюздорНИИ", підтвердили, що епоксидний полімербетон здатний зберігати високу механічну міцність та хімічну стійкість протягом тривалого періоду часу. Завдяки цьому цей матеріал може тривалий час працювати на дорожніх покриттях без руйнування.

2.2.3 Дослідження епоксидного асфальту в Європі та інших країнах

З 2004 року проводяться дослідження в Чехії, Німеччині та Франції з розробки складу та довговічності зносостійких шарів для покриттів автомобільних доріг з інтенсивним рухом. Впровадження дорогих, але довговічних матеріалів збільшує капітальні вкладення, але усуває витрати, пов'язані з капітальними ремонтами протягом життєвого циклу, що призводить до

економії загальних витрат. Результати виконання першого етапу дослідження показали, що влаштування більш дорогих зносостійких шарів (вартість яких у 3-5 разів перевищує вартість звичайних покриттів) економічно виправдано при терміні експлуатації більше 30 років при інтенсивності руху автотранспорту більше 40 тис. авт./добу [102-103].

Дослідження, проведені в Німеччині, визначили, що одним з найбільш перспективних матеріалів, здатних забезпечити такий великий термін служби покриття, є епоксидний асфальт. До теперішнього часу цей матеріал застосовувався головним чином для покриттів проїжджої частини великих автодорожніх мостів. У порівнянні зі звичайним асфальтобетоном епоксидний асфальт може витримувати високі навантаження і славиться високою стійкістю до втоми. Його висока міцність на зсув близька до показників цементного бетону, що обумовлює високу стійкість до утворення колії.

Результати дослідження свідчать, що діапазон температур нагріву мінерального матеріалу при приготуванні епоксидного асфальту становив від 143 °С до 150 °С. Час транспортування залежить від температури епоксидасфальтової суміші, та вантажопідйомності для перевезення. При 116 °С допустимий час транспортування становив 42-62 хвилини. При 127 °С цей інтервал скорочується до 35-43 хвилин.

На сьогоднішній день вартість сировини для епоксидного асфальту становить 22 дол. США /м², вартість дозувального заводу - близько 11 дол. США /м², а вартість обладнання - 11 дол. США /м². Таким чином, загальна вартість становить близько 44 дол. США /м².

Одним з наукових центрів з досліджень із застосування епоксидного асфальту є дорожньо-будівельна компанія "Дорожнє будівництво Скотта Вілсона (Нотінгем, Великобританія)" [120-121].

Епоксидне в'язуче складається з двох частин: А - епоксидна смола та В - асфальт та затверджувач.

Як контрольне в'язуче був використаний бітум (проникність голки 40-60·0,1 мм при 25 °С), отриманий з венесуельської нафти (бітум, звичайно

використовуваний на автодорогах Великобританії з інтенсивним рухом). Вміст бітуму у вихідному асфальтобетоні становив 6%, а епоксидного в'язучого - 6,3% від маси мінерального матеріалу. SMA також містить 0,3% стабілізуючих волокон.

Усі епоксидні асфальти виготовляються за стандартною програмою, що постачається компанією Colas, яка передбачає, що суміш має 30-хвилинний період "Затвердіння" при 130 °C, щоб забезпечити продовження реакції. Як згадувалося раніше, термореактивні матеріали характеризуються тим, що продовжують тверднути та збільшувати міцність/жорсткість після приготування. Міцність при твердінні залежить від температури навколишнього середовища.

Довготривале затвердіння епоксидного асфальту визначається зміною показників жорсткості та модуля пружності (вимірюного за кутом фази).

Максимальна жорсткість (13,500 МПа - SMA (щільноукладений асфальтобетон) та 14,500 МПа - HRA (гарячекатаний асфальт)) досягається приблизно через 60-70 днів. Це максимальне значення можна співвіднести з максимальним значенням, визначеним шляхом витримування зразка при 120 °C протягом 20 годин і при 85 °C протягом 120 годин. Останній метод використовується в США та Великобританії для імітації довгострокового старіння асфальтобетону і вважається компромісом для прискореного твердіння, оскільки не призводить до нереалістичних змін властивостей суміші через підвищені температури [103-105].

Відразу після ущільнення зразки епоксидного асфальту (HRA та SMA) демонстрували таку ж жорсткість, як і зразки стандартного асфальтобетону. Після того, як структура "затверділа" та повністю стабілізувалася, епоксидні асфальти HRA та SMA були втричі жорсткішими за контрольні зразки при 20 °C. У "нестарілому" стані епоксидні асфальти HRA і SMA стійкі до деформації, їх можна співвіднести з контрольною сумішшю. Це свідчить про те, що стійкість до утворення колії у свіжоукладеного епоксидного асфальту не відрізняється від стандартного асфальтобетону.

У повністю затверділому стані епоксидний асфальт показав у 2-8 разів вищу стійкість до повзучості при повторному навантаженні при 40 °C і стійкість до

колієутворення від колеса при 60 °С, ніж відповідний контрольний матеріал.

Випробування на втому показали, що епоксидне в'язуче по цьому показнику в 10 разів довговічніше за контрольну суміш.

Результати випробувань на вигин показали, що епоксидний асфальт демонструє зростання міцності/жорсткості, але зниження пластичності в порівнянні з контрольним зразком.

Отже, можна зробити висновок, що за основними властивостями епоксидне в'язуче перевершує контрольну суміш у 2-3 рази, а в деяких випадках і в 10 разів. Винятком є поведінка при великих деформаціях та низькотемпературній втомі при розтягуванні, де висока жорсткість епоксидного в'язучого сприяє стійкості до навантаження та уповільнює початок пластичної деформації, можливо, прискорюючи розвиток тріщин.

Загалом епоксидні в'язучі забезпечують асфальтобетону наступні переваги перед контрольною сумішшю: підвищена жорсткість (що сприяє навантаженню суміші), підвищена високотемпературна пружність (що призводить до підвищення стійкості суміші до деформації) та менша чутливість до температури та навантаження (що робить механічні властивості суміші незалежними від зміни температури та руху транспорту).

У центральній лабораторії OPUS (Нова Зеландія) досліджувався вплив асфальту, модифікованого епоксидною смолою, на когезійні властивості дренажного асфальту, виготовленого на відкритих сортувальних установках (OGPA).

Середній термін служби дренажних асфальтобетонних покриттів у Новій Зеландії становить 10,5 років (у багатьох випадках 7-8 років), тоді як середній термін служби щільного асфальтобетону становить 16 років [53,107].

На думку новозеландських вчених, головним чинником, що сприяє руйнуванню пористого асфальтобетону, є старіння (окислення) в'язучого, яке у високосвітних сумішах відбувається значно швидше, ніж у звичайному асфальтобетоні.

У цьому дослідженні дренажний асфальт виготовлений з використанням епоксидного в'язучого, яке є продуктом двокомпонентної суміші, яка використовується безпосередньо. Частина А складалася з епоксидної смоли, а

частина В - з затверджувача та бітуму з проникненням 70-0,1 мм при 25 °С. Вміст в'язучого у суміші склав 4,7%. Пористість ОГРА - 20,4%.

Контрольна бітумна суміш ОГРА готується при 125 °С. Епоксидне в'язуче готується шляхом нагрівання частини А до 90 °С. Для приготування епоксидного в'язучого частина А нагрівається до 90 °С, а частина В - до 125 °С. Частина А і частина В змішуються, і отримане в'язуче одразу вводиться в мінеральний матеріал. Наступне змішування в'язучого з мінеральним матеріалом проводиться при 125 °С. Потім в'язуче змішується з мінеральним матеріалом. Перед ущільненням епоксидоване в'язуче витримується при 125 °С протягом 45 хвилин. За аналогією були виготовлені суміші для покриттів на випробувальних стендах (САРТІФ), використовуючи ту ж технологію [107]. Прискорене "затвердіння" епоксидного в'язучого проводять при 85 °С протягом 120 годин.

Проводяться непрямі вимірювання модуля пружності при розтягуванні (МТ) вихідного асфальтобетону ОГРА та епоксидного асфальту ОГРА. Метод полягав у вимірюванні відповідної горизонтальної мікродеформації за допомогою імпульсу тривалістю 0,04 с і повторенням імпульсу 3 с.

Епоксидований асфальт при першому виготовленні має МТ - 570, при "затвердінні" - 4300, тобто збільшився більш ніж в сім разів. Для порівняння, МТ контрольного асфальтобетону становив від 840 до 2500.

Адгезія лабораторних і стендових зразків вихідного асфальтобетону ОГРА та епоксидного асфальту ОГРА визначалася за допомогою тесту cantabro. Метод базується на визначенні зносу матеріалу. При проведенні випробування циліндричні зразки ущільнених сумішей (діаметром 100 мм і висотою 50-70 мм) витримували при температурі $25 \pm 0,5$ °С (у випадку стендових зразків - при $10 \pm 0,5$ °С), після чого їх прокатували в металевому барабані, який обертався протягом 300 обертів зі швидкістю 30 об./хв.

Результатом випробування є втрата ваги (%) зразка відносно його початкової ваги. Результати тесту cantabro (% втрати ваги) для неостареного зразка (після витримки протягом 120 годин при 85 °С і для остареного зразка (витримка протягом 909 годин при 85 °С) ОГРА з епоксидним асфальтом наведені в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 Результати тестування

Назва асфальту	Втрата маси, %	
	Невитримані зразки	Старіння зразків
Епоксидний асфальт ОГРА	14,9±4,6	17,6±4,6
Контроль асфальтобетону ОГРА	53,1±5,2	72,1±7,7

Як видно з таблиці 2.4, втрата маси епоксидного асфальту значно менша, ніж у контрольного асфальтобетону: 28,1% для незістареного зразка та 24,4% після старіння. Варто також зазначити, що старіння не вплинуло суттєво на втрату маси епоксидованого асфальту (з 14,9% до 17,6% після старіння), тоді як для контрольного асфальтобетону втрата маси значно зросла (36%).

На дослідних ділянках епоксидного асфальту та контрольного асфальтобетону були проведені випробування на стійкість до колієутворення. [53,54-55] Для цього на випробувальному майданчику протягом 3 тижнів було здійснено 198,000 проходів колеса з навантаженням на вісь, еквівалентним 8,5 тоннам. Мінімальна температура під час випробувань становила 4,2 °С, а максимальна - 27,7 °С. На рис. 2.3 показана динаміка утворення колії залежно від кількості проходів колеса.

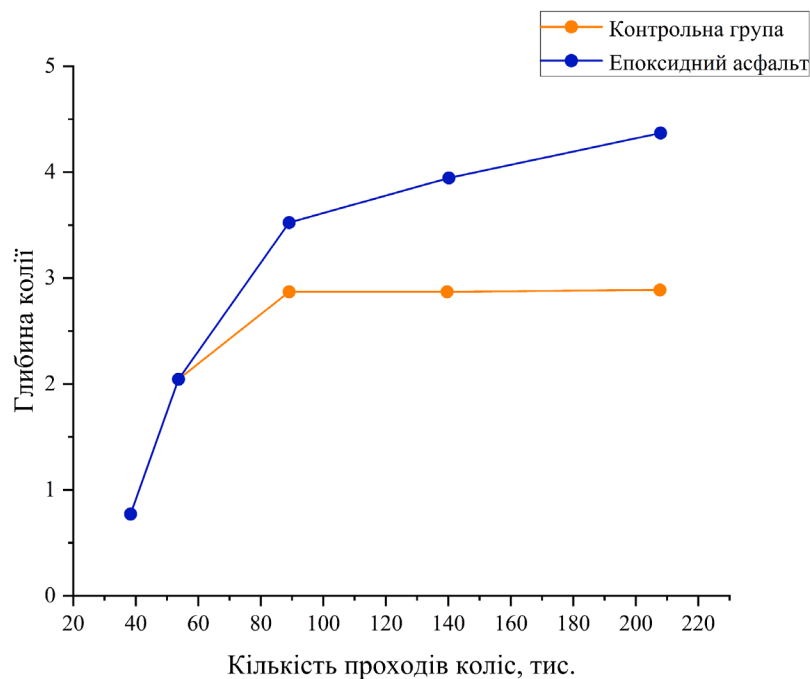


Рис. 2.3 Залежність глибини колії від числа проходів колеса

Як видно з рисунка, глибина колії на ділянці з епоксидним асфальтом значно менша, ніж на контрольній ділянці (2,5 мм проти 4,2 мм). Варто відзначити, що

глибина колії стабілізувалася після 60 проходів колеса у зоні, покритій епоксидним асфальтом, в той час як глибина колії на контрольній ділянці продовжувала збільшуватися.

Дослідження, проведені OPUS, показали, що когезійна міцність "затверділого" епоксидного асфальту OGPA значно вища, ніж у контрольного асфальтобетону. Метод santabro також підтвердив, що епоксидний асфальт має більш високу стійкість до окислення, тобто більш високу довговічність. За цих самих умов втрата ваги контрольного OGPA, окисленого до стану, еквівалентного приблизно 7 років експлуатації, була майже вдвічі більшою порівняно з неостареним OGPA. При цьому штучне старіння не вплинуло на втрату маси епоксидованого в'язучого [60,120].

Випробування на колієутворення показали, що епоксидний асфальт більш стійкий до впливності руху порівняно зі стандартним асфальтобетоном.

Проведений аналітичний огляд підтвердив перспективність використання епоксидного асфальту, який має вищі міцнісні характеристики, більшу стійкість до колієутворення, сповільнене старіння під впливом природно-кліматичних чинників та стійкість до дії паливно-мастильних матеріалів у порівнянні зі звичайним асфальтобетоном.

Проте складність процесу приготування епоксидного асфальтобетону, що передбачає використання не тільки епоксидних смол, а й затверджувачів у суміші з асфальтом, зумовила необхідність облаштування додаткових ємностей на асфальтобетонному заводі, що ускладнило поширення технології. Потрібно також враховувати, що епоксидне асфальтобетонне покриття має тривалий період формування, що теж не є його перевагою. Епоксидний асфальт - дорогий матеріал, вартість якого понад два рази перевищує вартість звичайного асфальтобетону, тому у світі він не набув широкого застосування.

Склади епоксидного асфальтобетону, виготовлені у Китаї із застосуванням волокон, одержаних із золи виносу теплових електростанцій, не мають зазначених недоліків.

Попередні лабораторні дослідження НАУ з використання волокон у звичайному гарячому дрібнозернистому асфальтобетоні та у щільному дрібнозернистому асфальтобетоні, підготовленому за методом Маршалла, засвідчили про те, що волокна мають армуючу та структуруючу дію на інертні реакційно-здатні групи асфальту (асфальтени та смоли), що, у свою чергу, підвищує довговічність сумішей формування міцного каркасу, який сприяє тому, що асфальтобетон отримує високі фізико-механічні та експлуатаційні властивості.

Тому науковою гіпотезою даної роботи є встановлення механізму впливу волокон на асфальто- та епоксидні суміші, дослідження змін складу та властивостей групового складу в'язучого комплексу, а також можливості генерування додаткових елементів дисперсної фази асфальту, що, у свою чергу, призводить до зростання міцності епоксидно-волокнистого асфальтобетону при стиску, зсуві та розтягуванні. Розкрити закономірність впливу добавки волокон золи виносу теплових електростанцій Китаю на фізико-механічні властивості композитного в'язучого асфальтобетону.

Враховуючи, що епоксидно-волокнистий асфальтобетон не буде дорогим матеріалом (через низьку вартість волокон як відходів виробництва), його використання є економічно доцільним і на автошляхах з інтенсивністю руху, і у важливих штучних спорудах і центральних містах та вулицях, а стійкий термін служби покриттів буде не менший за 2-3 рази порівняно зі звичайним асфальтобетоном.

Висновки до розділу II

1. Гарячий литий асфальтобетон використовується для тонких дорожніх покриттів і для шорсткості існуючих поверхонь асфальту та цементного бетону. Для нього потрібен високов'язкий асфальт; його готують при високих температурах (180-220 °C) для забезпечення необхідної плинності. Хоча він має такі переваги, як відсутність необхідності ущільнення та висока стійкість до насичення водою, ця технологія також має свої складнощі: технічні труднощі через високі робочі температури та потенційне розшарування.

2. Холодний литий асфальтобетон: згідно з цією технологією виготовляються ефективні та економічні тонкі шари, які широко використовуються для ремонту й улаштування різних дорожніх поверхонь. Технологія має такі переваги як низьке енергоспоживання, екологічна та збереження навколишнього середовища, а також економічна доцільність її застосування.

3. Для поліпшення когезійної міцності холодного литого асфальтобетону досліджені застосування спеціальних емульгаторів, полімерних добавок і реакційно-здатних наповнювачів. Важлива увага також приділялася підбору компонентів для отримання оптимальних результатів.

4. Аналіз літератури свідчить про перспективність використання епоксидного асфальтобетону та необхідність розширення робіт з вивчення його властивостей для одержання довговічних високоякісних шарів дорожнього одягу.

5. Розширення асортименту модифікаторів асфальту, що використовуються при приготуванні епоксидного асфальтобетону, має велике значення для розвитку дорожньо-будівельної галузі. Водночас модифікатори необхідно підбирати залежно від рівня впливу добавок на показники фізико-механічних властивостей асфальтів і їх економічної обґрунтованості, а також треба обґрунтовувати технічні вимоги до кінцевого продукту.

6. Проаналізувавши наукові досягнення в галузі застосування у складі асфальтобетонів сумішей мінеральних наповнювачів зі смолами (особливо епоксидними), вказано на недостатність проведених досліджень та доведено, що їх застосування є актуальним завданням для забезпечення необхідності проведення широких експериментальних робіт з модифікації асфальтобетонних сумішей для автомобільних доріг.

7. Особливий інтерес має введення волокон, отриманих із золи виносу теплових електростанцій Китаю, дія яких комплексно впливає на показники міцності, стійкості до пластичних деформацій, водо- та морозостійкості асфальтобетонів.

8. На основі аналізу літературних даних сформульована наукова гіпотеза щодо використання епоксидної смоли та волокон золи виносу теплових електростанцій, виготовлених в Китаї, для підвищення якості асфальту та удосконалення

властивостей асфальтобетону, яка, як свідчить обґрунтування гіпотези, дозволить одержати довговічний асфальтобетон.

9. Підтвердження наукової гіпотези знайшло відображення в проведених лабораторних дослідженнях.

3. ПОЧАТКОВА ХАРАКТЕРИСТИКА МАТЕРІАЛІВ ТА МЕТОДОЛОГІЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Характеристики вихідних матеріалів для гарячого литого асфальтобетону та методи випробувань

Для отримання гарячого литого асфальтобетону із використанням волокон із золи-виносу теплових електростанцій китайського виробництва були використані такі матеріали: щебінь із щільних гірських порід (габро-магматична інтрузивна порода) фракції 5-20 мм, гранітний відсів, який відповідає вимогам ДСТУ Б В.2.7-30, вапняковий мінеральний порошок МП-1, нафтовий дорожній в'язкий асфальт БНД 100/150, волокна золи-виносу теплової електростанції китайського виробництва.

3.1.1 Властивості первинного бітуму

Якість дорожнього асфальту є одним із найважливіших факторів, що визначають довговічність та якість асфальтобетонних дорожніх покриттів.

Властивості асфальтового в'язучого у складі асфальтобетонних композицій, що періодично зазнають дії зсувних напружень, тисків та перепадів температур, значною мірою обумовлюються пластичністю дорожнього асфальту. Для визначення плинності та в'язкості дорожнього асфальту в країні та за кордоном найчастіше використовують так звану пенетрацію, тобто глибину проникнення голки в асфальт. Визначення пенетрації при 25 °С (P25) та 0 °С (P0) проводилося за стандартом ГОСТ 11501-78 на автоматичному пенетрометрі "Лінтел ПН-10Б" (рис. 3.1).



Рис. 3.1 Пенетрометр "Лінтел ПН-10Б"

У таблиці 3.1 наведено результати вимірювань твердості вихідного асфальту.

Таблиця 3.1 Дані твердості для сирого асфальту

Глибина проколу, 0,1 мм	Методи тестування	Норми на основі ДСТУ 4044	Фактична величина
At 25 °C	ГОСТ 11501	91-130	108
At 0 °C		Не менше 28	33

Інший простий спосіб оцінити деформаційні характеристики асфальту - це визначити його температуру розм'якшення. Через багатоконпонентну природу асфальтів, поняття точки розм'якшення є умовним, адже асфальти не мають чітко визначеної точки розм'якшення і, як і всі аморфні тіла, мають певний інтервал розм'якшення.

Визначення температури розм'якшення проводиться на приладі "Лінія КиШ-20m-4" (рис. 3.2) згідно з ГОСТ 11506 "метод визначення точки розм'якшення за допомогою кульового методу".

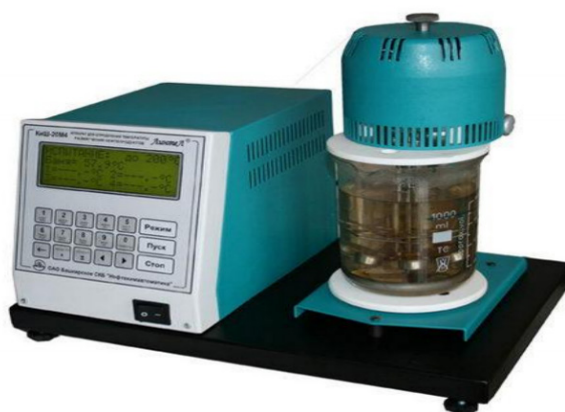


Рис. 3.2 Апарат Лінтел КиШ-20м-4

Згідно з проведеними випробуваннями для визначення температури розм'якшення, було встановлено, що даний показник відповідає температурі 44 °C.

Визначення розтяжності асфальту БНД 100/150 проводилося на лабораторному напівавтоматичному динамометрі ДБ-2м згідно з ГОСТ 11505-75 (рис. 3.3). Дані про розтяжність, отримані при 0 °C та 25 °C, наведені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 Дані щодо пластичності для циліндричного асфальтобетону

Розтяжність бітуму, см	Метод випробування	Норми на основі ДСТУ 4044	Фактичне значення
25 °С	ГОСТ 11501	6,5	88
0 °С		4,0	5,6



Рис. 3.3 - Дуктилометр ДБ-2М

Оскільки пружна деформація максимально проявляється при низьких температурах, то також слід приділити особливу увагу вивченню деформаційних характеристик та міцності бітуму при низьких температурах та під дією низьких та короточасних навантажень. Визначення температури крихкості має велике практичне значення, оскільки дає уявлення про нижню межу температури, при якій такі асфальти допускається використовувати.

Визначення температури крихкості бітуму БНД 100/150 проводиться згідно з ГОСТ 11507, доповненим устаткуванням для визначення температури крихкості нафтового бітуму АТХ-20 згідно з п. 3.2 ГОСТ 22245 (рис. 3.4).



Рис. 3.4 - Апарат для визначення температури крихкості нафтобітумів АТХ-20

На основі проведених випробувань для визначення температури крихкості було встановлено, що цей показник відповідає $-17\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Інші показники бітуму, визначені згідно з вимогами ГОСТ 22245-90, наведено в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 Основні показники для асфальтобетону БНД 100/150

№	Назва індикатора	Стандарт відповідно до ДСТУ 4044	Фактична вартість
1	Температура спалаху, °С, не нижче	230	265
2	Зміна температури розм'якшення після прогрівання, °С, не більше	5	5
3	Індекс проникнення	Від 1 до -1	-0,8
4	Зчеплення бітуму з мармуром або піском	Перевірено на контрольному зразку	Витримати мармурове випробування

На основі отриманих результатів можна зробити висновок, що нафтовий дорожній бітум БНД 100/150, який використовувався для проведення експериментів, відповідає вимогам нормативно-технічної документації і придатний для приготування асфальтобетонних сумішей.

Сучасне обладнання, що використовувалося для проведення досліджень, було своєчасно сертифіковане та валідоване. У роботі використовувалися визнані стандартні методи, що визначило достовірність отриманих результатів.

3.1.2 Властивості мінеральних матеріалів асфальтобетону

Основні властивості щебеню, що використовується у виробництві модифікованого асфальтобетону, визначаються згідно з ДСТУ Б В.2.7-119. [129]

Гранулометричний склад та основні фізико-механічні властивості щебеню наведені в таблицях 3.4 та 3.5.

Таблиця 3.4 Агрегатний зерновий склад відповідно до вимог ДСТУ Б В.2.7-119

Норма	Розмір отворів сита, мм					
	25	20	12,5	10	5	2,5
Негабаритний матеріал	0	0,76	54,04	6,4	36,6	1,9
Накопичений затриманий матеріал	0	0,76	54,8	61,2	97,8	99,7
Швидкість проходження	0	99,24	45,2	38,8	2,2	0,7
Вимоги ДСТУ	< 0,5	< 10	30-60	-	90-100	95-100

Таблиця 3.5 Основні параметри щебеню 5-20 мм

№	Найменування показників	Вимоги ДСТУ Б В.2.7- 30	Фактичне значення

1	Вологість щебеню, %	Не нормір.	0,15
2	Насипна густина за природної вологості, т/м ³	Не нормір.	1,47
3	Вміст зерен пластинчастої (лещадної) та голчастої форми	Від 15 до 25 III група	22,01
4	Вміст пилоподібних і глинистих частинок, % за масою	Не більше 1	0,37
5	Вміст глини в грудках, % за масою	Не більше 0,25	0
6	Подрібнюваність щебеню (марка), % за масою	До 12 включно марки 1400	3,9
7	Марка за стиранистю щебеню	До 25 включно з Маркою II	7,4 (II)
8	Вміст зерен слабких порід, % за масою	Не більше 5	2,4
9	Морозостійкість щебеню, цикли, втрата маси у %	15 не більше 2, F 300	1,7 (F 300)
10	Питома ефективна активність природних радіонуклідів, Бк/кг	Не більше 370	15,8
11	Стійкість структури проти розпадів (втрата маси при розпаді), %	0,65-0,9	

Щебінь з щільних гірських порід (габро-вулканічних інтрузивних порід) фракції 5-20 мм відповідає вимогам ГОСТ 8267-93 та ГОСТ 9128-2009. заповнювачі придатні для приготування асфальтобетонних сумішей.

У таблицях 3.6 і 3.7 наведені дані про склад піску та його основні фізико-механічні властивості.

Таблиця 3.6 Зерновий склад піску

Розмір отворів сита, мм	Фактичні результати		
	Часткові залишки, %	Повні залишки, %	Повні проходи, %
2,5	33,65	33,65	66,35
1,25	21,66	55,29	44,71
0,63	18,63	73,29	26,08
0,315	11,52	85,44	14,56
0,16	9,29	94,73	5,27
0,071	3,12	97,85	2,15
Менше, ніж 0,071	2,15	100	0

Таблиця 3.7 - Фізико-механічні властивості піску

№	Найменування показників	Вимоги ДСТУ Б В.2.7-30	Фактичне значення
1	Насипна густина, кг/м ³	-	1510
2	Справжня густина, кг/м ³	-	-
3	Вміст пилоподібних і глинистих частинок, %	Не більше 10,0	1,46
4	Модуль крупності	3,0-3,5	3,34
5	Група піску	-	Підвищеної крупності
6	Вміст глини в грудках, %	Не більше 2,0	Не має
7	Вміст зерен крупністю св. 10 мм, %	Не більше 5	0
8	Вміст зерен крупністю св. 5 мм, %	Не більше 15	0
9	Вміст зерен крупністю св. 0,63 мм, %	65-75	73,92
10	Вміст зерен крупністю св. 0,16 мм, %	Не більше 10	5,27
11	Сумарна питома ефективна активність природних радіонуклідів, Бк/кг	Не більше 370	296,6

Пісок щебенекий відсіву II класу відповідає вимогам ДСТУ Б В.2.7-30. Пісок придатний для приготування асфальтобетонних сумішей.

Основні характеристики мінерального порошку МП-1 були визначені відповідно до ДСТУ Б В.2.7-121 і наведені в таблиці 3.8.

Таблиця 3.8 Основні властивості мінерального порошку

№	Назва індикаторів	Фактичне значення
1	Склад частинок, % сито 1,25 мм	100
2	Склад частинок, % сито 0,315 мм	98,8
3	Склад частинок, % сито 0,071 мм	74,3
4	Набухання за об'ємом, %	2,40
5	Пористість за об'ємом, %	29,9
6	Вологість, %	0,45
7	Питома вага, г/см ³	2,83
8	Вміст триоксиду (Al+Fe), %	1,17
9	Водорозчинні, %	2,41
10	Активний СаО+MgO, %	2,08
11	Втрати при прожарюванні	17
12	Сумарна питома ефективність природних радіонуклідів, Бк/кг	1348

Мінеральний порошок марки МП-1 відповідає вимогам ДСТУ Б В.2.7-121.

Всі вихідні мінеральні матеріали відповідають вимогам нормативно-технічної документації для приготування асфальтобетонних сумішей згідно з ДСТУ Б В.2.7-121.

3.1.3 Характеристики ФЗВК

Фізико-механічні властивості фіброволокна з золи ТЕС, виготовленого в Китаї, наведені в таблиці 3.9. Такі волокна були використані в цьому дослідженні і не будуть повторюватися в розділах, присвячених холодному литому асфальтобетону та епоксидному асфальтобетону.

Таблиця 3.9 Властивості волокон золи-виносу

Назва індикаторів	Фізичні та механічні властивості	
	Волокно з летючої золи	
Середній діаметр волокна, мкм	160,0	
Кількість неволокнистих добавок, %	2 - 3	
Щільність, г/см ³	2,65	
Температурний інтервал використання, °С	-269 - +700	
Водостійкість, %	99,6	
Хімічна стійкість, %		
0.5N NaOH	93,4	
2N NaOH	77,3	
2N H ₂ SO ₄	98,5	
Гігроскопічність, %.	до 1,0	
Механічна міцність, МПА	4100	
Модуль пружності, МПА	120	
Подовження при розриві, %	3,1	

3.2 Характеристики сировини та методи випробувань для холодної литого асфальтобетону (ЛЕМС)

3.2.1 Емульгований бітум

Для приготування сумішей використовують катіонні емульсії середнього та повільного розпаду (не модифіковані та модифіковані) марок ЕКМ-60, ЕКМ-65, ЕКС-65, ЕКММ-60, ЕКММ-65 та ЕКСМ-65 згідно з ДСТУ Б В.2.7-129:2013. Масова

частка бітуму, що містить емульгатор, повинна становити від 60% до 65%. Для приготування катіонних емульсій потрібно використовувати бітум згідно з ДСТУ 4044.

3.2.2 Кам'яний матеріал

Визначальну роль у забезпеченні експлуатаційних властивостей ТП з ЛЕМС відіграє кам'яний матеріал. Основними визначальними властивостями щебеню є міцність, стійкість до стирання та стійкість до полірування. Однак в Україні існують очевидні проблеми з гранулометричним складом щебеню та піщаним еквівалентом (вмістом глини). Часто важливо знайти матеріали, які відповідають цим технічним вимогам з точки зору критеріїв піщаного еквіваленту та адсорбції метиленового синього. Щебінь слід попередньо очистити, щоб видалити з нього глину. Завжди потрібне додаткове сортування щебеню, також необхідне грохочення. Для приготування суміші отримують магматичну або метаморфічну породи з міцністю при стисненні не менше 100 МПа при дробленні з використанням щебеню (дробленого та відсіяного) за ДСТУ Б В.2.7-30, ДСТУ Б В.2.7-75, ДСТУ Б.В.2.7-32, ДСТУ Б.В.2.7-76. Щебінь має пройти вторинне дроблення. Форма частинок повинна бути максимально наближеною до прямокутної, з вмістом пластинчатих частинок не більше 10%. Загальна поверхнева активність глинистих частинок, органічних добавок та небезпечних мінералів щебеню (слюда, гідрат слюди, хлорид, магнетит, гематит та акантит), оцінена за адсорбцією метиленового синього, має становити від 5 до 10 мл.

Зерновий склад кам'яного матеріалу сумішей повинен відповідати вимогам, наведеним у табл. 2.10. За умови перевищення зазначених меж, кам'яний матеріал вважається не придатним для використання в цих сумішах.

Таблиця 3.10 - Типи ЛЕМС за зерновим складом

Діаметр сита, мм	Загальний прохід через сито, % по масі, для типу суміші		
	Тип 1	Тип 2	Тип 3
15	100	100	100
10	100	100	80-94
5	100	91-100	71-90
2,5	90-100	65-90	45-70

1,25	67-91	46-71	29-51
0,63	41-66	31-51	20-35
0,315	24-41	17-29	12-24
0,14	14-28	9-20	7-18
0,071	10-20	5-15	5-15

3.2.3 Мінеральний наповнювач

Для регулювання часу розпаду асфальтобетонних емульсій та пластичності суміші застосовують цемент згідно з ДСТУ Б В.2.7-46. Згідно з ДСТУ Б В.2.7-121, разом з цементом або замість нього дозволяється використовувати такі мінеральні дрібні наповнювачі: мелений вапняк, доломіт, базальт, золу-винесення. Додавання іонів кальцію дозволяє здійснювати контрольоване перемішування. Збільшення або зменшення швидкості схоплювання суміші можна контролювати шляхом ретельного підбору комбінації емульгаторів і дезінтеграторів відповідно до хімічного складу заповнювачів. Гранулометричний склад наповнювача повинен бути в межах діапазону, наведеного в таблиці 3.11.

Таблиця 3.11 Гранулометричний склад мінеральних наповнювачів

Назва компонентів суміші	Вміст за масою, у %, мінеральних зерен, менших за цей розмір, мм		
	0,315	0,140	0,071
Мінеральний наповнювач	90-100	75-100	67-100

3.2.4 Регулятор розпаду

Нетрадиційним аттенюатором або кондиціонуючою добавкою, що пропонується для використання, є сульфат алюмінію (рис. 3.5), а точніше його 50%-й водний розчин. Сульфат алюмінію - це сіль білого кольору з блакитними, сірими або рожевими відтінками, яка в природних умовах являє собою кристалогідрат $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$, тобто безбарвні кристали. При нагріванні втрачає воду і не плавиться, при нагріванні або при високій температурі розкладається на Al_2O_3 і SO_3 . Має добру розчинність у воді. Промисловий сульфат алюмінію отримують шляхом обробки глини або бокситів сірчаною кислотою, а чистіший продукт виходить, якщо $Al(OH)_3$ розчинити в гарячій концентрованій H_2SO_4 . Алюмінієвий купорос легко запалюється і має високу гігроскопічність - він поглинає вологу з навколишнього

середовища і утримує її в середині. Як традиційну добавку до ЛЕМС використовують 10% водний розчин емульгатора Redicote E-11 (Akzo Nobel, Швеція).



Рис. 3.5 $Al_2(SO_4)_3$: а - 1-го сорту; б - вищого сорту

3.2.5 Вода

Для приготування сумішей використовуйте питну воду згідно з ГОСТ 2874 або технічну воду згідно з ГОСТ 6709 або ГОСТ 23732, вільну від механічних включень із середньою твердістю не більше 6 мг-екв/л.

3.2.6 Методологія дослідження

ЛЕМС тестується відповідно до міжнародних стандартів ISSA A105, ISSA A143 та вітчизняного СОУ 42.1-37641918-119:2014.[169]

3.2.6.1 Визначення фізико-технічних параметрів емульсій

Запропоновану рецептуру асфальтових емульсій досліджували у світлі нормативних вимог за такими показниками: визначення зовнішнього вигляду емульсії; вивчення концентрації іонів водню (рН); однорідність емульсії; визначення вмісту асфальту за допомогою емульгаторів; визначення умовної в'язкості; визначення адгезії в'язучого до поверхні щебеню. [130-131]

3.2.6.2 Визначення адсорбції метиленового синього на камені

Цей метод вимірює здатність пакувального матеріалу адсорбувати метиленовий синій. Оскільки метиленовий синій адсорбується переважно глинами, органічними компонентами, шаруватими силікатами та гідроксидом заліза, тест дає уявлення про загальну поверхневу активність усіх цих компонентів. Рисунок 3.6 показує процедуру виконання тесту з метиленовим синім (МС).

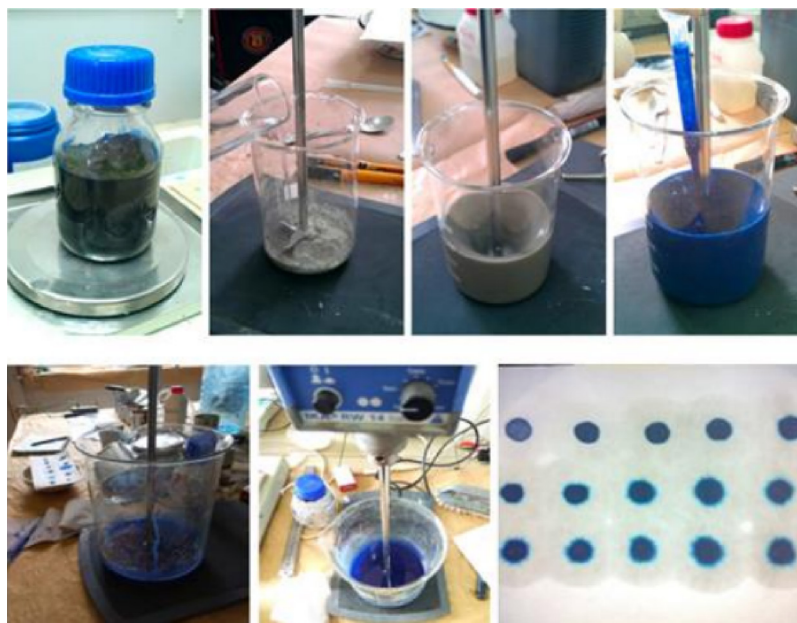
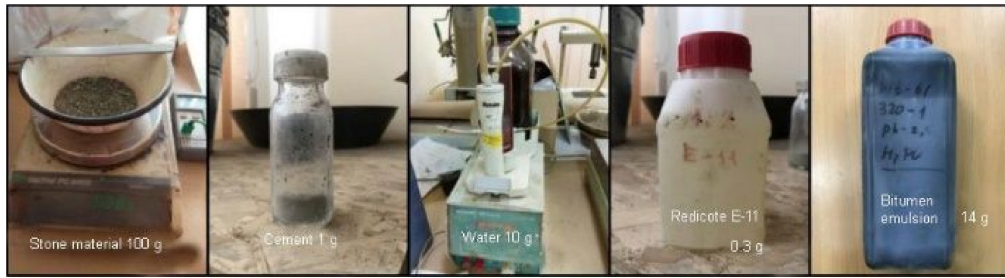


Рис. 3.6 Порядок проведення випробування з визначення адсорбції метилену синього

Високі значення метиленового синього та відповідна висока поверхнева активність можуть призвести до прискорених реакцій наповнювачів з асфальтовими емульсіями та добавками, що може спричинити передчасне руйнування або погану адгезію. Метиленовий синій слід використовувати як індикатор у діапазоні 5-10 мл.

3.2.6.3 Визначення технологічності асфальтової суміші

Випробування на визначення технологічності асфальтової суміші проводяться за ДСТУ Б В.2.7-129. Технологічність асфальтової суміші ЛЕМС - це процес від моменту початку змішування всіх компонентів суміші до моменту втрати ними плинності та подальше перемішування неможливе. Технологічність асфальтової суміші визначає час, протягом якого суміш може бути виготовлена та утворити тонке покриття. Виходячи з критерію технологічності асфальтової суміші, оптимальний склад ЛЕМС може враховувати вміст каменю, мінеральних наповнювачів, ФЗВК, води, добавок та асфальтових емульсій, гарантуючи, що суміш не розпадеться більше ніж на 120 або 180 секунд, залежно від типу суміші, а кількість кожного компонента є обґрунтованою (Рис. 3.7).



Склад із розчином Redicote E-11



Склад з розчином $Al_2(SO_4)_3$

Рис. 3.7 - Компоненти в складах ЛЕМС

Загальна методика встановлення розпаду ЛЕМС полягає в наступному (рис. 3.8): змішування мінеральних компонентів, води, кондиціонуючих добавок та емульсій в емальованих посудинах (рис. 3.8а); перемішування отриманих сумішей вручну шпателем в похилій посудині, щоб мати можливість оцінити плинність сумішей протягом усього часу перемішування (рис. 3.8б); фіксування часу розпаду суміші, тобто, час від змішування всіх компонентів суміші до моменту втрати плинності і можливості подальшого перемішування (рис. 3.8 в).

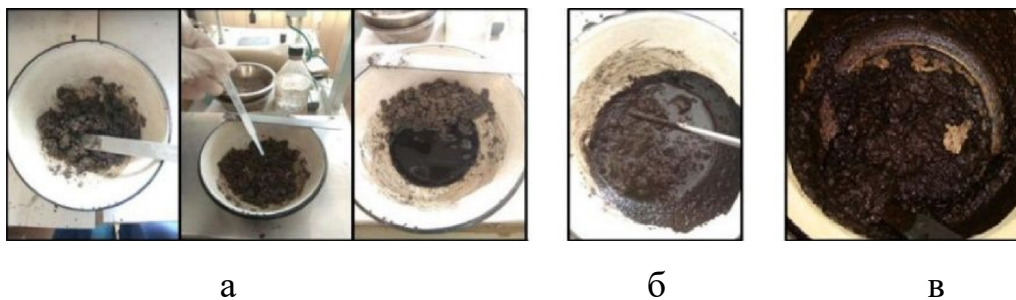


Рис. 3.8 - Визначення розпаду ЛЕМС

3.2.6.4 Визначення швидкості формування ТП

Когезійна міцність - міцність структурних зв'язків всередині матеріалу. Швидкість формування зносостійкого шару ЛЕМС визначають шляхом формування встановлених зразків суміші та випробування їх на модифікованому пристрої для зчеплення через певний проміжок часу (рис. 3.9).



Рис. 3.9 Модифікований когезійний прилад: 1 - повітряний циліндр; 2 - шток циліндра; 3 - гумовий наконечник; 4 - пластина з толі або руберойду; 5 - манометр для вимірювання тиску в циліндрі; 6 - регулятор тиску повітря; 7 - динамометричний ключ; 8 - регулятор опускання штока циліндра

Випробувальні зразки для ЛЕМС поділяються на типи залежно від характеру пошкодження та відповідних значень крутного моменту (Рис. 3.10):

1. "N" - Нормальний (стандартний) - характеризується майже повним руйнуванням зразка та наявністю радіальних тріщин. Еквівалентне значення крутного моменту становить 12-13 кг*см.

2. "NS" - Нормальне обертання (нормальне кручення) - характеризується наявністю лише однієї руйнівної радіальної тріщини. Еквівалентне значення крутного моменту становить 20-21 кг*см.

3. "S" - Обертання (скручування) - характеризується відсутністю тріщин, але спостерігається фрагментація частинок каменю або окружне зміщення. Еквівалентне значення крутного моменту - 23 кг*см.

4. "SS" - Суцільний обертання - характеризується відсутністю тріщин. Зразок не пошкоджений, а частинки асфальту могли бути переміщені або видалені. Еквівалентне значення крутного моменту становить 26 кг*см.

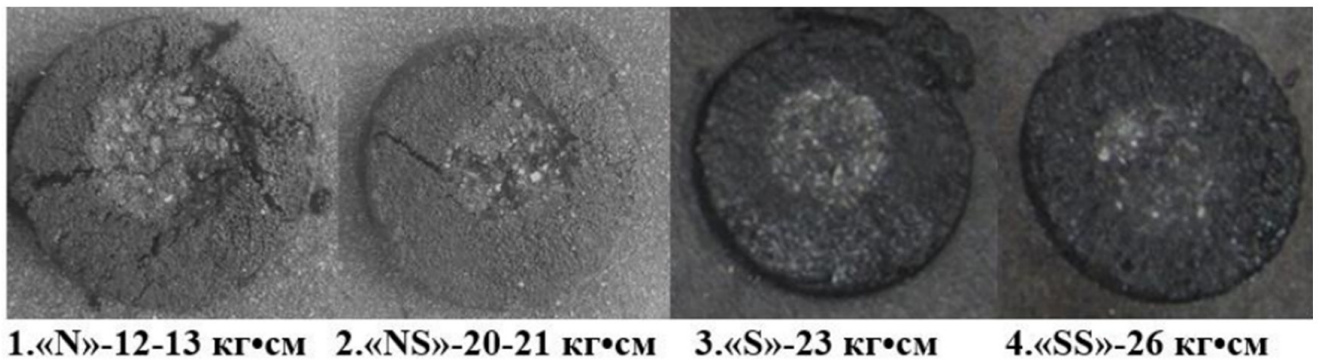


Рис. 3.10 Приклади типів пошкоджень ЛЕМС

Своєю чергою за типами визначаємо етап формування структури ЛЕМС і можливість відкриття руху транспортних засобів по влаштованому ТП (табл. 3.12).

Таблиця 3.12 - Визначення стадії формування ТП з ЛЕМС

Характеристики міцності		Етапи формування ТП з ЛЕМС
Характер пошкоджень	Значення крутного моменту, кг*см	
«N» - Normal	12-13	Схоплювання
«NS» - Normal Spin	20-21	Самоуцільнення (відкриття руху з обмеженням швидкості до 40 км/год)
«S» - Spin	23	Уцільнення
«SS» - Solid Spin	26	Затвердіння (відкриття руху без обмеження швидкості)*

*Після цього етапу настає етап набору когезійної міцності

3.2.6.5 Визначення втрати матеріалу під час вологого абразивного зносу

Метод полягає у визначенні втрати ваги просоченого водою матеріалу в суміші протягом 5 хвилин механічного стирання об гумову поверхню. Випробування базується на умовах мокрого стирання. Він розраховується за наступною формулою:

$$B = (m_0 - m_1) \cdot k \quad (3.1)$$

де B - втрата маси матеріалу при мокрому подрібненні, г;

m_0, m_1 - відповідно маса зразка до і після зносу;

k - коефіцієнт перерахунку, залежно від марки змішувача, в межах від 29 до 35.

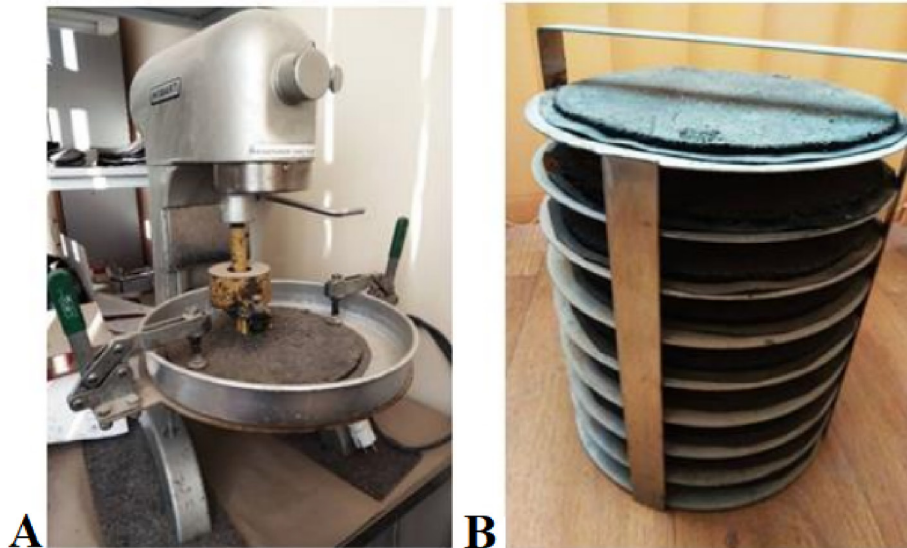


Рис. 3.11 а - Планетарний змішувач "Novar C-100";
б - Готовий зразок

Паралельно під час дослідження бітумів та емульсій на його основі визначали придатність кам'яного матеріалу для ЛЕМС за критерієм загальної поверхневої активності та підбирали розрахункові гранулометричні склади для кожного з типів сумішей. Після дослідження основних компонентів ЛЕМС починали проектування складу суміші за критерієм розпаду з включенням портландцементу, води та присадки. Після чого досліджували ЛЕМС за критерієм швидкості набору когезійної міцності та визначали оптимальні склади за цим критерієм за допомогою показників початку набору когезійної міцності суміші, формування суміші, типів руйнування, етапів формування та класу суміші. Після цього визначали втрати маси вологого стирання покриття та економічну ефективність оптимальних складів ЛЕМС за критерієм швидкості набору когезійної міцності.

3.3 Характеристики сировини та методи випробувань епоксидного асфальтобетону

3.3.1 Властивості асфальтобетону

Для приготування епоксидного асфальтобетону використовуються наступні матеріали:

- Асфальт марки БНД 50/70 виробництва компанії "Укртатнафта" (Кременчуцький НПЗ) відповідає вимогам ДСТУ 4044, його фізико-механічні властивості наведені в таблиці 3.13;

Таблиця 3.13 - Фізико-механічні властивості асфальту

Індикатори	Фактична вартість	Вимоги ДСТУ 4044 для бітуму БНД 50/70
Проникнення голки при 25 °С, 0.1 мм	61	61-90
Температура розм'якшення, КиШ, °С	47,5	3 47 до 53
25 °С при пластичності, см	65	не менше 55
Пластичність при 0°С, см	3,5	не менше 3.0
Температура крижкості, °С	-17	не вище мінус 12
Зчеплення зі щебенем, бали%	2,5/30-40	не нормується

Гранулометричний склад епоксидної асфальтобетонної суміші підібраний відповідно до ДСТУ Б В.2.7-119 "Асфальтобетонні суміші та асфальтобетони для автомобільних доріг і аеродромів" і знаходиться в межах, визначених для щільного дрібнозернистого асфальтобетону типу В.

3.3.2 Властивості мінеральних матеріалів

Щебінь фракції 5-10 мм з Малинського та Коростенського гранітних кар'єрів, що відповідає вимогам ДСТУ Б В.2.7-75 та таблиці 3.14.

Таблиця 3.14 - Фізико-механічні властивості щебеню

Назва показника	Стандартні вимоги
Вміст зерен пластинчастої та голчастої форми, %	Менше 15
Марка щебеню за міцністю при роздавлюванні в циліндрі за зносом	1200 I-1
за морозостійкістю	МРЗ 50

-Пісок штучний щебінь (відсів) з Коростенського гранітного кар'єру відповідно до ДСТУ Б В.2.7-76;

- Мінеральні порошки виробництва Київського ВАТ "Асфальтобетонний завод" відповідають вимогам ДСТУ Б В.2.7-121;

3.3.3 Епоксидні смоли

-Епоксидна смола Spolchemie (Чехія), марка CHS-EPOXY 525, з наступними характеристиками: в'язкість 10-12 Па при 25°С, епоксидний індекс 5,30-5,59 моль/кг, епоксидний еквівалент 179-189 г/моль, з затверджувачем, марка TELALIT 410. З наступними характеристиками: амінне число мін. 850 мг КОН/г, в'язкість макс. 1,2 Па при 23 °С;

- Епоксидна смола з затверджувачем виробництва ТДВ "Композит" (Україна);
- Епоксидний поліуретан з затверджувачем виробництва ТДВ "Композит" (Україна);

3.3.4 Вибрані компоненти сумішей

Результати підбору гранулометричного складу сумішей наведені в таблицях 3.15, 3.16 та на рисунку 3.12.

Таблиця 3.15 - Гранулометричний склад сумішей з Малинського кар'єру

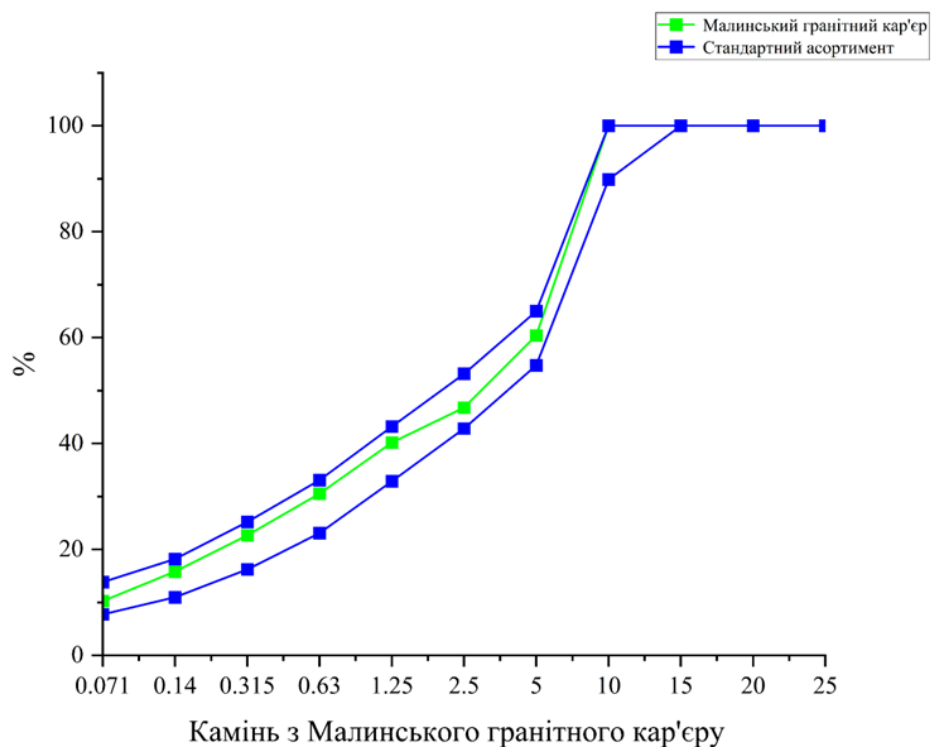
Матеріали	Вміст за масою, % мінеральних зерен, дрібніших за цей розмір, мм								
	15	10	5,0	2,5	1,25	0,63	0,315	0,14	0,071
Щебінь гранітний Малинського кар'єру фракції 5-10 мм	100	88	3	0	0	0	0	0	0
Відсів грантовий Малинського кар'єру	100	99	89	68	57	41	28	17	9
Мінеральний порошок	100	100	100	100	100	99	98	94	81
Підібраний склад (повні проходи)	100	100	60,42	46,8	40,2	30,54	22,68	15,84	10,26
Вимоги до зернового складу (повні проходи) ДСТУ Б В.2.7-119 тип "Б"	100	100-90	65-55	53-43	43-33	33-23	25-16	18-11	14-8

Таблиця 3.16 - Гранулометричний склад сумішей з коростенського кар'єру

Матеріали	Вміст за масою, % мінеральних зерен, дрібніших за цей розмір, мм								
-----------	--	--	--	--	--	--	--	--	--

	15	10	5,0	2,5	1,25	0,63	0,315	0,14	0,071
Щебінь гранітний Коростенського кар'єру фракції 5-10 мм	100	88	3	0	0	0	0	0	0
Висівки гранітні Коростенського кар'єру	100	100	97	79	53	37	25	17	13
Мінеральний порошок	100	100	100	100	100	100	98	88	74
Підібраний склад (повні проходи)	100	95,2	59,61	46,87	35,09	26,61	20,11	15,17	12,07
Вимоги до зернового складу (повні проходи) ДСТУ Б В.2.7-119 тип "Б"	100	100-90	65-55	53-43	43-33	33-23	25-16	18-11	14-8

Малинський гранітний кар'єр



Коростеньський гранітний кар'єр

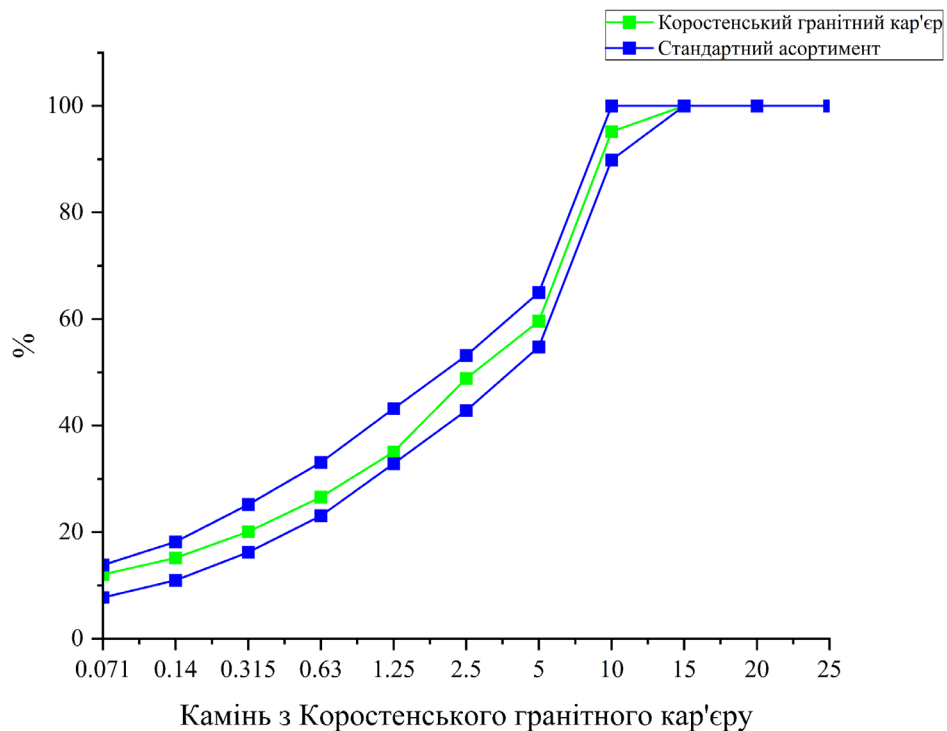


Рис. 3.12 - Гранулометричний склад суміші

Для приготування базового асфальтобетону та епоксидного асфальту, що містить СНS-ЕРОХУ 525, використовувався щебінь Малинського кар'єру. Для приготування базового асфальтобетону 2, епоксидного асфальту, що містить епоксидний "композит", та ФЗВК використовувався щебінь Коростеньського кар'єру. Епоксидований поліуретановий асфальтобетон виготовлений з використанням ФЗВК.

Обраний вихідний склад асфальтобетону та епоксидного асфальту відповідає вимогам ДСТУ Б В.2.7-119.

Процес приготування епоксидного асфальту складається з наступних технологічних операцій:

- дозування та змішування щебеню, піску та мінерального порошку за обраним складом;
- нагрівання мінерального матеріалу до необхідної температури;
- нагрівання мінерального матеріалу до необхідної температури;
- додавання затверджувача в асфальт, нагрітий до потрібної температури, та перемішування протягом 5-10 хвилин;

- введення бітуму у мінеральну суміш разом із затверджувачем з подальшим перемішуванням;

- введення в суміш епоксидної смоли або епоксиполіуретану та перемішування.

Вихідний асфальтобетон готували за традиційною технологією.

Температури нагрівання компонентів при формуванні асфальтобетону та епоксидного волокнистого асфальтобетону наведені в таблиці 3.17.

Таблиця 3.17 - Температури нагрівання компонентів

Назва інгредієнта суміші	Температура нагріву компонента, °С	
	Оригінальний асфальтобетон	Епоксидний бітум
Бітум	160	130
Мінеральні матеріали	170	140
Епоксидна смола або епоксиполіуретан	-	80
Затверджувач	-	80
Волокна з летючої золи теплових електростанцій	-	120

Зразки асфальтобетону та епоксидного фібробетону готували та випробовували згідно з ДСТУ Б В.2.7-89 (ГОСТ 12801).

Враховуючи, що фактичний вміст щибеневої частини суміші перевищував 35%, зразки формували під тиском 30 МПа протягом 3 хвилин. Температура на початку формування зразків сирого асфальтобетону становила 160 °С, а в кінці - 150 °С. Для епоксидно-фібробетону вона становила 130 °С і 100 °С відповідно.

З метою дослідження зміни властивостей епоксидного асфальтобетону зі ступенем формування структури матеріалу під впливом процесу термічного окиснення епоксидних компонентів зразки епоксидного асфальтобетону зберігали при температурі 20 °С протягом 1, 14 та 28 діб.

Висновки Розділу III

1. Охарактеризовано вихідні матеріали, що використовуються в гарячому та холодному литому асфальтобетоні (ЛЕМС), а також наведено стандартні методи дослідження компонентів ЛЕМС та самих сумішей.

2. Визначено основні етапи взаємодії в'язких асфальтових емульсій з кислими

мінеральними матеріалами під час формування ТП.

3. Запропоновану методологію оцінки швидкості набору інтенсивності когезійної міцності ЛЕМС з використанням двох нових показників: сукупності явних показників початку утворення когезійної міцності (агломерації) та сумішоутворення.

4. Детально описано використання бітуму марки БНД 50/70 виробництва ПАТ "Укртатнафта" (Кременчуцький НПЗ), який відповідає вимогам ДСТУ 4044. Розглянуто його фізико-механічні властивості, важливі для приготування епоксидного асфальтобетону.

5. Обговорено характеристики використовуваних мінеральних матеріалів, зокрема щебеню фракції 5-10 мм з Малинського та Коростенського гранітних кар'єрів. Ці матеріали відповідають відповідним стандартам (ДСТУ Б В.2.7-75 та ін.), що вказує на їх придатність для високоякісного епоксидного асфальтобетону.

6. Представлено різні типи епоксидних смол та їх властивості, зокрема продукти виробництва "Spolchemie" (Чехія) та ВАТ "Композит" (Україна). Ці смоли, а також затверджувачі та інші компоненти, є ключовими для забезпечення необхідних властивостей епоксидного асфальтобетону.

4. ПРИНЦИПОВЕ ВИВЧЕННЯ ВЗАЄМОДІЇ МАТЕРІАЛІВ У МОДИФІКОВАНОМУ ЛИТОМУ БЕТОНІ ТА ЕПОКСИДНОМУ АСФАЛЬТОБЕТОНІ

4.1 Основи вивчення впливу ФЗВК на структурно-механічні властивості асфальту та емульгованого асфальту в литому асфальтобетоні

4.1.1 Вплив ФЗВК на структуру та властивості асфальту в гарячому литому асфальтобетоні

Умови експлуатації дорожніх покриттів, обумовлені безпосереднім впливом погодних та кліматичних факторів і транспортних навантажень, висувають відповідні вимоги до структури асфальтобетону. Вона повинна забезпечувати опір зсуву за високих температур, деформації та тріщиноутворенню за низьких температур, водостійкість, морозостійкість та інші експлуатаційні властивості з урахуванням впливу чинників старіння матеріалу протягом очікуваного терміну служби покриття. [132]

Останні дослідження показали, що для забезпечення довговічності гарячого литого асфальтобетону, особливо стійкості до зсуву (міцності за високих літніх температур), необхідно використовувати модифікований асфальт. Зазвичай асфальт модифікують полімерами (речовинами, молекули яких складаються з великої кількості повторюваних структурних одиниць) - синтетичними каучуками, смолами, натуральним каучуком. Модифікований бітум має багато позитивних властивостей (ширший інтервал пластичності, нижчу температуру крихкості, еластичність) [133-143].

Проте, враховуючи той факт, що гарячий литий асфальтобетон містить значну кількість бітуму (до 12%), було виявлено необхідність його структурування, тобто введення мінеральних матеріалів з добавками, здатними армувати (стабілізувати) бітумну плівку на частинках. Це забезпечить адсорбцію молекул асфальту на твердій поверхні добавки та частинок мінерального матеріалу. [144]

Загальновідомо, що адсорбовані молекули зазнають конформаційних змін, що призводять до зміни їх рухливості. Чим вища енергія адсорбції, тим менша довжина вільних зв'язків у бітумі та більша частка зв'язаних сегментів ланцюга. Отже, можна

припустити, що на великих мінеральних частинках (10 мм) в асфальтобетонних сумішах структуровані молекули асфальту матимуть міцнішу адгезію, зберігаючи при цьому певну гнучкість. Для дрібних частинок (менше 3 мм) цей ефект буде більш вираженим. [145]

Коли до асфальтового в'язучого додають ФЗВК, між реактивними частинками золи-виносу, асфальтенами та асфальтовими смолами відбувається хемосорбція, що забезпечує властивості асфальту та прилипання частинок до мінерального матеріалу, тобто міцність та стійкість до деформації литої асфальтобетонної суміші. [146]

Асфальт складається з ФЗВК, які є мікро наповнювачами в асфальтовому в'язучому - композитному матеріалі з міцним зв'язком, що забезпечує експлуатаційні властивості для литих асфальтобетонних покриттів.

4.1.2 Розробка дорожнього нафтового бітуму для ЛЕМС

Залежно від виду та складу вихідної нафти та технології її переробки, найпоширенішими видами дорожнього асфальту сьогодні є дистильований асфальт (залишкова нафта) та окислений асфальт.

Для України найпоширенішими є окислені бітуми, але для дослідження були використані й дистильовані бітуми, оскільки стверджується, що саме вони є найбільш придатними для технології ЛЕМС. [146] В останні роки порушуються питання про правильність надання переваги технологічному способу отримання бітуму з нафтової сировини за допомогою окиснення, і досить твердо звучать заяви про доцільність виробництва й застосування дистильованих бітумів, отриманих методом вакуумної перегонки важкої сировини у різних країнах світу. Однак при виробництві таких сумішей не завжди враховуються такі фактори, як погодні та кліматичні умови, характеристики сировини (легкої та важкої нафти), а також система оцінки якості бітуму [137-139].

Тому досліджено три види окислених бітумів: БНД 50/70 виробництва ПАТ "Транснаціональна фінансово-промислова нафтова компанія "Укртатнафта" (далі - "БНД 50/70 Укртатнафта"), БНД 50/70 виробництва АТ "Мозирський НПЗ" (далі - "БНД 50/70 Мозирський НПЗ"), а також БНД 50/70 Укртатнафта, модифікований ІКС (відтепер іменується як "БНД 50/70 Укртатнафта з ІКС"). Крім того,

використовується два дистильовані бітума з важкої нафти: Nynas 100/150 і Nybit E85 (Швеція) [63].

Якщо визначити тип структури бітуму, то зв'язок, який існує між складом, структурою й властивостями бітуму, дозволяє прогнозувати поведінку будь-якого бітуму в умовах експлуатації. Для цього використовують критерії групового хімічного складу або різні розрахункові критерії.

Визначення типу структури асфальту безпосередньо залежить від складу його груп, тобто вмісту асфальтенів, смол, олій та їх компонентів. Сучасні уявлення про структуру асфальту, засновані на основних положеннях фізико-хімічної механіки, сучасної колоїдної хімії та фізичної хімії полімерів, розглядають асфальт як просторово-дисперсну систему, дисперсною фазою якої є асфальтени, а дисперсійним середовищем - олії та смоли. [148] Асфальтени з хімерними гідрофобно-гідрофільними поверхнями адсорбують високомолекулярні смоли і набрякають між оліями та низькомолекулярними смолами. Розуміння структурних типів асфальтенів допоможе спрогнозувати їх фізичні та реологічні властивості, раціоналізувати використання асфальтенів у різних технологіях.

Відповідно до стандартів ГХС визначали структурну форму бітуму, вміст парафіну та кислотне число.

Загальновідомо, що холоднолитий асфальтобетон (ЛЕМС), як і будь-яка асфальтобетонна емульсійна система, вимагає не тільки використання традиційних методів випробувань, але й проведення низки специфічних тестів для контролю якості всієї сировини. Тому для того, щоб оцінити якість асфальтобетону, необхідно визначити тип структури.

Структурний тип бітуму визначали за критерієм групового хімічного складу (ГХС). ГХС за методом Маркуссона.

Огляд літературних даних вказує на те, що існують три структурні типи асфальтобетону, як показано на рисунку 4.1.

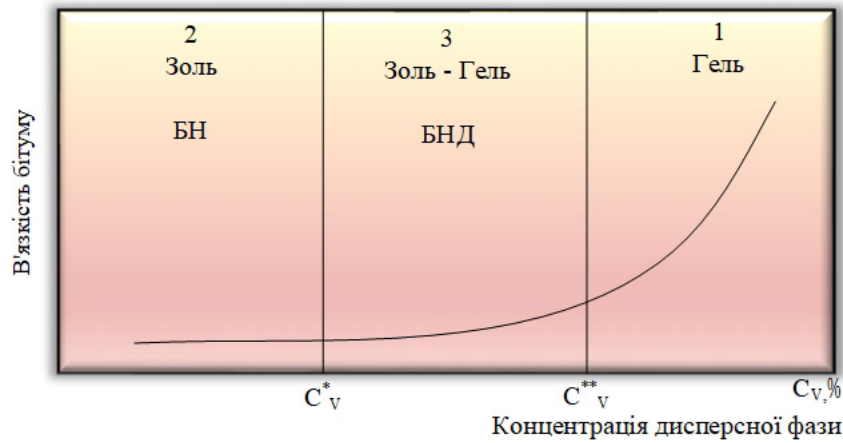


Рис. 4.1 Крива формування структури асфальту

Критерієм класифікації є вміст і природа асфальтенів і мартенів (смола і фракції бджолиного воску). Ця частина підтверджується адсорбційно-хроматографічним аналізом дорожнього асфальту, за допомогою якого за сумарним вмістом основних компонентів (асфальтенів, смола і фракцій бджолиного воску) всі асфальти, незалежно від нафти - вихідної асфальтової сировини і способу її отримання, класифікуються.

Таблиця 4.1 Розраховані показники для типів структури асфальтобетону

Структурний тип бітуму	Значення розрахованих критеріїв для визначення структурного типу		
	Інтервал пластичності (ІП), °С	Індекс проникнення (ІР)	Індикатор В.А. Золотарьова (K _{ста})
1. Гель	≥ 75° С	більший +1,0	>0,13
3. Золь-Гель	55-75° С	від -1,0 до 1,0	0,08-0,13
2. Золь	≤55° С	менше -1,0	<0,08

Груповий хімічний склад досліджуваних бітумів наведено в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 - Типи споруд відповідно до стандартів ГХС

№	Марка бітуму	Груповий хімічний склад, % мас.				Відношення, *100%			С-тип за ГХС
		Виробник	Технологія отримання	Асфальте н(А)	Смола(С)	Масла (оливи) М	A/ A+C	A/ C+M	
1	Nynas 100/150	Nynas	Дистиляція	12,1	29,5	58,4	29,1	13,8	2
2	Nybit E85	Nynas	Дистиляція	15,9	38,1	46,0	29,4	19,8	2
3	БНД 50/70	Ukrnafta	Окислення	25,3	24,7	50,0	50,6	33,9	3

4	БНД 50/70 with ІКС	Ukrnafta	Окислення	22,0	36,0	42,0	37,9	28,2	3
5	БНД 60/90	Mozirsky Oil Refinery	Окислення	23,0	29,8	47,2	43,6	29,9	3

Аналізуючи таблицю 4.2, можна побачити, що бітуми Nynas 100/150, а також Nubit E85 належать до 2-го структурного типу (гель) за всіма показниками за вмістом асфальтену та співвідношенням A/A+C, A/C+M, а три окислені бітуми можна віднести до третього типу (золь-гель). Такий розподіл структурних типів можна пояснити відмінностями у використанні сировини та методах, що застосовуються для отримання цих бітумів. На рисунку 4.2 показано вплив вмісту асфальтену на структурний тип досліджуваних бітумів. Зі збільшенням вмісту асфальтену структурний тип змінюється в наступному порядку: "золь-гель" - "золь-гель" - "гель".

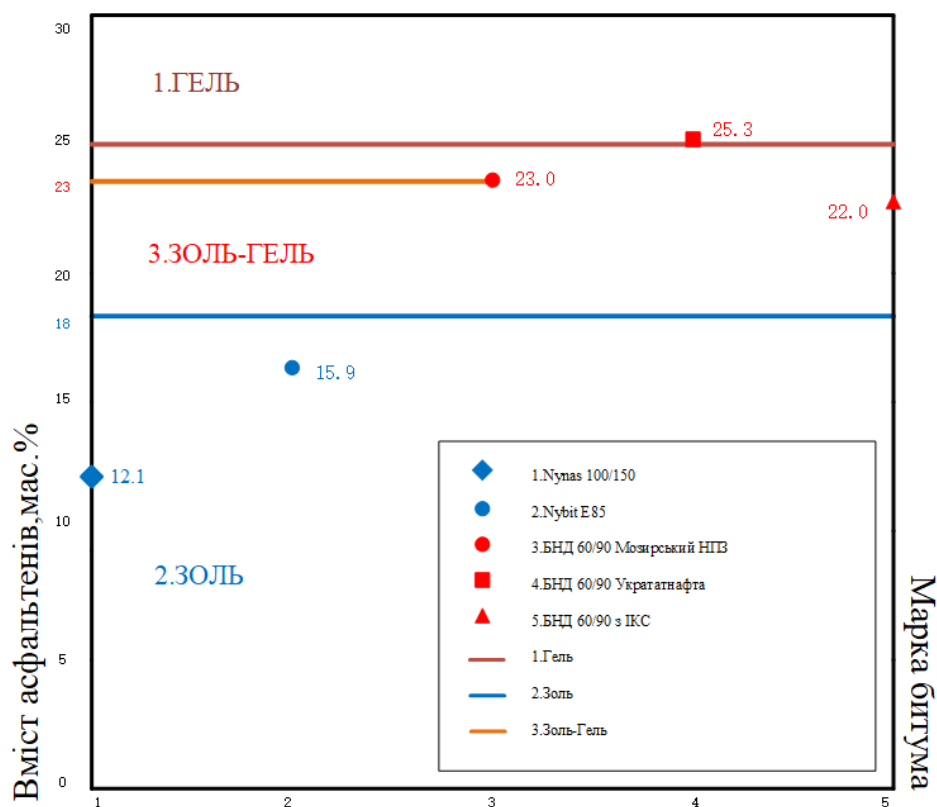


Рис. 4.2 Типи структури асфальтобетону відповідно до вмісту асфальтену згідно з рекомендаціями ГХС

4.1.3 Фізико-механічні властивості асфальтобетону та використання проектних критеріїв для визначення типу конструкції

Визначити фізико-механічні властивості асфальтобетону для встановлення відповідності чинним нормативним документам та використати критерії

проектування для визначення типу структури асфальтобетону. Деякі фізико-механічні властивості асфальтобетону наведені в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 - Фізико-механічні властивості бітуму

№	Марка бітуму	Назва і значення показників							
		T _{раз} , °C	П _{25, 0,1} мм	Д ₂₅ , см	T _{хр} , °C	П, °C	ІР	Вміст. параф., % мас.	Зчеплення зі склом
1	Nynas 100/150	43	107	>100	-15	58	-1,25	0,5	20
2	Nybit E85	47	80	>100	-11	58	-0,8	0,5	24
3	БНД 50/70	49	72	84	-18	67	0,6	5,4	32
4	БНД 50/70 with ІКС	52	62	26	-16	68	-0,21	4,0	93
5	БНД 50/70 Mozirsky	48	85	78	-22	70	-0,66	4,4	30

Досліджувані дистильовані бітуми відповідають маркам БНД 100/150 та БНД 50/70 стандарту СОУ 45.2-00018112-069:2011, а також немодифікованому окисленому БНД 50/70 стандарту ДСТУ 4044-2001.

Високий вміст твердих парафінових вуглеводів спостерігався в окисленому бітумі і значно нижчий - у дистильованому бітумі.

На рисунку 4.3 показано вміст твердих парафінів у бітумі для цих типів бітумів.

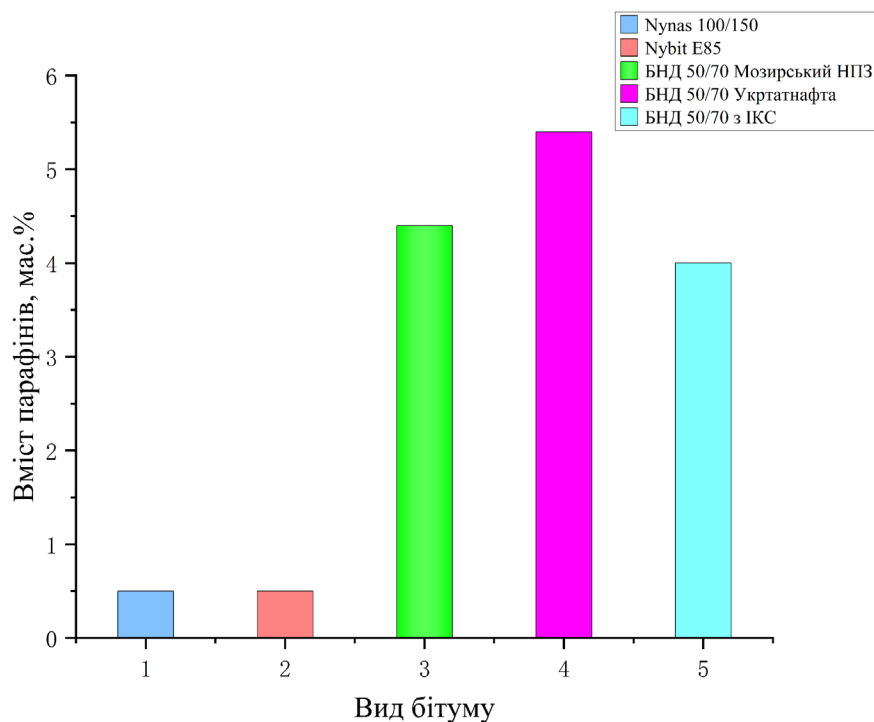


Рис. 4.3 Вміст парафіну в різних типах бітумів

Додавання ІКС та пластифікаторів до БНД 50/70 "Укрнафта" знижує вміст парафіну в бітумі на 26% (рис. 4.3) та покращує адгезію бітуму до скляних поверхонь в 1,9 рази (рис. 4.4).

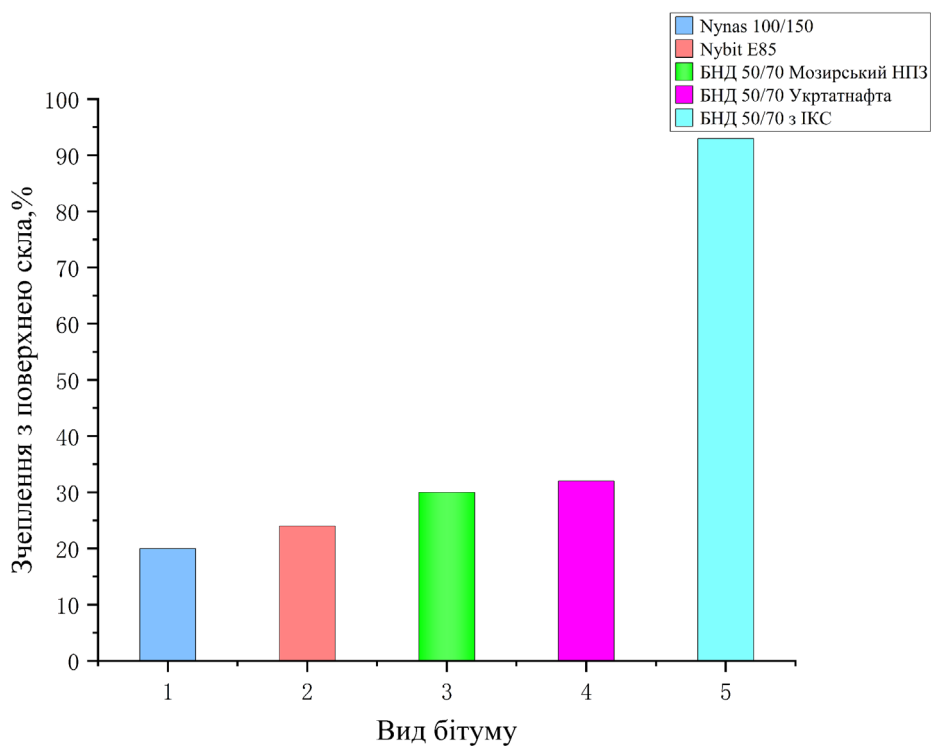


Рис. 4.4 Адгезія різних типів бітумів до скляних поверхонь

Значення інтервалів пластичності асфальтобетону наведені на рис. 4.5.

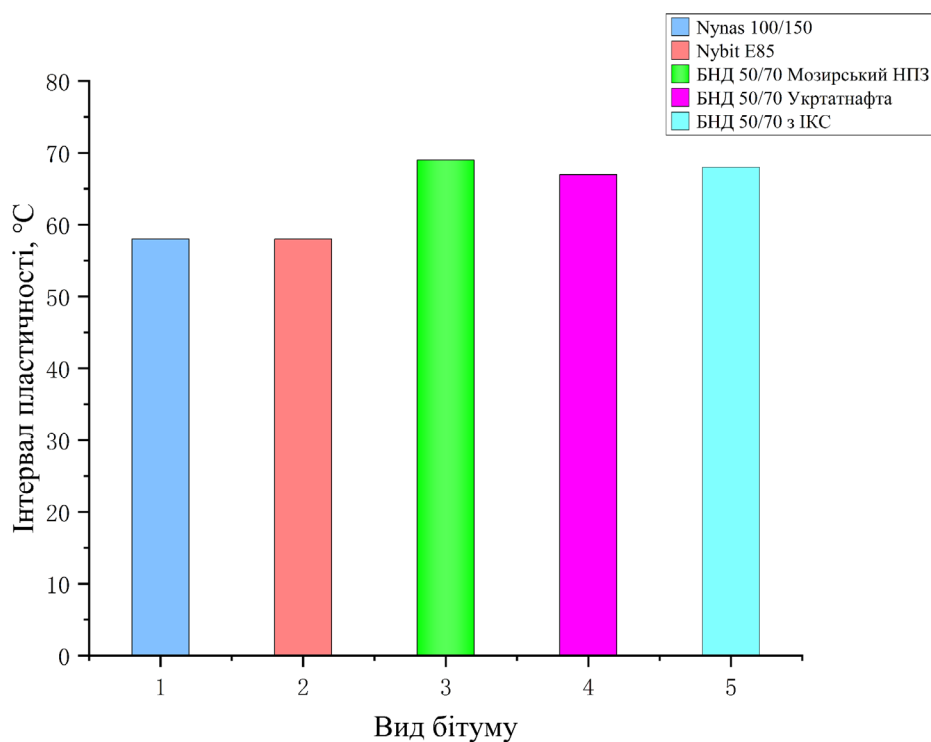


Рис. 4.5 Інтервали пластичності різних типів бітумів

Основна відмінність між важкими нафтовими дистилатними бітумами та легкими нафтовими окисленими бітумами полягає у значенні кислотності (Рис. 4.6). Перший характеризується високим значенням кислотності (близько 3,5 мг КОН/г), тоді як інші мають низькі значення кислотності (0,5-0,6 мг КОН/г).

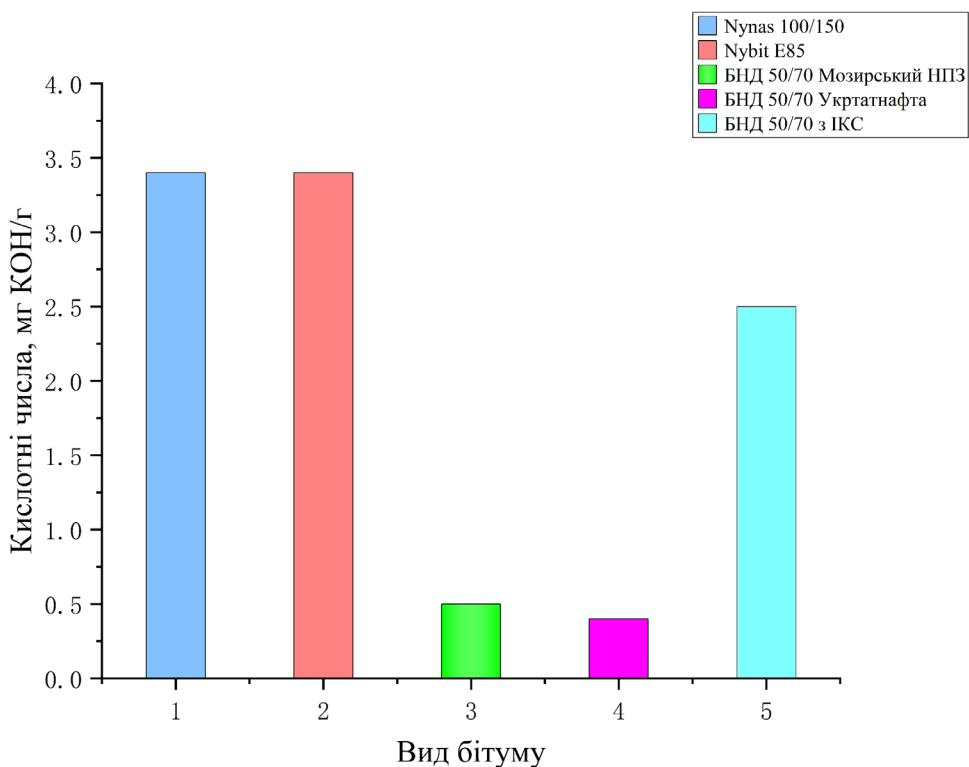


Рис. 4.6 Значення кислотності різних типів бітумів

За даними таблиці 4.3 видно, що бітуми другого типу структури ("золь-гель") та третього типу структури ("золь-гель") є відносно рівними за показником пенетрації, дещо нижчою температурою розм'якшення, підвищеною пластичністю при 25°C (більше 100 см), а також мають незначний вміст парафінів у своїх складах. У свою чергу, бітуми перехідного типу структури "золь-гель" мають ширший діапазон пластичності завдяки нижчій температурі крихкості та вищій температурі розм'якшення (рис. 4.5).

Адгезія бітуму БНД 50/70, виготовленого з використанням ІКС, до скла значно збільшилася, що призвело до підвищення температури розм'якшення бітуму при збереженні проникності, що відповідає збільшенню кислотного числа бітуму з 0,5 мг КОН/г до 2,5 мг КОН/г, незначному підвищенню температури крихкості та значному зниженню пластичності на марці 50/70.

Після визначення фізико-механічних показників асфальтобетону було визначено структурний тип асфальтобетону з використанням наступних розрахункових критеріїв: інтервал пластичності, індекс проникнення голки, індекс $K_{ста}$ В. А. Золотарьова. Порівняння певного типу структури асфальтобетону, визначеного за критеріями ГХС, з типом, визначеним за проектними критеріями, наведено в табл. 4.4.

Таблиця 4.4 - Типи асфальтобетонних конструкцій відповідно до стандартів ГХС та критеріїв проектування

№	Марка бітуму	Визначення структурного типу за критеріями						
		ГХС	Інтервал пластичності (ІП)		Індекс пенетрації (ІР)		Показник В.А. Золотарьова ($K_{ста}$)	
			ІП, °С	С-ний тип	ІР	С-ний тип	$K_{ста}$	С-ний тип
1	Nynas 100/150	2	58	3	-1,25	2	0,07	2
2	Nybit E85	2	58	3	-0,8	3	0,07	2
3	БНД 50/70	3	69	3	-0,7	3	0,083	3
4	БНД 50/70 з ІКС	3	67	3	-0,6	3	0,096	3
5	БНД 50/70 Mozirsky	3	70	3	-0,66	3	0,092	3

Визначені за допомогою розрахункових критеріїв типи структури базуються на фізико-механічних властивостях і не корелюють точно з фактичним визначенням типів структури асфальтів за критеріями ГХС. З цього можна зробити висновок, що зазначені розрахункові критерії мають певну похибку.

Аналізуючи структурні типи бітумів за критеріями групового хімічного складу, було визначено, що дистильований бітум із важкої нафти тяжіє до другого структурного типу "Золь" з кислотним числом 3,5 мг КОН/г, а окислений бітум - до третього структурного типу "Золь-гель" з кислотним числом 0,5-0,6 мг КОН/г.

Отже, дослідження властивостей різних видів бітумів показали, що окислений бітум може бути використаний, що окислений бітум має більший інтервал пластичності, низьку теплочутливість, адаптується до суворих кліматичних умов, має нижчі кислотні числа, стійкий до старіння, а ІКС істотно здатний знижувати вміст парафінних речовин в окисленому бітумі, також сприяє поліпшенню адгезії.

Тому для подальших досліджень був обраний окислений бітум марки БНД 50/70 виробництва Мозирського НПЗ (Білорусь), який вигідно відрізняється від БНД 50/70 "Укртатнафта".

4.1.4 Взаємодія компонентів асфальтових емульсій для приготування холодного литого асфальтобетону (ЛЕМС)

Для приготування асфальтових емульсій використовувався БНД 50/70 Мозирського НПЗ - 85 мас.%, а з метою порівняння результатів дослідження було обрано емульгатори для асфальтових емульсій Redicote 505 та Redicote 540. При цьому були використані перший сорт та вищий сорт алюмінію сульфату вітчизняного виробництва. Властивості емульгаторів наведені у таблиці 4.5.

Ці емульгатори застосовуються у повільнорозпадних емульсіях, у технології ЛЕМС, а також в органо-мінеральних сумішах для стиральних матеріалів, приготованих за методами холодного рециклінгу.

Таблиця 4.5 - Фізичні властивості емульгатора $Al_2(SO_4)_3$

Назва показника	Характеристика
Зовнішній вигляд при 20 °С	Прозора рідина
Внешний вид при 20°С при кг/м ³	890

Границя плинності, °С	-20
Температура, °С	13
В'язкість при 20°С, сР (сантипуаз)	52
В'язкість при 20°С, сР	113

Для створення кислого середовища та досягнення необхідного рівня рН води в асфальтобетонній емульсії використовували 12% розчин соляної кислоти.

В якості промоторів швидкості розвитку когезійної міцності в ЛЕМС на основі окисленого асфальтобетону використовувались емульгатори Redicote 505 та Redicote 540, розроблені відділом застосування асфальтобетону компанії Akzo Nobel. Типові фізичні властивості цих емульгаторів згідно з технічною інформацією Akzo Nobel наведені в таблиці 4.6.

Таблиця 4.6 - Типові фізичні властивості емульгаторів Redicote 505 та Redicote 540

Індикатори	Характеристика	
	Redicote 505	Redicote 540
Зовнішній вигляд при 20°С	Рідина жовтого кольору	Світло жовта рідина
Щільність при 20°С в кг/м ³	905	940
Межа плинності, °С	-17	0
Температура займання, °С	34	>200

В якості армуючої та структуруючої добавки були використані ФЗВК.

Дані про властивості бітуму, що використовується для приготування емульсій в гарячому асфальтобетоні, необхідні для пояснення процесу впливу фібри на властивості зчеплення та швидкість твердіння холодних асфальтобетонних сумішей. Попередні дослідження підтвердили позитивний вплив волокон золи вугільних електростанцій, що виробляються в Китаї, на структурно-механічні властивості асфальту. Однак наявність добавок, тобто емульгаторів, у складі емульсій $Al_2(SO_4)_3$ в асфальтобетонних сумішах холодного лиття також впливає на ступінь взаємодії між волокнисто-активними частинками та асфальтенами і асфальтобетонними смолами. [149]

4.1.5 Основні показники швидкості набору міцності зчеплення холоднолитого асфальтобетону (ЛЕМС) з добавкою зольного волокна

Відомо, що взаємодія катіонних асфальтобетонних емульсій з кислими мінеральними матеріалами в процесі формування ТП залежить від наступних

показників швидкості набору когезійної міцності: розкладання суміші, початок набору когезійної міцності. Ці показники визначають процес формування, твердіння, самоущільнення, затвердіння ливарної суміші.

Швидкість формування ЛЕМС можна розділити на декілька етапів з відповідними характеристиками інтенсивності та часовими шкалами, як показано в таблиці 4.7.

Таблиця 4.7 Вимоги до швидкості набору когезійної міцності для холодного литого асфальтобетону

Час досягнення необхідної когезійної міцності, година	для	Характеристики міцності			Етапи формування ЛЕМС
		Характер перелому	Значення крутного моменту, кг*см	Межа міцності на зсув, МПА, не менше	
Не більше 0,5		“N” - Normal	12-13	0,26	Схоплювання
Не більше 1,0		“NS” - Normal Spin	20-21	0,42	Самоущільнення (відкриття руху з обмеженням швидкості до 40 км/год)
-		“S” - Spin	23	0,48	Уплотнение
Не більше 4,0		“SS” - Solid Spin	26	0,55	*Затвердіння (відкриття руху без обмеження швидкості)

*После данного етапа протекает этап окончательного набора когезионной прочности (доуплотнения).

ЛЕМС також поділяються на 5 класів за критерієм швидкості розвитку когезійної міцності під час фаз схоплювання та самоконсолідації, як показано в Таблиці 4.6 та на Рисунку 3.6.

Міцність на зсув розраховується за наступною формулою:

$$\tau = \frac{16 \cdot M_0}{\pi \cdot d^2} = 0,021 \cdot M_0 \quad (4.1)$$

де τ - межа міцності на стиск, МПа;

M_0 - крутний момент, кгс*см;

d - діаметр гумової головки, $d = 29 \times 10^{-3}$ м

Таблиця 4.8 Класифікація ЛЕМС за міцністю зчеплення критерії швидкості застигання

Клас суміші	Етапи формування	Час, в годинах, до досягнення межі міцності, τ	
		0,26 МПа	0,42 МПа
1	Повільне затвердіння, поступове відкриття руху з обмеженням швидкості до 40 км/год (самоущільнення)	Не більше 0,5 (30)	Не більше 1 (60)
2	Фактичне затвердіння, поступове відкриття руху з обмеженням швидкості до 40 км/год (самоущільнення)	Не більше 0,33 (20)	Не більше 1 (60)
3	Швидке затвердіння, поступове відкриття руху з обмеженням швидкості до 40 км/год (самоущільнення)	Не більше 0,5 (30)	Не більше 1 (60)
4	Дуже швидке затвердіння, швидке відкриття руху з обмеженням швидкості до 40 км/год (самоущільнення).	Не більше 0,33 (20)	Не більше 0,75 (45)

Тому доцільно розглядати основні показники темпу набору когезійної міцності: ступінь розпаду суміші (Р), момент настання когезійної міцності (ПКМ), чіткий ознака формування суміші (ФС), коагуляцію (Сх), здатність до самоущільнення (відкриття руху до 40 км/год), затвердіння (відкриття руху без обмеження швидкості) та придатності маси до улаштування.

Введення волокон підвищує когезійну міцність холодного литого асфальтобетону (ЛЕМС), взаємодіючи хімічно з асфальтом в емульсії. Зчеплення частинок золи-виносу з реакційними групами асфальтенів за наявності алюмінію сульфату, який додається як емульгатор до складу ЛЕМС емульсії, не послаблюється,

а посилюється.

4.2 Основне дослідження взаємодії асфальту, епоксидної смоли та ФЗВК при виготовленні епоксидного волокнистого асфальтобетону

4.2.1 Встановлення впливу епоксидних смол та волокон на структурно-композиційні зміни бітуму

Структура асфальту залежить від хімічного складу, властивостей і молекулярної структури його компонентів, що характеризується формуванням різноманітних надмолекулярних структур, які змінюються під впливом різноманітних факторів і суттєво впливають на експлуатаційні властивості матеріалу.

Відомо, що нафта та залишки важкої нафти являють собою колоїдні системи, в яких дисперсною фазою є частинки асфальтенів, оточені шарами смолистих речовин та сольватами поліциклічних ароматичних сполук (тобто марену). Такі частинки відомі як складними структурними одиницями (ССО). ССО - переважно сферичний структурний елемент, здатний існувати самостійно за заданих умов. Дисперсна масляна система має частинки різного розміру, тобто система полідисперсна. Рентгенівські дослідження показали, що нафта містить частинки розміром від 2,3 до 12 нм. Найімовірніше до агрегації здатні асфальтени та смоли. На їхню схильність до агрегації суттєво впливає вміст у них ароматичних фрагментів. Найменш агреговані смоли переважно дисперговані в дисперсійному середовищі, в той час як більш ароматичні смоли з вищими молекулярними масами зосереджені в сольватованих шарах зі структурними одиницями, що складаються з ядер агрегатів асфальтенів. Вміст асфальтенів надто високий, сольватність диспергую його середовища низька, що являє собою дисперсну фазу, а вміст асфальтенів низький, та залишкова нафта близька до істинного розчину (вміст асфальтенів від 0,006 % до 0,6 %). Структура ССО представлена на рисунку 4.7. [114-115,120-122,149-154]

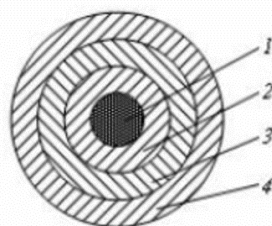


Рис. 4.7 Схематичне зображення структурних одиниць асфальту:

- 1 - Ядро (дисперсна фаза);
- 2 - Сольватні оболонки;
- 3 - Перехідна зона;
- 4 - Дисперсійне середовище.

Незалежно від способу отримання нафтово-дисперсних структур, вони складаються з дисперсних частинок з високою площею поверхні та різним ступенем симетрії. Такі системи термодинамічно нестійкі та прагнуть перейти в більш стійкий стан, досягнення якого здійснюється збільшенням радіусу ядер частинок та зменшенням їх питомої площі поверхні. Все це сприятиме фазовому розділенню системи.

Стан та властивості асфальту залежать не тільки від форми та розмірів компонентних молекулярних та надмолекулярних структур, але і від усього комплексу явищ структуроутворення, починаючи від укладання окремих молекулярних ланцюгів і закінчуючи формуванням великих надмолекулярних структур з різними видами зв'язків (водневими, диполь-дипольними та ін.).

Таким чином, тип структури залежить від термодинамічного стану бітуму і змінюється за зміни зовнішніх умов, які визначають особливості реологічної поведінки матеріалу, а також границі переходу від рідкого стану до пластичного й до твердого. Від структури бітуму залежать характеристики його фізико-механічних властивостей, що проявляються за різних операційних умов.

З огляду на те, що введення епоксидних смол та волокон золи-виносу змінило основні властивості використовуваного бітуму, необхідно було вивчити зміни складу та структури бітумної складової внаслідок модифікуючих добавок. Нижче наведено результати проведеного дослідження, яке продемонструвало вплив кількості волокон та епоксидної смоли на зміни складу та структури асфальтової складової [156-157].

Загальновідомо, що основними складовими частинами асфальту є асфальтени, смоли та мінеральні олії. Асфальтени - концентрати полімерних сполук нафти, як правило, гетероатомних. Асфальтени - головні структуроутворювальні компоненти асфальту. Було визначено, що асфальтени - сума вільних радикалів (концентрація

яких близько 1019 -1020 спинив/г) і парамагнітних молекул. Завдяки суттєвій поляризації молекул асфальтени легко агрегуються. Молекули асфальтенів утворюють агрегати у вигляді паралельних плоских надмолекулярних пакетів.

Смоли надають бітумам пластичності й видовженості. Вони являють собою полімерні органічні сполуки з циклічними та гетероциклічними структурами, сильно конденсованими та взаємопов'язаними аліфатичними ланцюгами, що забезпечує їх розчинність у низькокиплячих алканах.

Олії складаються з парафінів, парафіно-нафтових вуглеводнів, нафтових вуглеводнів та ароматичних сполук.

Щоб визначити закономірності змін у складі груп асфальтенів після введення епоксидних смол та волокон, застосовано метод дослідження смолисто-асфальтенових речовин в асфальті. Асфальтени розділяли шляхом розчинення в бензолі та відмивання гексаном. Асфальтени виділялися у вигляді аморфного порошку чорно-коричневого кольору, відфільтровувалися, відмивалися на фільтрі бензином, сушилися в сушильній шафі та зважувалися.

Результати вмісту асфальтену в асфальті наведені в таблиці 4.9.

Таблиця 4.9 - Відсотковий вміст асфальтенів в асфальті

Показник	БНД 100/150	БНД 100/150 при вмісті		БНД 100/150 при вмісті	
		Епоксидна смола 2,5 %	Волокно 3,5 %	Епоксидна смола 3,0 %	Волокно 4,0 %
Кількість виділених асфальтенів, %	40,13	60,12	71,14	54,32	64,33

(Відсоток вмісту епоксидної смоли - це вагове співвідношення епоксидної смоли до асфальту в епоксидно асфальтобетоні, а відсоток вмісту волокна - це вагове співвідношення волокна до мінерального матеріалу.)

Аналіз даних у таблиці 4.9 показує, що значне збільшення концентрації асфальтено-полімерних сполук, які складаються з епоксидних, волоконних та асфальтенових молекул, і утворених агломератів можна спостерігати при введенні волокон та зі збільшенням кількості волокон.

Для подальшого дослідження складу бітуму з волокнами та епоксидною смолою зразки проаналізували методом інфрачервоної спектроскопії.

Експериментальні параметри: ІЧ-Фур'є спектрометр Nicolet-380, приставка Smart Multi Bounce NATR (Рисунок 4.8). Приставка Smart Multi Bounce NATR дозволяє отримувати інфрачервоні спектри зразків методом багаторазового пригніченого повного внутрішнього відбиття інфрачервоного променя від поверхні рідкого або твердого порошкового зразка.

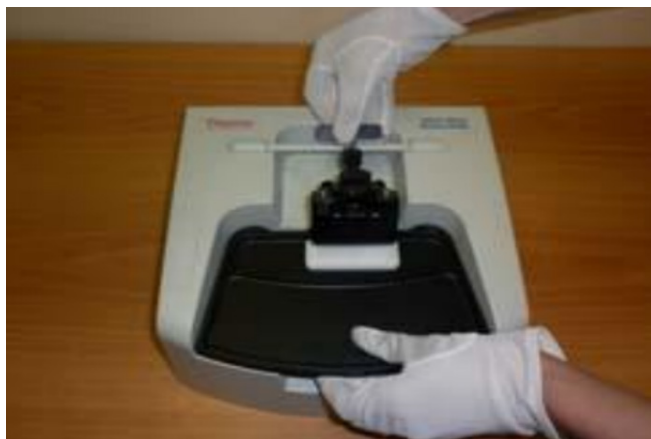


Рис. 4.8 Приставка Smart Multi Bounce NATR

Результати ІЧ-спектрів вихідного та модифікованого бітуму наведено на рисунку 4.9. У даному випадку, дотримуючись методу порівняльного аналізу хімічного складу сполук за допомогою інфрачервоної спектроскопії, отримані спектри пропорційно накладаються на групу CH_2 , вміст якої не залежить від умов проведення експерименту. Таке порівняння дозволяє простежити зміни у їх кількостях відносно один одного [158-159].

Аналіз результатів, отриманих при дослідженні бітуму марки БНД 100/150, свідчить про наявність сильних смуг, характерних для бітуму, в областях $3000\text{-}2800\text{ cm}^{-1}$ (телескопічні коливання $\nu(\text{CH})$ та CH_2 груп), 1460 cm^{-1} (деформаційні коливання $\delta(\text{CH}_2)$) та 1377 cm^{-1} (деформаційні коливання $\delta(\text{CH}_3)$). Ці смуги стабільно присутні в спектрах насичених вуглеводнів, парафінів та олій.

У спектрах компонентів добре видно смугу пропускання при 720 cm^{-1} , що відповідає деформаційному коливанню групи $\delta(\text{CH}_2)$ у вільному парафіновому ланцюжку. Добре видно характерний триплет $747, 812$ та 870 cm^{-1} , що є ознакою присутності ароматичних структур.

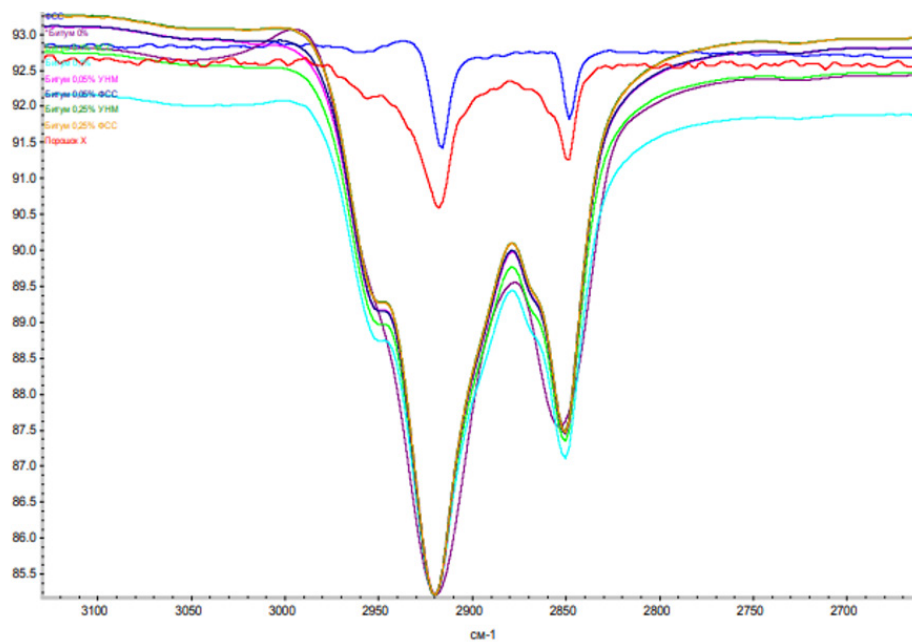


Рис. 4.9 Порівняльний спектр асфальту модифікованого волокнистими наповнювачами-волокнами

Порівняння інфрачервоних спектрів вихідного та модифікованого асфальту, показало зміну інтенсивності при смузі поглинання 1600 см^{-1} , що відповідає валентному коливанню бензольного кільця елементів групового складу асфальтенів, при збільшенні площі піку в 1,7 і 1,2 рази для 0,1 % за мас. ФСС та ФСМ відповідно [160].

Високочастотні піки у області 3050 см^{-1} незайманого бітуму дозволяють віднести їх до телескопічних коливань ОН-гідроксильної групи не пов'язаної з будь-яким видом водневих зв'язків. Введення карбонового наномодифікатора призводить до послаблення піків, а також зменшення інтенсивності відповідних їм ІЧ-спектрів. Така зміна пов'язана з перебудовою структури водневих зв'язків бітуму, до складу якого були введені модифікатори - епоксидна смола та волокна золи-виносу китайського виробництва.

Загальновідомо, що вільні радикали сконцентровані в асфальтенових речовинах, що є одним із факторів, який зумовлює схильність асфальтенів до зв'язування. Наявність вільних радикалів пов'язана з тим, що асфальтени містять найбільш щільно укладені ароматичні структури, які спричиняють явища парамагнетизму. Це призводить до міжмолекулярних взаємодій, які сприяють утворенню надмолекулярних структур.

Про варіацію групового складу асфальту під час введення також свідчать результати визначення коефіцієнтів аналізу структурних груп модифікованого бітуму, визначені за допомогою інфрачервоної спектроскопії (табл. 4.10).

Таблиця 4.10 - Інтенсивність смуг поглинання структурних елементів модифікованого бітуму

Конструктивний елемент	БНД 100/150 (вихідний)	Епоксидна смола, мас.%			Волокно, мас.%:		
		2,0	2,5	3,5	2,0	3,0	4,0
Парафіно-нафтонові вуглеводні	127	20	29	17	30	19	36
Розтягувальні коливання ненасичених С=C зв'язків у циклічних структурах	71	128	119	113	124	82	118

Аналіз наведених результатів свідчить про зміну групового складу модифікованого бітуму. Було встановлено, що введення різних кількостей епоксидної смоли та волокон призводить до зниження вмісту парафінових структурних елементів.

4.2.2 Зміна структури бітуму, модифікованого епоксидною смолою та ФЗВК

Щоб встановити процес приведення композитної системи до рівноважного стану та визначити зміни у структурі асфальту, визначили зміни твердості асфальту для різного вмісту добавок у діапазоні температур від 0 °С до 30 °С та встановили закономірність зміни твердості асфальту. Властивості композитів були визначені.

Зміни твердості було визначено шляхом термостатування зразків модифікованого бітуму з подальшим визначенням їх пенетрації голкою методом, передбаченим ДСТУ 4044. Термостатування проводять у водяній ванні, і задану температуру тримають протягом 1 год. Після цього було визначено натуральний логарифм значення пенетрації голки.

Енергію активації визначали із залежності логарифма penetрації голки та зворотної величини температури випробування, яку апроксимували прямою лінією між суміжними експериментальними точками (закон Арреніуса).

Використовуючи отримані значення натурального логарифма проникності - \ln залежно від температури випробування (таблиця 4.11) та використовуючи рівняння Арреніуса, розраховано енергію активації бітуму та отриманого модифікованого композиту[160].

Величину енергії активації $E_{\text{АКТ}}$ та логарифм передстепенного множника визначають графічно як тангенс кута нахилу прямої лінії відносно горизонтальної координати:

$$tga = \frac{E_a}{R} \quad (4.2)$$

На рисунках 4.10 і 4.11 показано графічне відображення картини зміни твердості модифікованого бітуму з оберненою температурою, необхідної для розрахунку енергії активації.

Таблиця 4.11 - Введення ФСМ для визначення натурального логарифму введення голки

Кількість модифікатора від маси бітуму		Логарифм проникнення бітуму при різних температурах (1/T)					
Епоксидна смола	Фібра	0,033	0,04	0,05	0,066	0,1	0,2
0	0	4,970	4,691	4,174	3,806	3,367	3,258
2,0	2,0	4,868	4,644	4,043	3,829	3,611	3,178
2,5	3,0	4,970	4,654	4,205	3,850	3,611	3,219
3,5	4,0	4,990	4,654	4,174	3,807	3,496	3,258

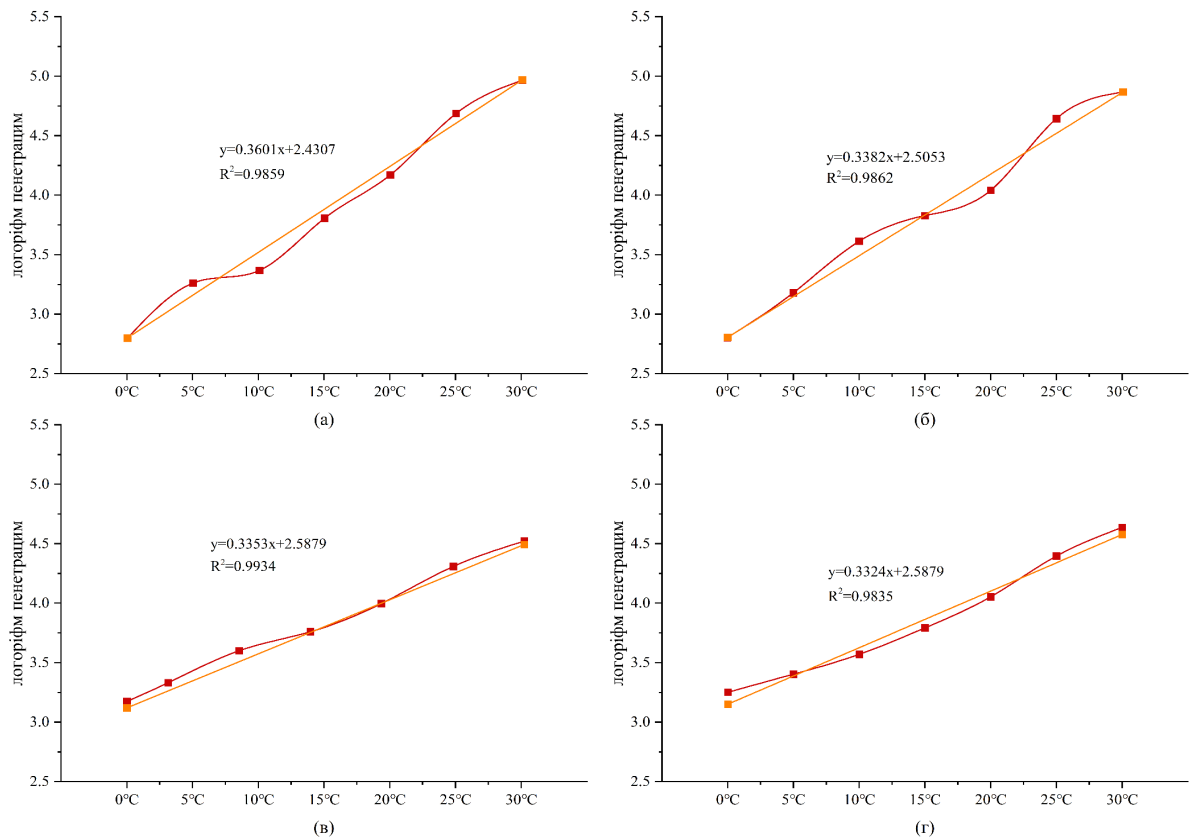


Рис. 4.10 - Графічна залежність проникнення голки колоди від температури асфальту: а - БНД 100/150; б - БНД 100/150 + 2,0% епоксидної смоли та 2,0% фібри; в - БНД 100/150 + 2,5% епоксидної смоли та 3,0% фібри; г - БНД 100/150 + 3,5% епоксидної смоли та 4,0% фібри

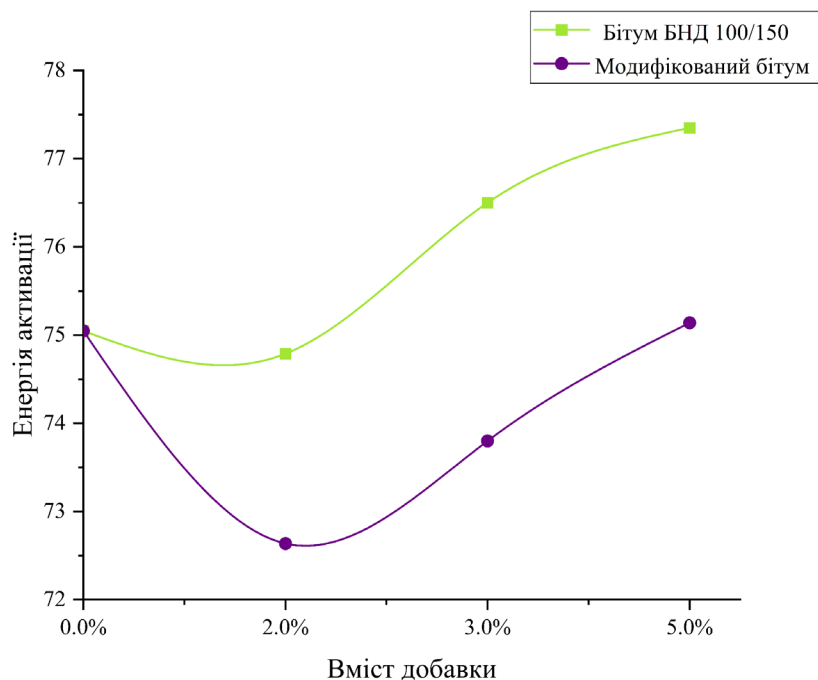


Рис 4.11 Енергія активації бітуму БНД 100/150 та бітуму, модифікованого епоксидною смолою та волокнами.

Зниження енергії активації, яке спостерігається при введенні 2,0 % епоксидної смоли і волокон, може бути віднесено до розриву міжмолекулярних водневих або π-зв'язків у молекулярних підсистемах асфальтенів. Таким чином, загальне зниження енергії активації при введенні модифікатора може бути пов'язано з незворотним руйнуванням цих нековалентних зв'язків в модифікованих композиціях асфальтенів. Спостережуване зростання енергії активації при збільшенні концентрації добавки дає підстави стверджувати, що в асфальтових композиціях при введенні їх понад 2,0 % за мас. утворюються протяжні надмолекулярні структури, утворені агрегацією добавки.

4.2.3 Вивчення процесу старіння модифікованого бітуму

Хімічні процеси, що відбуваються під час старіння асфальту, є основою зміни його властивостей. Незворотні зміни у складі й властивостях асфальту обумовлені: випаровуванням летких складових із тонкого поверхневого шару внаслідок температури і в'язкості асфальту, полімеризацією, пов'язаною з дією каталізаторів (металів і мінеральних матеріалів) і температури, окислювальною полімеризацією складових під дією світлового опромінення, конденсацією сполук та їх дегідрогенізацією та утворенням води.

Природно, що під час старіння асфальту старіє й асфальтобетон, що призводить до суттєвого зниження його експлуатаційних характеристик. З часом у асфальті зростає крихкість, внаслідок чого асфальтобетон також стає крихким. Зокрема, він у великому ступенні втрачає здатність сприймати розтягуючі напруження. Тому в зимовий період часу за різкого зниження температури в покритті з асфальтобетону з'являються тріщини. За підвищеної крихкості асфальтобетону, земля прискорює процес його фрагментації, що скорочує строк служби покриття [163].

Велика роль у стійкості асфальту під час старіння належить способу його одержання. Відомо, що окислений бітум стійкіший у дисперсному стані. Непрямою характеристикою опору асфальту "старінню" від багаторазового нагрівання асфальту є втрати його якості після нагрівання.

Тому у даній роботі досліджено вплив типу та кількості волоконних добавок на втрати маси асфальту при нагріванні та, відповідно, на його процес старіння.

Дослідження процесу старіння асфальтів за втратою маси проводилося методом масових втрат асфальту. Для визначення масових втрат плівок асфальту готували зразки з різним вмістом добавок. Епоксидну смолу та волокна розподіляли в нагрітому до робочої температури асфальті механічним перемішуванням. Потім на суху до постійної маси та знежирену металеву пластину розміром 40 x 20 мм наносили 0,40 г композитного асфальту і нагрівали у сушильній шафі при температурі 163 °С протягом 2 годин. Після нагрівання плиту з бітумомпереважували (рисунок 4.12).

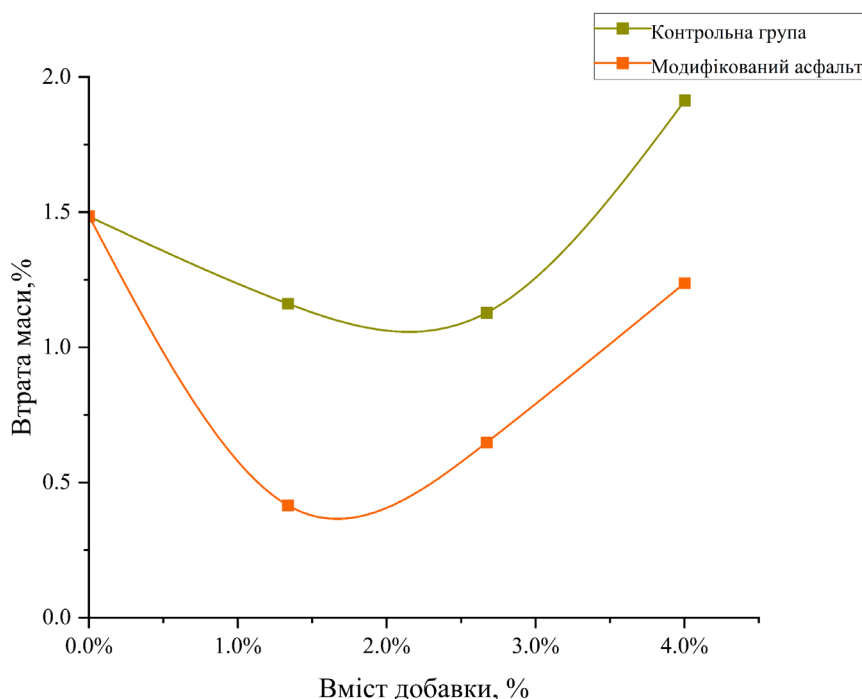


Рис. 4.12 Масові втрати асфальту після нагрівання

Як видно з рисунка 4.12, при введенні волоконних добавок в асфальтові композиції зменшується втрата маси розігрітої плівки асфальту, тобто зменшується випаровування з поверхні низькокиплячих фракцій нафтового асфальту, які містяться або утворюються під час процесу старіння. Це явище пояснюється тим, що з введенням добавок з'являються нові структурні зв'язки, у тому числі в низькокиплячих фракціях нафтового асфальту, які сприяють зростанню кількості асфальтенів за рахунок олійних складових [51,63].

Отже, можна підсумувати, що реактивні угруповання, які входять до складу композитного модифікатора (епоксидна смола та волокна) дозволяють сповільнити процеси термоокислювальної деструкції, що відбуваються при експлуатації

асфальту, що представляє собою їх використання як інгібіторів процесів окислення.

Зокрема, мінімальна втрата маси була визначена при введенні 2,0 % за мас. добавок. За цього зменшується випаровування з поверхні низькокиплячих компонентів нафтового асфальту, які наявні або утворюються в процесі старіння. Це обумовлено наявністю на поверхні асфальтену зв'язаної π -системи подвійних зв'язків, внаслідок чого молекули асфальтену вловлюють вільні радикали [163].

4.2.4 Визначення основних властивостей модифікованого бітуму

Асфальт у дорожньому покритті повинен зцементовувати мінеральний матеріал (скелет) у єдине ціле й не руйнуватися при тривалій експлуатації при деформації конструкції в широкому діапазоні температур. Міцність і довговічність асфальтової плівки значною мірою залежить від деформаційних властивостей асфальту, від яких зумовлена її поведінка під навантаженням. З огляду на практику найпростіша оцінка деформативних властивостей в'язких асфальтів зазвичай ґрунтується на визначенні двох властивостей — пенетрації голки та температури розм'якшення.

Отже, з метою встановлення зміни властивостей бітуму модифікованого епоксидною смолою та волокнами золи-виносу в першу чергу були визначені пенетрація голки та температурний інтервал пластичності незайманого бітуму з різною кількістю добавок.

Для визначення цих показників були приготовані асфальтові композиції з добавками шляхом введення їх в асфальт, нагрітий до робочої температури 130°C-140°C і механічним перемішуванням у лабораторному мішалці примусової дії. Кількість епоксидної смоли та волокон золи-виносу, були відмінними від прийнятих раніше сум.

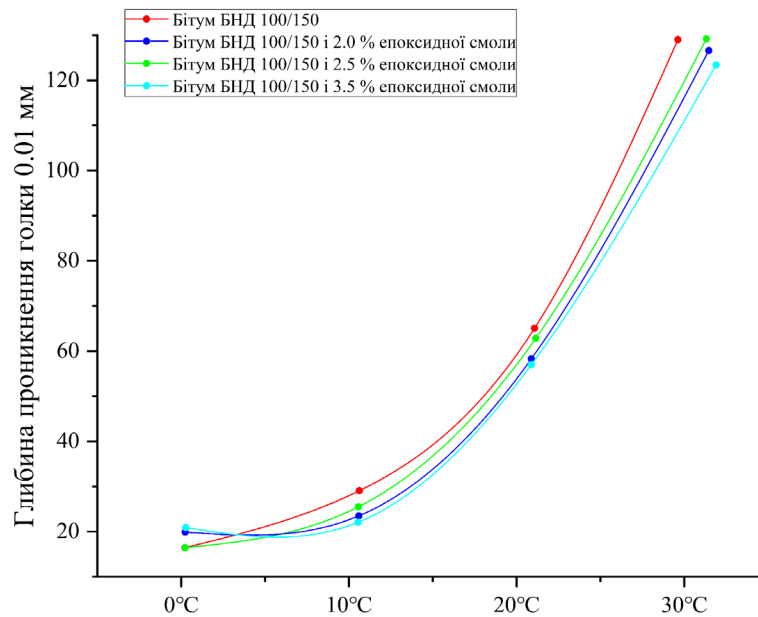
Для порівняння показані криві із застосуванням тільки епоксидної смоли, за відсутності золи-виносу.

У результаті були одержані композиційні в'язучі речовини такого складу:

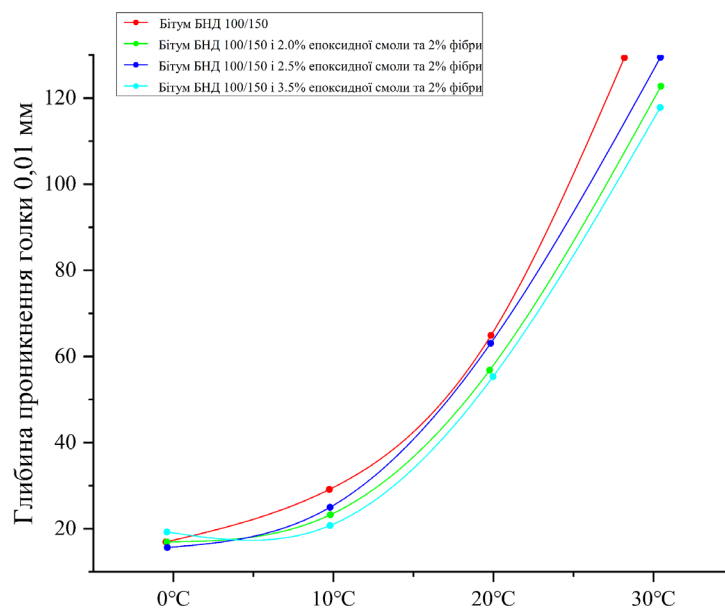
Склад I - Асфальт - 2,0% Епоксидна смола та 2,0 % Волокна золи-виносу
Склад II - Асфальт - 2,5% Епоксидна смола та 3,0 % Волокна золи-виносу
Склад III - Асфальт - 3,5 % Епоксидна смола та 4,0 % Волокна золи-виносу

На рисунку 4.13 зображена залежність зміни пенетрації голки для асфальтів в

залежності від температури випробування та введення добавок.



(а)



(б)

а) Асфальт та епоксидна смола - БНД 100/150 - Асфальт БНД 100/150 і 2,0% епоксидної смоли - Бітум БНД 100/150 і 2,5% епоксидної смоли - Бітум БНД 100/150 і 3,5% епоксидної смоли б) Бітум, епоксидна смола й зола-винос - БНД 100/150 - Бітум БНД 100/150 та 2,0% епоксидної смоли і 2% волокна - Бітум БНД 100/150 та 2,5% епоксидної смоли і 3,0% волокна - Бітум БНД 100/150 та 3,5% епоксидної смоли і 4% волокна

Рис. 4.13 - Зміна проникності асфальтів у залежності від введення різних компонентів

Як було вже згадано, внесення різних комбінацій епоксидної смоли в кількості 2,0-3,5 % за мас. та волокон в кількості 2,0-4,0 % за мас. спричинило зміну основних деформаційних властивостей дорожнього бітуму.

Вплив волокон на зміну penetрації асфальту аналогічний. За низьких температур відбувається пластифікація в'язучого, а за високих підвищується твердість. Збільшення penetрації голки за підвищених температур об'єктивно пов'язано з уже відомими даними щодо введення в бітум дисперсних наповнювачів. Підвищення твердості асфальту можна пояснити збільшенням ступеня упорядкування агрегатів, які утворюються активними частинками волокон золи-виносу з елементами групового складу асфальту. [167]

Залежно від температури, бітум як аморфна речовина може перебувати в таких фізичних станах: в'язкої рідини, високоеластичному та склоподібному. Перехід з одного фізичного стану в інший відбувається в певному інтервалі температур, кожному з яких відповідає певна структура бітуму.

За введення волокон золи-виносу система стає більш однорідною та орієнтованою, що вказує на важливе значення ступеня впорядкування структурних елементів системи, які суттєво впливають на процеси асоціації у разі зниження температури та дисоціації за підвищення температури.

На рисунку 4.14 зображено графік зміни інтервалу пластичності модифікованого бітуму залежно від кількості введеного композиційного в'язучого.

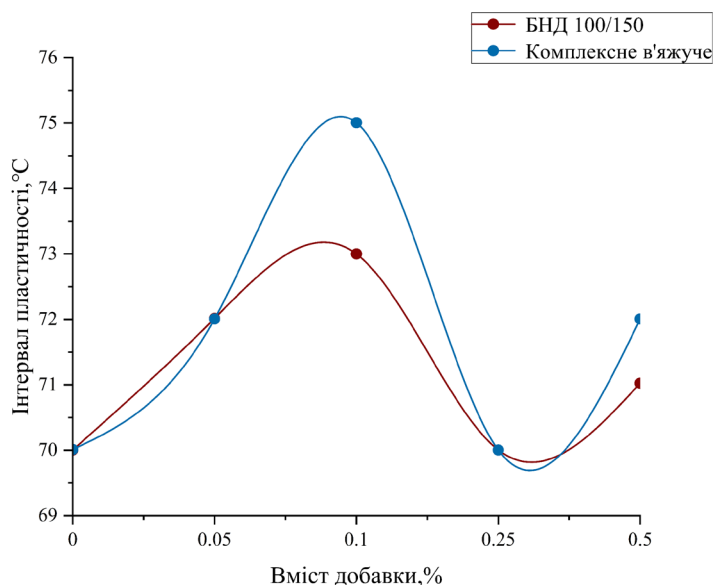


Рис. 4.14 - Вплив виду й дозування добавки на інтервал пластичності асфальту

Аналіз даних на рисунку 2.8 свідчить про те, що композиційне в'язуче розширює температурний інтервал застосування асфальту, знижуючи температурний показник його крихкості та підвищуючи температуру розм'якшення. Із рисунка 4.14 видно, що введення 2,0 % за мас. епоксидної смоли та 2,0 % за мас. волокон сприяє збільшенню температурного інтервалу експлуатації на 1-3 %.

Збільшення інтервалу пластичності можна пояснити збільшенням вмісту ароматичних сполук в елементному груповому складі асфальтенів, що відбувається унаслідок утворення структурних зв'язків між частинками волокон золи-виносу із вільними функціональними групами в'язучої речовини.

Важко встановити вплив складу асфальтів на температуру їх крихкості та проникнення голки, тому що ці показники значною мірою залежать від природи дисперсійного середовища. Найпростіша залежність спостерігалася між температурою розм'якшення та груповим складом бітуму. Температура розм'якшення зростала у разі збільшення концентрації асфальтенів та утворених ними в асфальті агрегатів. Температура крихкості підвищувалася за зменшення об'єму дисперсійного середовища.

Загальновідомо, що асфальтени як представники складних нафтодисперсних систем не мають у своєму складі заряджених частинок, проте вони є парамагнітними внаслідок наявності у концентрованій ароматичній структурі асфальтену вільної валентності карбону. Парамагнітний стан асфальтенів наділяє їх властивостями вільних радикалів, що сприяє об'єднанню молекул у зв'язки та утворенню комплексних структурних одиниць за рахунок обмінних взаємодій [171].

Механізм дії комплексних добавок щодо зміни групового складу та структури асфальтів полягає у тому, що атоми, які входять до складу молекули епоксидної смоли хімічно активні, тому що взаємопов'язані між собою одинарними і подвійними зв'язками та виступають переносниками енергії в реакції, здійснюючи приєднання до вільних радикалів різної хімічної природи. Навколо молекули утворюється шар частинок, які надає їй об'ємної структури, яка ще покривається шаром поляризованих частинок волокон золи-виносу. Завдяки великій концентрації парамагнітних центрів в асфальтені певна кількість неспарених електронів може

взаємодіяти з утворенням слабких ковалентних зв'язків, що призводить до зменшення кількості парамагнітних центрів в асфальтені, що можна пояснити процесом молекулярної перебудови, в результаті якого відбувається перерозподіл олійних компонентів між ядром, сольватною оболонкою і дисперсійним середовищем асфальтену. Це сприяє утворенню більш однорідної структури матеріалу, яка не містить дефектів, що сприяє формуванню більш щільної плівки асфальту та збільшенню міцності асфальтобетону.

4.2.5 Дослідження впливу введення епоксидної смоли та ФЗВК

Одними з найважливіших властивостей в'язучого, які зумовлюють подальшу експлуатацію дорожніх покриттів з асфальтобетону, є адгезія асфальту до мінеральних матеріалів. Оскільки стандартні методи оцінки адгезії асфальту до мінеральних матеріалів не дозволяють провести кількісну оцінку адгезії асфальту, у даній роботі були визначені крайовий кут змочування та поверхневий натяг асфальту без добавок та із введенням добавок. [163]

Загальновідомо, що змочування мінеральних матеріалів бітумом необхідне для їхньої адгезійної взаємодії. Добре змочування бітумом поверхонь щебеню є однією з необхідних умов для отримання стійких композитів із високими фізико-хімічними властивостями. Мірою змочування є крайовий кут між змочуваною поверхнею та поверхнею рідини по периметру змочування θ . За умови статичного (рівноважного) змочування він пов'язаний зі значеннями питомої вільної поверхневої енергії фаз, які взаємодіють, $\sigma_{ТВ}$, $\sigma_{Ж}$, $\sigma_{ТВ.Ж}$ за допомогою рівняння Юнга:

$$\cos \theta = (\sigma_{ТВ} - \sigma_{ТВ.Ж}) / \sigma_{Ж} \quad (4.3)$$

У нашій роботі ми використовували оптичне обладнання для визначення зміни кута змочування при температурах 120°C, 140°C, що передбачає межі робочого інтервалу бітуму БНД 100/150 при формуванні в'язучої плівки під час виробництва асфальтобетонних сумішей. У табл. 4.12 і 4.13 наведено дані дослідження контактного кута змочування асфальтобетону за температур 120 °C і 140 °C.

Таблиця 4.12 - Визначення кута змочування асфальту при 120°C

№	Клейові компоненти	Ширина краплі	Висота краплі	Tg θ	Середній контактний кут, о	Поверхневий натяг, дун/см
1	БНД 100/150	3,45	2,5	-2,63	98,5	318
		6,4	3,0	15,48		
2	Асфальт 2,0% епоксидна смола 2,0% волокно з летючої золи	5,9	2,75	14,23	85	306
		5,3	2,4	10,07		
3	Асфальт 2,5% епоксидна смола 3,0% волокно летючої золи	5,4	2,2	4,48	78	286
		6,5	2,7	5,36		
4	Асфальт 3,5% епоксидна смола 4,0% волокно летючої золи	4,7	1,9	4,66	77	293
		6,2	2,5	4,61		

Таблиця 4.13 - Визначення кута змочування асфальту при 140°C

№	Клейові компоненти	Ширина краплі	Висота краплі	Tg θ	Середній кут контакту. о	Поверхневий натяг. дун/см
1	БНД 100/150	6,0	2,7	9,47	88	332
		4,6	2,4	- 23,48		
2	Асфальт 2,0% епоксидна смола 2,0% волокно з летючої золи	4,4	2,2	-8,26	97	264
		3,9	2,2			
3	Асфальт 2,5% епоксидна смола 3,0% волокно летючої золи	5,0	2,5	4,44	77	266
		3,5	1,4			
4	Асфальт 3,5% епоксидна смола 4,0% волокно летючої золи	3,6	2,3	-4,04	95,5	266
		4,4	2,1	21,48		

Аналіз даних, отриманих в таблицях 4.12 і 4.13, показує, що поверхневий натяг бітуму зменшується з підвищенням температури, що є природним явищем для в'язких рідин. Поверхневий натяг на межі поділу фаз "тверде тіло-бітум" зменшується зі збільшенням вмісту волокон, які є поверхнево-активною речовиною нафтового бітуму.

На основі отриманих значень θ і $\sigma_{ж}$ розраховано енергію змочування або напругу зчеплення:

$$W_{\text{э}} = \sigma_{ж} \cdot \cos \theta \quad (4.4)$$

Адгезію рідини до твердого тіла можна описати рівнянням Дюпре.

$$W_a = \sigma_{ТВ} + \sigma_{ж} - \sigma_{ТВ.ж} \quad (4.5)$$

Рівняння Дюпре (4.5) у поєднанні з рівнянням Юнга (4.3) дозволяє визначити роботу адгезії за відомими значеннями $\cos \theta$ і $\sigma_{ж}$:

$$W_a = \sigma_{ж} (1 + \cos \theta) \quad (4.6)$$

Ця залежність відома як рівняння Юнга-Дюпре. Для того, щоб оцінити міцність взаємодії компонентів у модифікованому асфальтобетоні, було розраховано роботу когезії. Робота когезії визначається енергією, що витрачається на оборотне руйнування об'єкта в поперечному перерізі, що дорівнює одиниці площі. Оскільки при руйнуванні утворюються дві поверхні одиничної площі, то робота когезії становить:

$$W_k = 2\sigma_{ж} \quad (4.7)$$

Для характеристики процесу змочування використовується коефіцієнт розтікання S - різниця між роботою адгезії W_a і роботою когезії W_k . $S \rightarrow 0$ для повного змочування.

$$S = W_a - W_k = \sigma_{ж} (\cos \theta - 1) \quad (4.8)$$

Взаємозв'язок між роботою зв'язування та когезією можна виразити у відносних показниках:

$$Z_a = W_a / W_k \quad (4.9)$$

де Z_a - відносна робота адгезії рідини. Якщо W_a і W_k виражені через величини, визначені в рівняннях (4.8) і (4.9), то

$$Z_a = (\cos \theta + 1) / 2 \quad (4.10)$$

У таблицях 4.14 і 4.15 наведено всі розраховані значення вищезазначених фізико-хімічних властивостей поверхні системи мармуровий субстрат - органічне зв'язуюче при температурах 120°C і 140°C.

Таблиця 4.14 - Характеристики склеювання при температурі 120°C

№	Клейові композиції	Робота приєднання, Вт, МДж/м ²	Робота когезії, Wk, МДж/м ²	Відносна робота адгезії, Za
1	БНД 100/150	273,76	636	0,42
2	Асфальт 2,0% епоксидна смола 2,0% волокно летючої золи	326,28	548	0,54
3	Асфальт 2,5% епоксидна смола 3,0% волокно летючої золи	358,91	586	0,62
4	Асфальт 3,5% епоксидна смола 4,0% волокно летючої золи	362,64	584	0,52

Таблиця 4.15 - Характеристики склеювання при температурі 140°C

№	Adhesive compositions	Робота приєднання, Вт, МДж/м ²	Робота когезії, Wk, МДж/м ²	Відносна робота адгезії, Za
1	БНД 100/150	313,59	664	0,41
2	Асфальт 2,0% епоксидна смола 2,0% волокно летючої золи	340,88	658	0,51
3	Асфальт 2,5% епоксидна смола 3,0% волокно летючої золи	365,74	662	0,56
4	Асфальт 3,5% епоксидна смола 4,0% волокно летючої золи	387,92	690	0,56

Аналіз даних у таблицях 4.14 і 4.15 показує, що робота адгезії змінюється з різними дозуваннями добавок і температурами вимірювання, і ми можемо зробити висновок, що бітум, змішаний з епоксидною смолою та волокнами золи, адсорбується на межі фаз, що сприяє кращому змочуванню поверхні твердого матеріалу бітумом.

При додаванні волокон золи спостерігається збільшення відносної роботи адгезії: 0,40 → 0,60. Значення Za прагне до 1. Таким чином, когезія між бітумом і мармуром близька за величиною до когезії самих молекул бітуму. Це сприяє формуванню матеріалів з однорідною та бездефектною структурою.

Результати показують, що композиційне в'язуюче позитивніше впливає на

збільшення роботи адгезії, що пов'язано з вищим вмістом активних центрів у складі волокон золи.

Висновки IV розділу

1. Проведені теоретичні дослідження показали необхідність введення структурних наповнювачів до складу гарячих литих асфальтобетонних сумішей. У цій дисертації досліджується можливість введення волокон із золи-виносу теплових електростанцій, вироблених у Китаї.

2. Додавання волокон золи-виносу теплових електростанцій, вироблених у Китаї, до гарячого литого асфальтобетону дозволяє більш рівномірно розподілити збільшену кількість асфальту (до 12%) на частинках мінерального матеріалу, зміцнює (армує) структуру асфальтобетону, покращити міцність, стійкість до зсуву та шорсткість покриття з цього матеріалу.

3. Додавання волокон золи-виносу теплових електростанцій вітчизняного виробництва позитивно впливає на експлуатаційні характеристики холодного литого асфальтобетону (ЛЕМС), а в поєднанні з емульгаторами покращує адгезійну міцність та щільність суміші.

4. Наявність сульфату алюмінію $Al_2(SO_4)_3$ у в'язучому асфальтовій емульсії, введення волокон посилює зв'язок в асфальто-асфальтенових і смолистих реактивних групах, тим самим покращуючи експлуатаційні характеристики шару та міцнісні властивості холодного литого асфальтобетону (ЛЕМС).

5. Були вивчені зміни групового складу бітумів шляхом введення епоксидних смол та ФЗВК. Введення та збільшення концентрації цих добавок призвело до зміни групового складу бітуму. Утворення надмолекулярних елементів у дисперсній фазі асфальту відбувалося шляхом агрегації реактивних груп епоксидної смоли та частинок золи з асфальтенами та утворення хімічних зв'язків.

6. Розрахунки енергії активації показують, що введення епоксидних смол китайського виробництва та золи-виносу ТЕС понад 2,0 і 3,0 % мас. відповідно утворює розширені надмолекулярні структури в асфальтових композитах, які утворюють ці добавки за рахунок агрегації. При введенні менших кількостей добавок така структура не утворюється, тому зола рівномірно розподіляється в

міжмолекулярному просторі в'язучого і зниження енергії забезпечує більш реакційноздатний композит.

7. При визначенні втрати маси плівки було встановлено, що нагрівання асфальту знижує втрату маси тонкого шару, тобто знижується поверхнєве випаровування низькокиплячих нафтових асфальтових компонентів, присутніх або утворюються в процесі старіння. Введення епоксидної смоли та золи-виносу теплових електростанцій китайського виробництва зменшувало втрату маси асфальту при нагріванні і, таким чином, знижувало його старіння. (продовження)

8. Встановлено, що введення добавок золи в склади асфальтів має більший вплив на поліпшення експлуатаційних властивостей асфальту, що зумовлено високим вмістом активних частинок у золі-виносі.

9. При визначенні основних деформаційних властивостей композиційних в'язучих на основі асфальту з використанням епоксидної смоли та волокон золи було встановлено, що проникнення голки в модифікований асфальт зменшується зі збільшенням вмісту добавки. Введення 2,0 % епоксидної смоли та 2,0 % волокон знижувало проникнення голки на 20 одиниць у високотемпературному діапазоні та збільшувало його при низьких температурах.

10. Встановлено, що з введенням добавок пластичний діапазон бітуму розширюється, що свідчить про зміну його макроструктури.

11. Експериментально та розрахунковим шляхом встановлено, що додавання епоксидної смоли та волокон золи збільшує роботу адгезії асфальту та посилює зчеплення асфальту з мінеральним матеріалом, що суттєво покращує властивості асфальтобетону.

5. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ З ВИЗНАЧЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЛИТОГО Й ЕПОКСИДНОГО АСФАЛЬТОБЕТОНУ З ДОДАВАННЯМ ВОЛОКОН ЛЕТЮЧОЇ ЗОЛИ

5.1 Експериментальне дослідження з визначення властивостей литого асфальтобетону з додаванням волокон летючої золи

У рамках цього дослідження використовували литий та холодний асфальтобетон із додаванням волокон летючої золи вугільних електростанцій, виготовлених у Китаї.

Для порівняння результатів були проведені паралельні випробування на звичайних зразках литого дрібнозернистого асфальтобетону без волокон.

Попередні результати свідчать про те, що введення волокон із летючої золи китайських вугільних електростанцій змінює технічні властивості та груповий склад асфальту, що має призвести до змін фізичних, механічних і експлуатаційних властивостей литого асфальтобетону, виготовленого як у гарячому, так і у холодному стані. Це твердження підтверджується результатами дослідження.

5.1.1 Підбір компонентів для литого асфальтобетону з ФЗВК

Відомо, що при введенні волокон до складу органічних в'язучих відбуваються хімічні взаємодії, які покращують технічні (деформаційні) властивості асфальту, його структуру та груповий склад. Вважається, що збільшення кількості асфальту та включення волокон у литий асфальтобетон поліпшить фізичні, механічні та експлуатаційні властивості литого асфальтобетону. [166]

Для визначення впливу волокон на зміни властивостей асфальтобетону були виготовлені прототипи щільного литого асфальтобетону. Склад прототипів підбирався відповідно до ДСТУ Б В.2.7-119. Частковий склад мінеральної фракції сумішей відповідав вимогам ДСТУ Б В.2.7-119.

Процес проектування складу асфальтобетонних сумішей можна розділити на два етапи. Етап I - визначення характеристик мінеральних матеріалів і бітуму та відповідність їхніх показників спеціальним вимогам, які визначаються у відповідних технічних документах. Етап II - визначення обґрунтованого співвідношення між вихідними компонентами для забезпечення виробництва асфальтобетону з

необхідними властивостями (Таблиці 5.1-5.3, Рисунок 5.1).

Відповідно до ДСТУ Б В.2.7-119, приготування асфальтобетонних сумішей проводилося на лабораторному змішувачі ЛС-АБ-10, а формування зразків асфальтобетону проводилося на пресі П-125т. Визначення міцнісних характеристик асфальтобетону проводилося відповідно до ДСТУ Б В.2.7-119.

Таблиця 5.1 - Гранулометричний склад асфальтобетонних сумішей

№	Назва матеріалу	щільність г/мм ³	Назва залишку, %	Зерновий склад (сито з отворами, мм), % за масою									
				20	15	10	5	2,5	1,2	0,63	0,31	0,16	0,07
										5	5		1
1	Щебінь гранітний фракції 5-20 мм	2,67	Ч.о.	8,88	37,2	27,02	24,0	1,22	-	-	-	-	-
					2		2						
			П.о	8,88	46,1	73,12	97,1	98,3	-	-	-	-	-
					0		4	6					
			П.п	91,1	53,9	26,88	2,86	1,64	-	-	-	-	-
					0								
2	Пісок від дроблення пісків	2,57	Ч.о.	-	-	-	7,60	25,0	14,9	14,7	13,3	14,5	5,32
								0	0	0	0	8	
			П.о	-	-	-	7,60	32,6	47,5	62,2	75,5	89,8	95,2
								0	0	0	0	8	0
			П.п	-	-	-	92,4	67,4	52,5	37,8	24,5	10,1	4,80
							0	0	0	0	0	2	
3	Неактивний мінеральний порошок МР-1	2,78	Ч.о.	-	-	-	-	-	-	1,54	6,11	7,82	12,0
													5
			П.о	-	-	-	-	-	-	1,54	7,65	15,4	27,5
												7	2
			П.п	-	-	-	-	-	-	98,4	92,3	84,5	72,4
										6	5	3	8

Таблиця 5.2 Вибір компонентів асфальтобетонної суміші

№	Назва матеріалів	Вміст суміші, %.	Масова частка, % мінеральних зерен дрібніше, мм										
			20	15	10	5	2,5	1,25	0,63	0,31	0,16	0,07	
											5		1
1	Щебінь гранітний	41	37,3	22,1	11,0	1,17	0,67	-	-	-	-	-	-
			6	0	2								

фракції 5- 20 мм												
2	Пісок з щебеню дроблення пісків	51	51,0	51,0	51,0	47,1	34,3	26,7	19,2	12,5	5,16	2,45
3	Неактивна міна. Порох МП-1	-	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	7,88	7,39	6,76	5,80
	Фактичний зерновий склад	100	96,3	81,1	70,0	56,2	43,0	34,7	27,1	19,8	11,9	8,25
	Вимоги	Мін	90	80	70	50	38	28	20	14	10	6
	ДСТУ Б В.2.7- 119	Макс	100	100	100	60	48	34	28	22	16	12

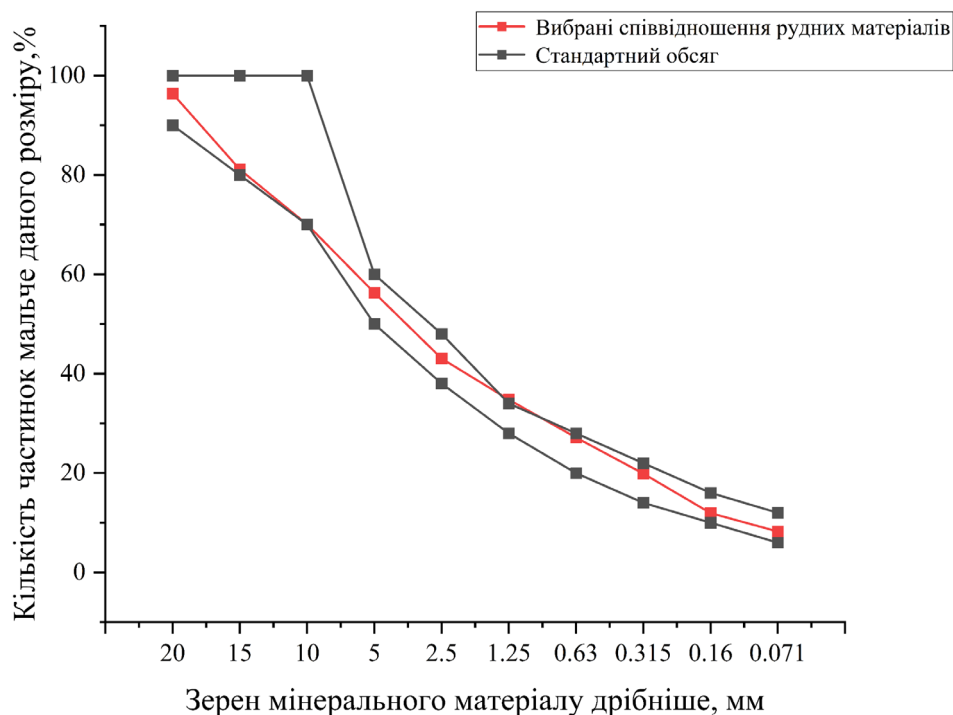


Рис. 5.1 - Карта гранулометричного складу мінеральної фракції

Таблиця 5.3 Розрахунковий підбір компонентів асфальтобетонної суміші

№	Назва матеріалів	Склад суміші (бітум)	
		понад 100 %)	(100% бітум)
1	Щебінь гранітний фр. 10-20 мм	29,98	28,34
2	Щебінь гранітний фракції 5-10 мм	13,73	12,98
3	Пісок від дроблення пісків	48,29	45,64

4	Інактивованій мінеральний порошок МР-1	4,00	3,78
5	Волокна з летючої золи теплових електростанцій, вироблені в Китаї	4,00	11,14
6	Бітум БНД 100/150	11,80	-

5.1.2 Визначення фізико-механічних властивостей модифікованого ЛЕМС

Для визначення фізико-механічних та гідрофізичних властивостей асфальтобетону на основі фіброволокна золи-виносу китайського виробництва для теплових електростанцій були використані стандартні методики. Характеристики міцності визначали на електромеханічних пресах ДТС 06-50-50 та універсальній машині Instron 6637.

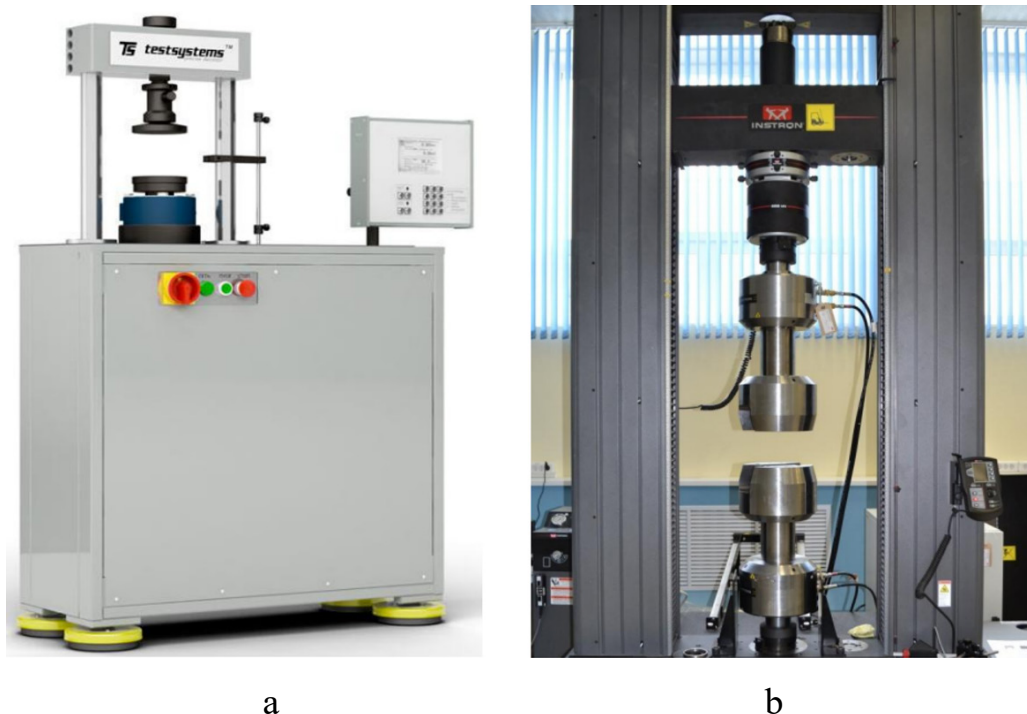


Рис. 5.2 - Обладнання для визначення міцності та деформаційних характеристик асфальтобетону:

"a"- прес ДТС 06-50-50.

"b" - універсальна машина Instron 6637 (США)

Результати випробувань зразків звичайного асфальтобетону та асфальтобетону з фіброволокном наведені в таблиці 5.4. Аналіз результатів дослідження показує, що армування асфальтобетону введенням волокон із золи-виносу ТЕС призводить до зміни складу та структури груп в'язучого, що, в свою чергу, викликає зміни властивостей асфальтобетону.

Таблиця 5.4 Фізико-механічні властивості асфальтобетону

Склад в'язучого, межа міцності на стиск	Традиційний склад	Склад з додаванням клітковини у кількості, %			
		1,0	2,0	3,0	4,0
При t=50°C, МПа	1,62	1,99	2,53	2,63	2,67
При t=20°C, МПа	3,31	4,42	5,27	5,16	4,40
При t=0°C, МПа	8,12	7,26	7,66	9,21	10,35
Коефіцієнт температурної чутливості, R_{50}/R_0	0,20	0,28	0,33	0,29	0,26
Коефіцієнт температурної чутливості, R_{50}/R_{20}	0,49	0,45	0,48	0,51	0,61
Водостійкість після тривалого насичення водою	0,94	0,92	0,91	0,91	0,90

Збільшення вмісту волокна до оптимального значення 4,0% від маси мінерального порошку призвело до збільшення міцності на 65% при 50°C порівняно зі звичайним складом. При зниженні температури випробувань до 20°C міцність в оптимальній області зросла на 33% порівняно зі звичайним складом. Подальша стабілізація збільшення міцності пояснюється збільшенням кількості елементів дисперсної фази бітуму та високою адсорбційною здатністю активних елементів золи-виносу, що містяться в композиціях, яка зменшує об'ємний склад плівкового бітуму в композиціях.

Формований асфальтобетон, що містить волокна, має нижчу температурну чутливість. Коефіцієнт температурної чутливості визначається як відношення міцності асфальтобетону на стиск при 50°C до того ж показника при 0°C.

$$K = \frac{R_{50}}{R_0} \quad (5.1)$$

При оптимальному вмісті фібри він збільшився в середньому в 1,3-1,65 рази, що призвело до прогнозованого підвищення теплостійкості та тріщиностійкості гарячого литого асфальтобетону (рис. 5.3).

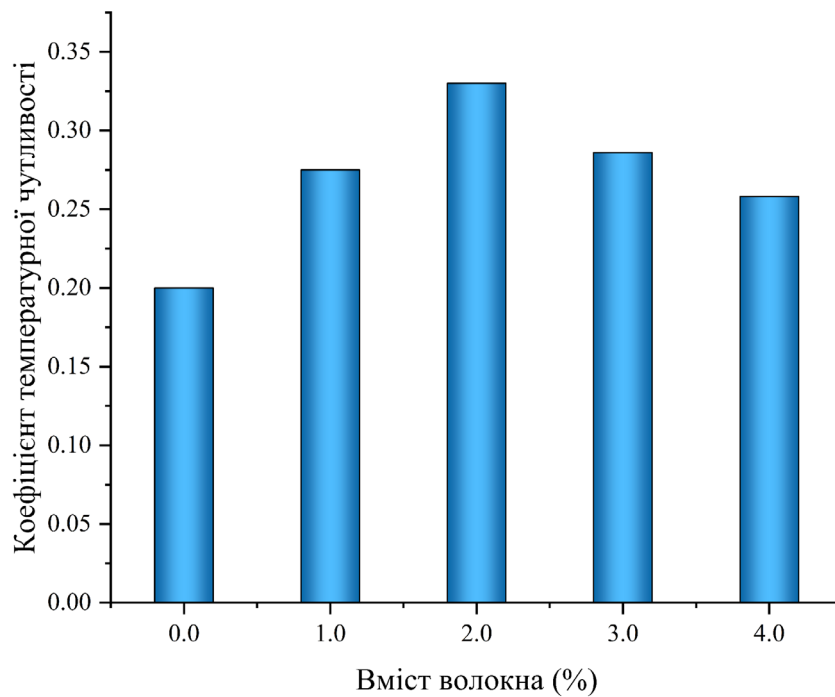


Рис. 5.3 - Коефіцієнти температурної чутливості для різної кількості волокон.

Встановлено, що коефіцієнт температурної чутливості збільшується за умови введення оптимальної кількості нанодобавок. Введення волокон сильніше сприяло зростанню коефіцієнта температурної чутливості завдяки вищій концентрації фулеренів у добавці.

Результати розрахунків коефіцієнту температурної чутливості також корелюють зі значеннями діапазону пластичності модифікованого асфальту з додаванням волокон до суміші. Це пов'язано з тим, що кількість асфальту в об'ємному стані зменшується, а його перехід до структурованого стану є повнішим, тому асфальтобетон залишатиметься еластопластичним у більшому температурному діапазоні, менше розтріскуватиметься та витримуватиме вищі напруження. Кількість змінних коливань температури повітря також збільшується.

Властивості зсуву асфальтобетону характеризуються стійкістю до утворення хвиль, просідань, колій та інших деформацій зсуву. Отримані дані показали, що міцність на зсув асфальтобетону зростає при використанні армованого волокнами летючої золи асфальту, виготовленого в Китаї, у порівнянні зі звичайним асфальтобетоном. Це пов'язано зі збільшенням сили зчеплення та підвищенням в'язкості структурованого асфальту. Все це сприятиме створенню асфальтобетонних покриттів з більш високою міцністю та стійкістю до зсуву.

Здатність опиратися руйнуванню спочатку реалізується сформованим агрегатом, який складається з реактивних частинок летючої золи та асфальтобетону. При зростанні граничного навантаження зусилля починає передаватися до легкорухомих молекул мартенситної фракції. У цей момент дисперсний агрегат починає рухатися через мартенситні кластери, що призводить до деформації зразка асфальтобетону.

Результати аналізу показали, що при введенні оптимальної кількості волокон летючої золи ТЕС, міцнісні властивості при 20°C і 50°C у складі асфальтобетону підвищуються, але не впливають суттєво на міцнісні властивості при 0°C.

Через це, деформації стиснення при максимальних навантаженнях визначалися на універсальному випробувальному стенді Instron 6637 (США) (Таблиця 5.5).

Таблиця 5.5 - Деформація литого асфальтобетону при низькотемпературному максимальному навантаженні стиснення, отримана на приладі Instron 6637 (США).

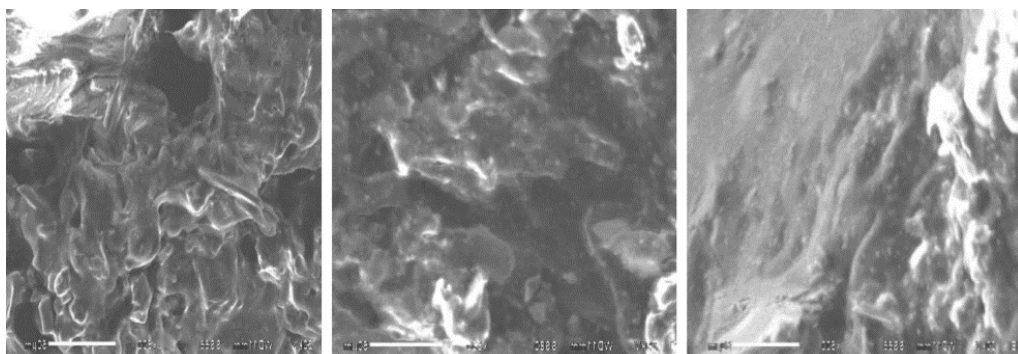
Склад в'язучого для асфальтобетону	Переміщення при максимальному навантаженні, при температурах, мм		
	-5° С	0° С	5° С
БНД 100/150	0,750	0,734	0,728
Волокна з летючої золи			
1,0 мас, %	1,022	0,812	0,789
2,0 мас, %	1,025	0,983	0,774
3,0 мас, %	0,712	0,914	0,766
4,0 мас, %	0,892	0,861	0,720

Аналіз даних у таблиці 5.5 показує, що введення волокон летючої золи з ТЕС позитивно впливає на стійкість асфальтобетону до деформаційних навантажень за низьких температур. Введення волокон летючої золи до складу асфальтобетону призвело до збільшення деформації при -5°C в середньому на 30% у порівнянні зі звичайним асфальтобетоном. Збільшення деформації стиснення за низьких температур дозволяє зробити висновок, що литий асфальтобетон має більш пластичні властивості взимку, що зменшує ймовірність розтріскування покриття. Це позитивно вплине на довговічність цього типу асфальтобетонного шару дорожнього покриття.

Під час експлуатації асфальтобетон піддається динамічним навантаженням, а також погодним і кліматичним факторам, що призводять до розриву

міжмолекулярних зв'язків у в'язучому та розвитку мікротріщин і дислокацій у структурі матеріалу. При контакті з водою та коли температура перетинає нульову позначку, асфальтобетон руйнується через ефект розклинювання води під час кристалізації. Наявність цього внутрішнього напруження та навантаження від рухомого транспорту може призвести до передчасного руйнування композиту.

Структура литого асфальтобетону із застосуванням структурованого асфальту з волокнами летючої золи з ТЕС, виробленої в Китаї, стала більш щільною (Рисунок 5.4). Це призвело до меншої швидкості проникнення води через композитну асфальтову мембрану до межі розділу між в'язучим і поверхнею мінерального матеріалу порівняно з литим асфальтобетоном без волокон. Покращення водостійкості асфальтобетону за рахунок використання волокон, виготовлених із летючої золи та асфальту з ТЕС у Китаї, сприяє довговічності дорожнього покриття.



Традиційний асфальтобетон БНД 100/150+1,0 мас. ч. фібри БНД 100/150+4,0 мас. ч. фібри

Рис. 5.4 Структура поверхні асфальтобетону після тривалого насичення водою

Аналіз змін основних механічних і деформаційних властивостей асфальтобетону показує, що введення волокон із летючої золи вітчизняних ТЕС і подальше виробництво на цій основі асфальтобетону позитивно вплинуло на покращення цих властивостей.

Було продемонстровано, що введення волокон із летючої золи ТЕС, виробленої в Китаї, значно покращує експлуатаційні характеристики асфальтобетону в усьому діапазоні температур.

5.1.3 Підбір компонентів холоднолитого асфальтобетону з ФЗВК

5.1.3.1 Приготування та визначення фізико-технічних параметрів емульсій

Для приготування асфальтових емульсій був використаний окислений в'язкий дорожній асфальт марки БНД 50/70 ТОВ "Мойрський НПЗ" (Білорусь), який

відповідає вимогам ДСТУ 4044-2001. Були розроблені наступні склади асфальтових емульсій (Таблиця 5.6) та визначені фізико-технічні параметри емульсій (Таблиця 5.7).

Таблиця 5.6 - Холоднолитий асфальтобетон з асфальтобетонними емульсіями

Компоненти емульсії	Номер рецепту, мас.%	
	1	2
Бітум БНД 50/70	62	62
Емульгатор Redicote 404	1,1	1,1
Емульгатор Redicote 540	0,25	-
Емульгатор Redicote 505	-	0,25
Соляна кислота у водній фазі до рівня рН	1,5	1,5
Вода	До 100	До 100

Таблиця 5.7 Фізико-технічні властивості емульсій

Назва показника	Вимоги ЄКП - 60	Рецепти емульсій	
		1	2
Зовнішній вигляд	Однорідна темно-коричнева рідина	Актуально	
Показник концентрації водних іонів, рН	1,5-6,5	2,13	2,14
Однорідність (залишок на ситі № 0,14), % не більше	0,25	0,03	0,03
Залишковий вміст в'язучого, %.	58-62	61,22	61,21
Умовна в'язкість при температурі 20°C на апараті з діаметром витікання 4 мм, с	5-25	9,0	9,2
Стабільність при зберіганні через 7 днів: залишок на ситі № 0,014%, не більше	0,3	0,09	0,09
Зчеплення залишкового в'язучого з поверхнею щебеню, бали, не менше	5,0	5,0	5,0
Змішування зі змішаними зерновими сумішами:			
Пористого	Да	Да	Да
Щільного	Да	Да	Да

Введення рідких емульгаторів Redicote 505 та Redicote 540 від Akzo Nobel (Швеція) до складу емульсій дозволило збільшити швидкість, з якою формуються структури ТП з ЛЕМС. Були проведені дослідження для визначення складу асфальтових емульсій. Встановлено, що склади асфальтових емульсій відносяться

до марки ЕКП-60 (катіонні немодифіковані повільного розпаду) та відповідають ДСТУ Б В.2.7-129:2014.

5.1.3.2 Випробування щебеню для ЛЭМС

5.1.3.2.1 Визначення адсорбції метиленового синього

При підборі щебеню для холодного литого асфальтобетону було обрано щебінь та відсів щебеню наступних виробників: Малинський кар'єр (Житомирська область), ТОВ "Полонський спецкар'єр" (Хмельницька область). На першому етапі визначали загальну поверхневу активність щебеню (фракція менше 0,071 мм) у метиленовому синьому (Табл. 5.8).

Таблиця 5.8 - Визначення адсорбції метиленового синього

Кам'яний матеріал	Фактичні дані, мл	Вимоги СОУ 42.1-37641918-119:2014
Малинський кар'єр	13	Від 5 мл до 10 мл
ТОВ "Полонський спецкар'єр"	11	

Показники метиленового синього для обох каменів перевищували вимоги чинної норми СОУ 42.1-37641918-119:2014 (5-10 мл)[169]. У подальшому дослідженні було використано камінь з ТОВ "Полонський спецкар'єр", який мав нижчу "реакційну здатність".

5.1.3.2.2 Визначення відповідності гранулометричного складу каменю типу ЛЕМС

Визначення відповідності зернового складу кам'яного матеріалу ТОВ "Полонський спецкар'єр" проводили для трьох типів ЛЕМС згідно з тренуванням СОУ 42.1-37641918-119:2014. Грансклад використаного щебеню (щебенева суміш 0-15 мм) найбільш близький до граничних меж третього типу ЛЕМС (рис. 4.5).

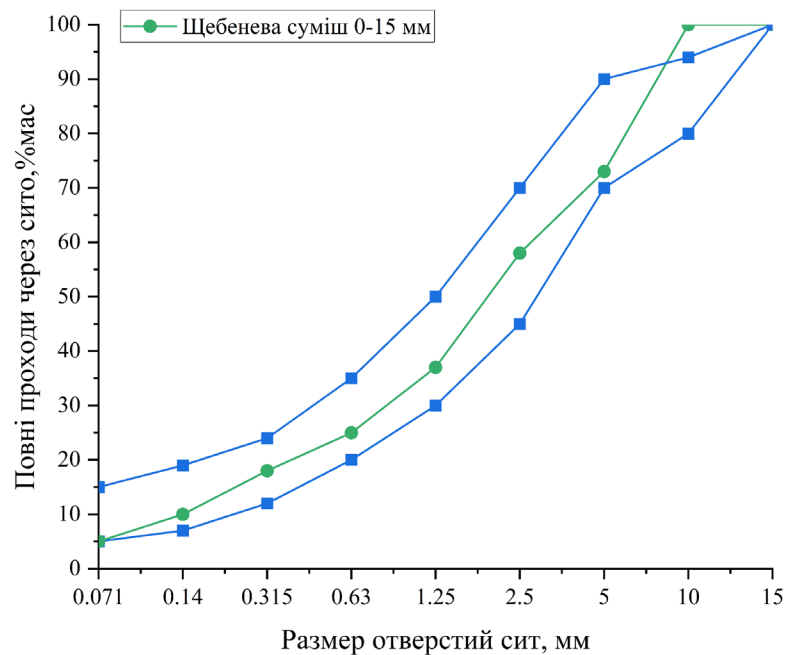


Рис. 5.5 Граничні криві відповідно до СОУ 42.1-37641918-119:2014 для ЛЕМС

5.1.3.3 Проектування компонентів ЛЕМС відповідно до критеріїв загасання

Всі вихідні компоненти були дозовані у відсотках від маси каменю. Після введення всіх необхідних компонентів в суміш, включався секундомір і суміш перемішувалася. Перемішування продовжували до тих пір, поки суміш не втрачала плинність і перемішування не припинялося, після чого секундомір зупиняли і фіксували час розпаду.

Для проектування складу суміші використовували дві розроблені рецептури асфальтобетонної емульсії та гравійну суміш ТОВ "Полонський спецкар'єр", а також портландцемент ПЦ ІІ/А-Ш-400, питну воду в якості кондиціонуючої добавки (загущувача), 10% розчин емульгатора Redicote E-11 та розчин сульфату алюмінію (вищого сорту), в якості структурних добавок використовували волокна з золи-виносу теплових електростанцій виробництва Китай.

В результаті оптимізації складу за критерієм дезінтеграції (час розпаду суміші не раніше 120 секунд) було визначено оптимальний склад двох досліджуваних емульсій (табл. 5.9 і 5.10). У табл. 5.9 і 5.10: ПКМ (ПКМ) - це початок набору когезійної міцності (агломерації), Р - час розпаду, БЕ - бітумна емульсія, А - сульфат алюмінію $Al_2(SO_4)_3$ (А1 - перший сорт, АВ - вищий сорт), Е - 10% водний розчин емульгатора Redicote E-11.

Таблиця 5.9 - Ефект розкладання холодно литого асфальтобетону з різними добавками на основі асфальтобетонної емульсії "R540"

№	Компоненти					P \geq 120 s (тип 3)	ПКМ, s
	Цемент	Водаг	Добавки (Е/А)	Волокно	БЕ R 540		
T=22° C							
1	1,0	10	-	4,0	14	-	-
2	1,0	10	0,5 E	4,0	14	0:46	0:59
3	1,0	10	0,75 E	4,0	14	1:34	1:45
4	1,0	10	0,85 E	4,0	14	3:00	3:24
5	1,0	10	1,0 E	4,0	14	>4:00	>5:00
6	1,0	10	0,75 A1	4,0	14	2:00	2:15
7	1,0	10	0,85 A1	4,0	14	2:52	3:01
8	1,0	10	1,05 A1	4,0	14	>4:00	>5:00
9	1,0	10	1,25 A1	4,0	14	>4:00	>5:00
T=19° C							
1	1,0	10	0,5 A1	4,0	14	> 4:0	>5:0
2	1,0	10	0,3 A1	4,0	14	2:50	3:15
3	1,0	10	0,3 E	4,0	14	2:25	2:40
4	1,0	10	0,3 AB	4,0	14	>4:0	>5:00
5	1,0	10	0,15 AB	4,0	14	2:15	2:35

На рисунку 4.6 наведено порівняння складу ЛЕМС за критерієм затухання при включенні водних розчинів Redicote E-11 та $Al_2(SO_4)_3$ на асфальтобетонній емульсії 1 "R 540". Аналізуючи таблицю 4.5 та рисунок 4.6, ми визначили, що $Al_2(SO_4)_3$, як у вищому, так і в першому класі, може виступати ефективним сповільнювачем розпаду. Його дія подібна до дії 10% водного розчину емульгатора Redicote E-11, оскільки зі збільшенням його вмісту розкладання ЛЕМС продовжується. При використанні найвищого сорту $Al_2(SO_4)_3$ можна зменшити його вміст у суміші порівняно зі звичайними добавками для досягнення оптимального часу розкладання. Волокна летючої золи теплових електростанцій, вироблені в Китаї, поєднуються з вищим і першим сортом $Al_2(SO_4)_3$.

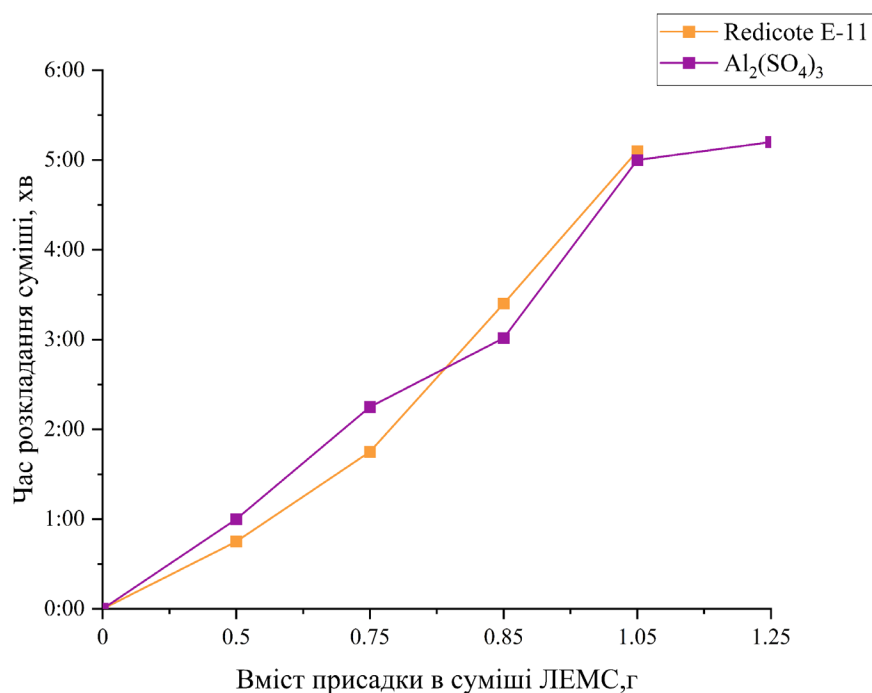


Рисунок 5.6 Порівняння затухання ЛЕМС з добавками Redicote E-11 та водними розчинами Al₂(SO₄)₃ на основі асфальтобетонної емульсії "R540".

Таблиця 5.10 - Ефект розкладання ЛЕМС з різними добавками на основі асфальтобетонної емульсії "R505"

№	Компоненти					P _{≥120} s (тип 3)	ПКМ, с
	Цемент	Вода	Добавки (E/A)	Волокно	BE R 505		
T=22° C							
1	1,0	10	-	4,0	14	-	-
2	1,0	10	0,5 E	4,0	14	0:46	0:59
3	1,0	10	0,75 E	4,0	14	1:34	1:45
4	1,0	10	0,85 E	4,0	14	3:10	3:34
5	1,0	10	1,0 E	4,0	14	>4:00	>5:00
6	1,0	10	0,75 A1	4,0	14	2:10	2:25
7	1,0	10	0,85 A1	4,0	14	2:57	3:09
8	1,0	10	1,05 A1	4,0	14	>4:00	>5:00
9	1,0	10	1,25 A1	4,0	14	>4:00	>5:00
T=19° C							
1	1,0	10	0,5 A1	4,0	14	>4:00	>5:00
2	1,0	10	0,3 A1	4,0	14	2:57	3:25
3	1,0	10	0,3 E	4,0	14	2:35	2:50

4	1,0	10	0,3 АВ	4,0	14	>4:00	>5:00
5	1,0	10	0,15 АВ	4,0	14	2:25	2:45

На рисунку 5.7 показано порівняння складу ЛЕМС, що містить Redicote E-11 та водний розчин $Al_2(SO_4)_3$ на асфальтобетонній емульсії 2. "R 505" відповідно до критеріїв розкладання.

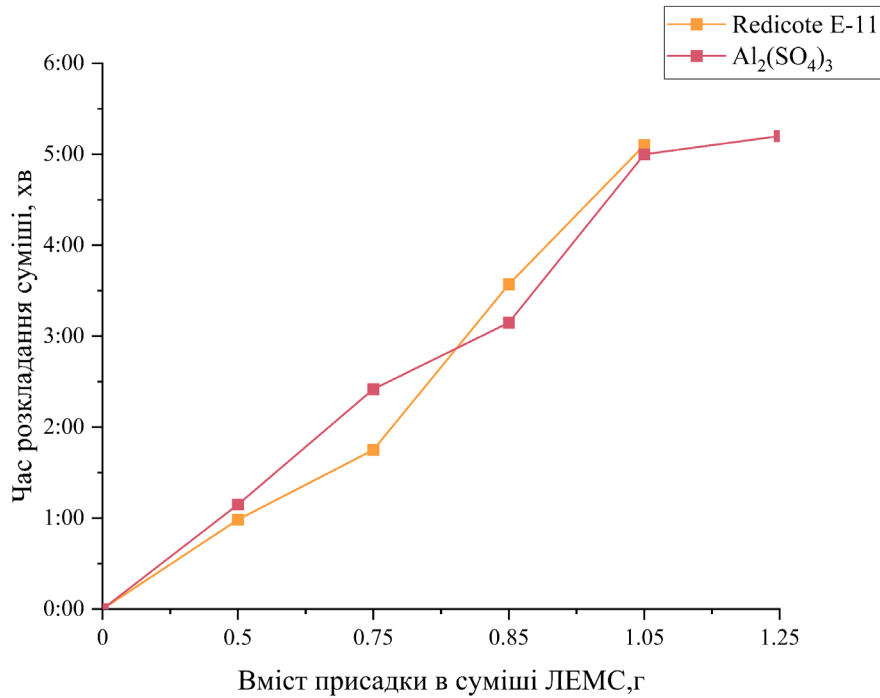


Рисунок 5.7 Порівняння затухання холодно литого асфальтобетону з добавками Redicote E-11 та водними розчинами $Al_2(SO_4)_3$ на основі асфальтобетонної емульсії "R505".

Динаміка розпаду ЛЕМС асфальтобетонної емульсії № 2 "R 505" (табл. 9. Рис. 13) подібна до динаміки розпаду асфальтобетонної емульсії № 1 "R 540", але у випадку сумішей волокон золи вугільних ТЕС використання емульгатора Redicote 505 дещо подовжує час розпаду сумішей у порівнянні з Redicote 540.

5.1.3.4 Визначення часу тверднення ЛЕМС з ТП

Визначення часу (швидкості) тверднення ЛЕМС з ТП проводили шляхом формування відповідних зразків згідно з українськими стандартами та правилами ISSA (International Slurry Surfacing Association) і європейськими стандартами. сумішей та випробування їх через певні проміжки часу з використанням модифікованого пристрою для склеювання. Процес підготовки зразків та визначення термінів твердіння холодно литого асфальтобетону показано на рисунку 5.8.

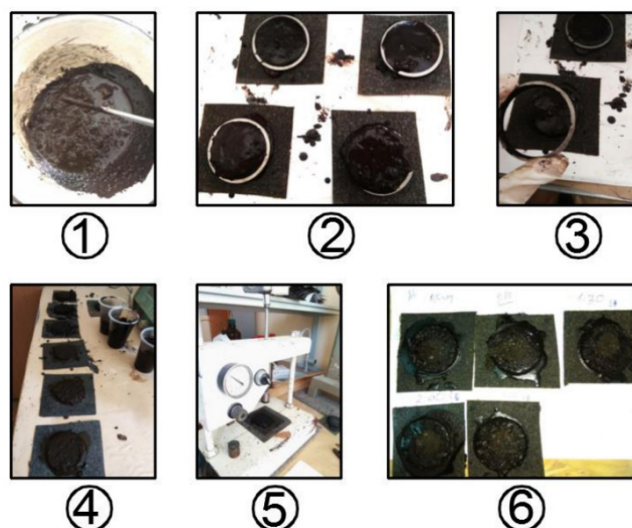


Рисунок 5.8 Процедура визначення часу тужавіння литого асфальтобетону з ТП: 1 - перемішування суміші необхідних компонентів протягом 30-40 секунд; 2 - заповнення форми сумішшю та її ущільнення вручну; 3 - виймання зразка з форми; 4 - група міцності когезії (час випробування); 5 - випробування зразка на когезійному тесті

Випробування проводили при температурі повітря $t = 19^{\circ}\text{C}$ і відносній вологості повітря $\varphi = 75\%$. Вміст компонентів відносно маси каменю становив: у всіх випадках модифікатор розпаду 0,3% мас, цемент 1,0% мас, вода 10,0% мас, асфальтобетонна емульсія 14,0% мас, волокна з золи-виносу ТЕС - 4,0 мас%. Результати визначення швидкості утворення шару зносу ЛЕМС для двох оптимальних складів за критерієм розкладання суміші наведені в табл. 5.11.

Час відкриття руху для обмеження швидкості до 40 км/год також може становити від 1,5 до 2,0 годин при використанні 10% розчину Redicote E-11, порівняно з 4,5 годинами без обмеження швидкості. Ці залежності зберігаються як для асфальтобетонної емульсії №1 з емульгатором Redicote 540, так і для асфальтобетонної емульсії №2 з емульгатором Redicote 505.

Таблиця 5.11 - Швидкість утворення шару зносу ЛЕМС

Склад асфальтобетонних емульсій	Час тестування, години	Характер пошкоджень	Прикладений крутний момент, кг*см
З додаванням Redicote 540	0,5	N	12
	1,0	N	13

	2,0	NS	20
	2,5	NS	20
	3,0	S	23
	4,5	SS	26
	0,5	N	12
З додаванням	1,0	N	13
Redicote 540	1,5	S	23
Al ₂ (SO ₄) ₃	2,0	S	23
Фібри 1,0%	2,5	S	24
	3,0	SS	26
З додаванням	0,5	N	12
Redicote 540	1,0	N	13
Al ₂ (SO ₄) ₃	1,5	NS	20
Фібри 4,0 %	2,0	S	23
	2,5	S	24
	3,0	SS	26
З додаванням	0,5	N	12
Redicote 505	1,0	N	13
	2,0	NS	20
	2,5	NS	20
	3,0	S	23
	4,5	SS	26
	0,5	N	12
З додаванням	1,0	N	13
Redicote 505	1,5	NS	20
Al ₂ (SO ₄) ₃	2,0	S	23
Фібри 1,0 %	2,5	S	24
	3,0	SS	26
З додаванням	0,5	N	12
Redicote 505	1,0	N	13
Al ₂ (SO ₄) ₃	1,5	NS	20
Фібри 4,0%	2,0	S	23
	2,5	S	24
	3,0	SS	26

Аналізуючи табл. 5.11, ми визначили, що вищий та перший клас $Al_2(SO_4)_3$, який використовується як добавка до сумішей волокон із золи-виносу ТЕС, не тільки контролює розкладання сумішей, але й покращує утворення ТП, а також сприяє підвищенню їх міцності. Середнє збільшення когезії на 1,5 години спостерігалось на основі того ж складу, що і у суміші Redicote E-11, 10% розчину $Al_2(SO_4)_3$ та ФЗВК. Використання $Al_2(SO_4)_3$ та волокон з летючої золи ТЕС дозволило відкрити рух зі швидкістю до 40 км/год через 1 годину - 1,5 години, без обмеження швидкості протягом 3 годин.

5.1.4 Визначення втрати маси при зношуванні мокрих абразивів

Для визначення ВМВІ було взято склади ЛЕМС із присадками $Al_2(SO_4)_3$ першого сорту і Redicote E-11 та фіброю із золи-виносу теплових електростанцій (табл. 5.12).

Таблиця 5.12 - ВМВІ складів ЛЕМС

ЛЕМС склад	ВМВІ, г/м ²	Вимоги СОУ 42.1-37641918-119:2014
BE Redicote 505 (10% E-11)	1066	Не більше 530 г/м ²
BERedicote 540 (10 % E-11)	1012	
BE Redicote 505 $Al_2(SO_4)_3$	528	
BE Redicote 540 $Al_2(SO_4)_3$	525	

Застосування $Al_2(SO_4)_3$ у суміші з волокнами як добавки знижує показники ВМВІ до нормативних величин, що дозволяє стверджувати, що холодно литі асфальтобетони, які містять цю добавку, характеризуються кращою стійкістю сумішей до стирання у присутності води. Це свідчить про те, що такі суміші мають кращі адгезійні та когезійні властивості. Це співвідношення було зменшено приблизно на 50% у порівнянні з використанням звичайних добавок. Таким чином, застосування волокон із летючої золи ТЕС підвищило стійкість до деформації та міцність покриття.

Слід враховувати, що для застосування у холоднолитих асфальтобетонах випробовувалася нетрадиційна добавка $Al_2(SO_4)_3$ з додаванням ФЗВК, вироблених у Китаї. Крім того, така добавка є більш економічно вигідною за традиційні аналоги. Оскільки $Al_2(SO_4)_3$ є продуктом вітчизняного виробництва, а волокна

виготовляються з відходів ТЕС, його використання призводить до зниження ціни та високої окупності, що значно скоротить витрати на виробництво холодно литого асфальтобетону ТП. Звісно, цей варіант також характеризується беззаперечною перевагою в технологічній ефективності над зарубіжними аналогами.

5.2 Експериментальне дослідження з визначення властивостей епоксидного асфальтобетону з додаванням ФЗВК

5.2.1 Дослідження фізико-механічних властивостей вибраних складів епоксидно-волокнистого асфальтобетону

Склад обраних асфальтобетонних сумішей наведено у таблиці 5.13.

Таблиця 5.13 - Окремі компоненти асфальтобетонних сумішей

Інгредієнти суміші	Кількість, %				
	Початковий асфальтобетон 1	Епокси-асфальт з CHS-ЕРОХУ 525	Початковий асфальтобетон 2	Епокси-асфальт з ЕРОХУ "Композит"	Епоксидно-поліуретановий асфальтобетон
Щебінь 5-10, %	34	34	40	40	40
Механізований пісок 0-5, %	60	60	53	53	53
Мінеральний порошок, %	6	6	7	7	7
Бітум, %	7	5,25	6	4,71	4,8
Епоксидна смола, %	-	1,4	-	1,16	-
Епоксидний поліуретан, %	-	-	-	-	0,8
Затверджувач, %	-	0,35	-	0,13	0,4
Волокна з летючої золи вугільних електростанцій, вироблені в Китаї	-	4,0	-	4,0	4,0

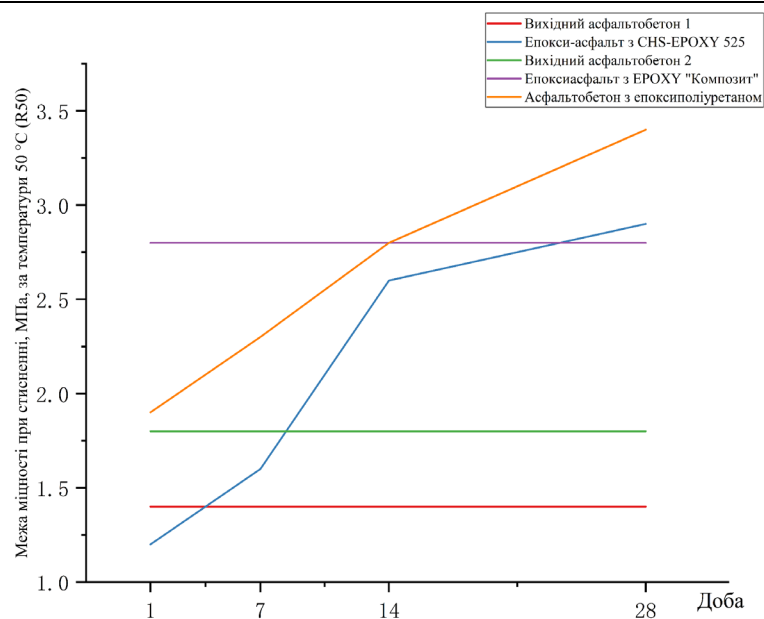
Композиції, що містять епоксиполіуретани, розширюють діапазон застосування епоксидних смол і полімерів на їх основі при приготуванні асфальтобетону.

Результати випробувань асфальтобетону з епоксидної фібри наведені в таблиці 5.14 та на рисунку 5.9.

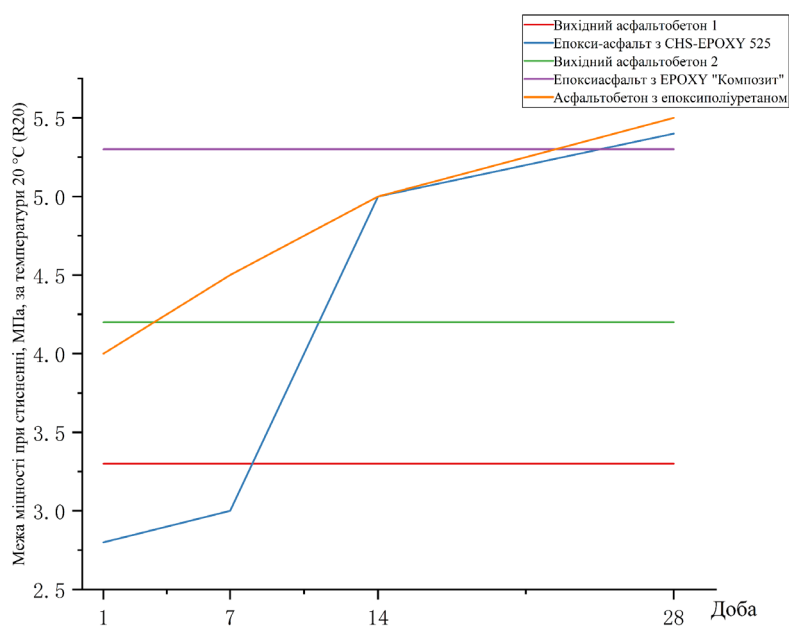
Таблиця 5.14 Результати випробувань епоксидного асфальтобетону

Назва норми		Значення					
		Стандарт ДСТУ Б В.2.7-119	Початковий асфальтобетон 1	Епокси-асфальт з СНS-ЕРОХ У 525	Початковий асфальтобетон 2	Епокси-асфальт ЕРОХУ "Композит"	Епоксидно-поліуретановий асфальтобетон
Пористість мінерального скелету.		15-18	15	15	18	18	18
Об'ємний відсоток		2-4	2	2	4	4	4
Залишкові домішки, % об'ємних		1,0-2,5 Не більше 0,5	1,0	1,2	1,7	2,4	2,5
Межа міцності на стиск, мпа, температура:							
0° С	1 день	Не більше, ніж 12	8	-	8	-	-
	14 день	Не більше, ніж 12	8	-	8	-	-
	28 день	Не більше, ніж 12	8	9	8	9	8
20° С	1 день	Принаймні 2,5	3,3	2,8	4,2	5,3	4,0
	7 день	Принаймні 2,5	3,3	3,0	4,2	5,3	4,5
	14 день	Принаймні 2,5	3,3	5,0	4,2	5,3	5,0
	28 день	Принаймні 2,5	3,3	5,4	4,2	5,3	5,5

50° C	1	Принай	1,4	1,2	1,8	2,8	1,9
	день	мні 1,2					
	7	Принай	1,4	1,6	1,8	2,8	2,3
	день	мні 1,2					
	14	Принай	1,4	2,6	1,8	2,8	2,8
	день	мні 1,2					
28	Принай	1,4	2,9	1,8	2,8	3,4	
день	мні 1,2						



Межа міцності на стиск при 20 °C, МПа (R20)



Межа міцності на стиск при 50 °C, МПа (R50)

Рис. 5.9 - Міцність зразків у залежності від часу старіння при 20 і 50 °C.

Згідно з таблицею 5.13, показники пористості, водонасичення, набухання та міцності епоксидного асфальту при 0°C такі ж, як і у вихідного асфальтобетону, що відповідає вимогам ДСТУ Б В.2.7-119.

Формований епоксидно-волокнистий асфальтобетон, до складу якого входив тільки CHS-EPOXY 525, показав нижчі на стиск міцності, ніж вихідний асфальтобетон при 20 °C (R20) і 50 °C (R50) (на 0,5 і 0,2 МПа відповідно). Міцність зразків епоксидно-волокнистого асфальтобетону збільшувалася зі збільшенням часу твердіння. Значне збільшення міцності спостерігалось в період між 7 і 14 днями витримування. Через 28 днів міцність епоксидно-волокнистого асфальтобетону склала 5,4 МПа при 20 °C, у той час як у вихідного асфальтобетону - 3,3 МПа. Для температури 50°C ці показники були 2,9 МПа та 1,4 МПа відповідно. Таким чином, зростання міцності при 20 °C склало 64%, а при 50 °C - у два рази.

Епоксидно-волокнистий асфальтобетон на епоксидному «композиті» вже через добу після формування має більш високі показники, ніж вихідний асфальтобетон 2: при температурі 20 °C зростання складає 1,1 МПа або 26%, а при температурі 50 °C - 1 МПа або 55%. Ці властивості збереглися незмінними через 28 днів, що свідчить про достатньо швидке формування структури епоксидно-волокнистого асфальтобетону, яке завершується за одну добу.

У асфальтобетону з додаванням епоксиполіуретану та волокон із летючої золи китайських ТЕС спостерігається тенденція до нарощування міцності з часом.

Після першої доби міцності епоксидного асфальту і вихідного асфальтобетону 2 практично не відрізнялися і склали 4 та 4,2 МПа відповідно при 20°C та 1,9 та 1,8 МПа відповідно при 50°C. Після 14 діб показник міцності епоксидного асфальту збільшився до 5 МПа при 20°C та 2,8 МПа при 50°C. Тобто, у порівнянні з вихідним асфальтобетоном 2, міцнісні показники епоксидного асфальту при 20°C зросли на 20%, а при 50 °C міцність зросла на 55%.

5.2.2 Визначення температурної чутливості епоксидно-волокнистого асфальтобетону

Важливою властивістю асфальтобетону є його здатність зберігати міцність при підвищенні температури, яку можна охарактеризувати коефіцієнтом температурної

чутливості. Тут для відображення температурної чутливості асфальтобетону використовується відношення міцності на стиск при 50 ° С до міцності на стиск при 20 ° С. Коефіцієнт температурної чутливості визначається за таким рівнянням:

$$R_T = \frac{R_{50}}{R_{20}} \quad (5.2)$$

де R_{50} - міцність на стиск при 50°C, МПа

R_{20} - міцність на стиск при 20°C, МПа.

Коефіцієнти температурної чутливості для вихідного асфальтобетону та асфальтобетону з епоксидної фібри наведені в таблиці 5.14.

Таблиця 5.15 Коефіцієнт температурної чутливості

Коефіцієнт температурної чутливості				
Початковий асфальтобетон 1	Епокси-асфальт з СНS-ЕРОХУ 525	Початковий асфальтобетон 2	Епокси-асфальт з ЕРОХУ "Композит"	Епоксидно-поліуретановий асфальтобетон
0,42	0,54	0,43	0,53	0,62

Коефіцієнт температурної чутливості вихідного асфальтобетону становив 0,42-0,43. З введенням СНS-ЕРОХУ 525 та епоксидних "композитів" він збільшився - до 0,53-0,54 або на 23-28%.

Введення епоксидних поліуретанів дозволило досягти ще більших результатів. У цьому випадку коефіцієнт температурної чутливості збільшився до 0,62 або 44%.

Для асфальтобетону з епоксидними волокнами та сирого асфальтобетону було визначено коефіцієнт внутрішнього тертя $\text{tg}\varphi$ та лабораторний показник зчеплення при зсуві Сл асфальтобетону. Результати випробувань наведені в таблиці 5.15.

Таблиця 5.16 Коефіцієнт внутрішнього тертя

Назва індикатора	Норми	Значення		
		Оригінальний бітумний бетон	Епоксидно-волокнистий асфальт з епоксидною смолою "Композит"	Асфальтобетон з епоксиполіуретаном та фіброю
$\text{Tg}\varphi$	Не нормується	0,94	0,92	0,92

Сл	Не нормується	0,41	0,46	0,54
----	---------------	------	------	------

Випробування показали, що при введенні до складу асфальтобетонних сумішей епоксидних “Композит” або епоксидно-поліуретану з волокнами (летюча зола від ТЕС) t_{gf} практично не змінюється, а Сл зростає на 12% і 35% відповідно.

5.2.3 Дослідження властивостей зсуву та оптимального вмісту модифікатора для епоксидно-волокнистого асфальтобетону

Стійкість асфальтобетону до зсуву має велике значення при будівництві та експлуатації автомобільних доріг. Ця властивість характеризує здатність асфальтобетону чинити опір силам зсуву (силам, що викликають ковзання шарів матеріалу один щодо одного). Важливість стійкості до зсуву можна розглядати з декількох сторін: Витримування транспортного навантаження: дорожні покриття мають сприймати повторний тиск коліс від транспортних засобів, і цей тиск створює напруження зсуву всередині шару асфальту. Хороша стійкість до зсуву означає, що асфальтобетон може ефективно витримувати та розподіляти ці напруження, зменшуючи пошкодження дороги; Запобігання деформації дорожнього покриття: при високих температурах або під впливом великого транспортного навантаження асфальтобетон може пластично деформуватися (утворювати колії). Вища міцність на зсув допомагає запобігти таким деформаціям і підтримує рівність дорожнього покриття; Запобігання тріщинам: надмірна концентрація тиску зсуву може призвести до появи тріщин в асфальтобетоні. Підвищивши стійкість до зсуву, можна зменшити виникнення тріщин та продовжити термін служби дороги; Довговічність та витрати на обслуговування: краще протистояння навантаженням на зсув покращує загальну довговічність асфальтобетону та зменшує потребу в технічному обслуговуванні чи ремонті дороги, що знижує загальні експлуатаційні витрати; Посилення безпеки: покриття дороги з хорошою стійкістю до зсуву забезпечують більш стабільні та безпечні умови водіння, особливо на слизьких поверхнях чи крутих схилах. Стійкість асфальтобетону до зсуву має вирішальне значення для забезпечення функціональності, довговічності та безпеки доріг. При проектуванні та будівництві доріг необхідно обирати відповідний тип та пропорції асфальтової суміші, а також

доцільні методи укладання та ущільнення для забезпечення належної стійкості до зсуву.

У зв'язку з введенням ФЗВК для підвищення міцності та термостійкості асфальтобетону було досліджено його вплив на опір колісутворенню покриттів в умовах високих літніх температур.

Програма тестування показана на малюнку 5.10.

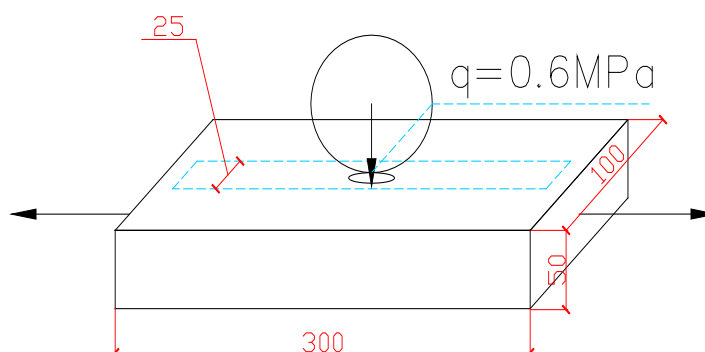


Рис. 5.10 - Програма випробувань на утворення колії

Сирий асфальтобетон випробовували через 1 добу при температурі 45°C, а асфальтобетон з епоксидними волокнами - через 14, 28, 36 і 42 доби. Зразки зберігалися при температурі 20°C. Розміри зразків становили 300 x 100 x 50 мм. Діаметр колеса - 120 ± 5 мм, ширина колісної бази - 25 ± 5 мм. Довжина гусениці - 250 мм. Навантаження - 0,6 МПа. Результати фіксували після 1; 2,5; 5; 7,5; 20; 25; і 30 тис. проходів коліс.

Для зразків асфальтобетону з епоксидними волокнами, що містять CHS-EPOXY 525, які були витримані вищевказану кількість діб, результати міцності на утворення колії в залежності від кількості проходів коліс наведені в таблиці 5.17.

Таблиця 5.17 - Результати міцності на утворення колії

Кількість циклів, кількість проходів коліс	Міцність на колійність при температурі 45°C, мм				
	Початковий асфальтобетон	Епоксидно-волокнистий асфальтобетон з CHS-EPOXY 525			
		1 доба	14 діб	28 діб	36 діб
1000	1,7	1,3	1,1	0,9	0,3
2500	1,9	1,9	1,5	1,2	0,6
5000	2,6	2,5	2,1	1,6	0,8

7500	2,9	2,9	2,3	1,8	1,0
20000	3,7	3,8	3,2	2,5	1,4
25000	4,3	4,4	3,4	2,7	1,6
30000	4,6	4,6	3,6	2,9	1,7

Згідно з українськими вимогами, зразок витримує випробування, якщо глибина колії не повинна перевищувати 5 мм після 30 тис. проходів при температурі 45°C.

У таблиці 5.18 та на рисунку 5.11 наведено залежність глибини колії від часу витримки при температурі 45°C для зразків епоксидного фібробетону.

Таблиця 5.18 - Залежність глибини колії від часу витримки зразка

Типи асфальтобетону	Глибина колії після 30 000 коліс при 45°C, мм				
	1 доба	14 діб	28 діб	36 діб	42 діб
Початковий Асфальтобетон	4,6	-	-	-	-
Епоксидний фібробетон з CHS-EPOXY 525	-	4,6	3,6	2,9	1,7

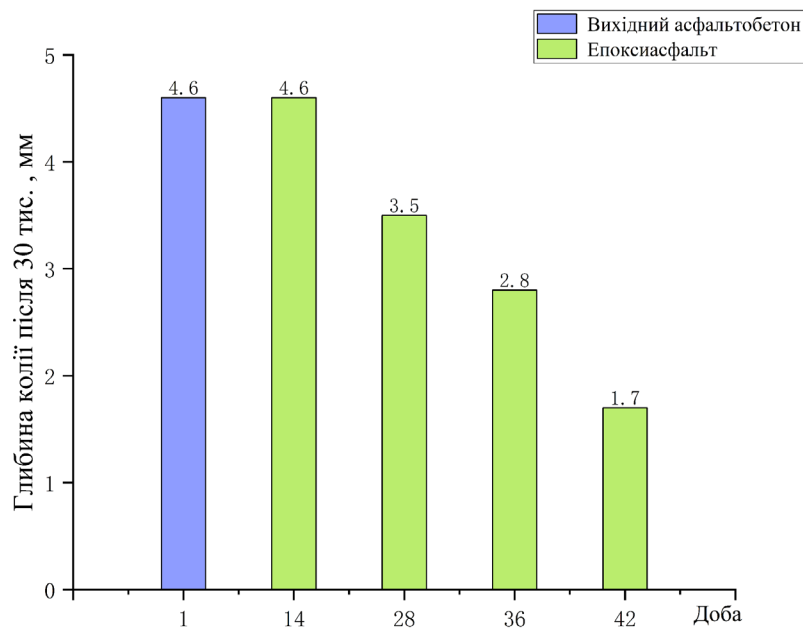


Рис. 5.11 - Глибина колії після проходу 30 тис. коліс при температурі 45 °C

Дані випробувань показали, що стійкість до колієутворення в епоксидно-волокнистих асфальтобетонних зразках була практично такою ж, як і у початкового асфальтобетону після 14 діб старіння (після 30 000 циклів глибина колії з обох боків становила 4,6 мм).

Стійкість до утворення колій в епоксидному асфальтовому покритті значно знизилася після 28 і більше днів зберігання. Якщо глибина колії у вихідному асфальтобетоні після 1000 проходів складала 1,7 мм, а після 30 000 проходів 4,6 мм,

то глибина колії в епоксидно-волокнистому асфальтобетоні після 42 діб вистоювання склала 0,3 мм та 1,7 мм відповідно. Таким чином, стійкість до утворення колій в епоксидному асфальтному покритті збільшувалася у міру формування структури епоксидно-волокнистого асфальтобетону. Після 42 діб вона зросла майже у три рази.

З метою визначення ефективності застосування різних дозувань композиційного в'язучого на властивості епоксидно-волокнистого асфальтобетону були досліджені властивості епоксидно-волокнистого асфальтобетону та поведінка епоксидно-волокнистого асфальтобетону в умовах високих літніх температур.

Для проведення цих випробувань використовувалися тільки композитні епоксидні в'язучі.

В якості вихідних матеріалів використовували:

- Щебінь фракції 5-10 мм з гранітного кар'єру "Малинський" відповідно до ДСТУ Б В.2.7-75;
- Пісок штучний фракціонований (відсів) гранітного кар'єру "Малинський" відповідно до ДСТУ Б В.2.7-76;
- Порошок мінеральний виробництва Київського ОАТ "Асфальтобетонний завод" відповідно до вимог ДСТУ Б В.2.7-121;
- Смола епоксидна марки CHS EPOXY-525, виробництва фірми Spolchemie (Чеська Республіка);
- Затверджувач марки Telalit 410, виробництва фірми Spolchemie (Чехія);
- Бітум ЗАТ "ЛІНІК" (Лисичанський НПЗ), що відповідає вимогам ДСТУ 4044, та має характеристики наведені у таблиці 5.18;
- Волокно летючої золи ТЕС, виробленої в Китаї.

Таблиця 5.19 - Характеристики бітуму

Назва показника	Фактичні значення	Вимоги ДСТУ 4044 до бітуму БНД
		50/70
Проникнення, 0,1 мм, при 25°C	60	61-90
Проникнення, 0,1 мм, при 0 °C	12	-
Температура розм'якшення, Кіш, °C	49	від 47 до 53

Розтяжність при 25 °С, см	82	не менше 55
Розтяжність при 0 °С, см	1,8	Щонайменше 3,0
Температура крихкості, °С	-20	Не більше мінус 12
Адгезія до гравію, бали, %.	30	Не стандартизовано

Гранулометричний склад асфальтобетонних сумішей на основі епоксидного волокна наведено в таблиці 5.20.

Таблиця 5.20 Гранулометричний склад асфальтобетонних сумішей на основі епоксидної фібри

Матеріали	Масовий вміст мінеральних частинок, менших за заданий розмір, мм, %									
	15	10	5,0	2,5	1,25	0,63	0,315	0,14	0,071	
Щебінь гранітний Малинського кар'єру фракції 5-10 мм	100	96	9	0	0	0	0	0	0	0
Відсів гранітний Малинського кар'єру	100	100	92	72	59	45	31	19	9	
Мінеральний порошок	100	100	100	100	100	98	93	88	71	
Підібраний склад (повні проходи)	100	98	59	44	37	30	22	15	8,5	
Вимоги до зернового складу (повні проходи) ДСТУ Б В.2.7-119 тип "Б"	100	100-90	65-55	53-43	43-33	33-23	25-16	18-11	14-8	

Марки, вибрані для асфальтобетонних сумішей, наведені в Таблиці 5.21.

Таблиця 5.21 Вибрані марки асфальтобетонних сумішей

Інгредієнти суміші	Кількість, %, шт.			
	Базовий Асфальто-бетон 1	Епоксіфіброасфальтобетон з епоксискладовою, % від маси бітуму		
		20	25	35
Щебінь 5-10, %	40	40	40	40
Штучний пісок 0-5, %	55	55	55	55
Мінеральний порошок, %	5	5	5	5
Бітум, %	6	5	4,8	4,4
Епоксидна смола, %	-	0,83	1,0	1,3
Затверджувач, %	-	0,17	0,2	0,3
Фібра із золи-виносу теплових електростанцій виробництва Китай	-	2,0	3,0	4,0

Вибраний склад вихідного асфальтобетону та щебенево-мастикового асфальтобетону відповідає вимогам ДСТУ Б В.2.7-119.

Температури нагрівання компонентів під час приготування асфальтобетону та епоксидного фібробетону наведені в таблиці 5.22.

Приготування та випробування зразків сумішей проводили згідно з ДСТУ Б В.2.7-89 (ГОСТ 12801).

Результати випробувань епокси фібробетону з різними композиційними в'язучими наведено в табл. 5.22.

Таблиця 5.22 Результати випробувань епоксифіброасфальтобетону

Назва показника	Значення вмісту комплексних компонентів у бітумі, %.									
	0	2,0% епоксидної смоли + 2,0% волокна				2,5% епоксидної смоли + 3,0% волокна				3,5% епоксидної смоли + 4,0% волокна
	Тривалість витримування зразків, діб									
	1	1	14	28	1	14	28	1	14	28
Водонасичення, % за об'ємом	1,5	-	-	1,8	-	-	1,8	-	-	4,5
Набухання, % за об'ємом	0,1	-	-	0,1	-	-	0,1	-	-	0,1
Границя міцності при стисненні, МПа, при температурі:	11,6	-	-	11,5	-	-	11,7	-	-	11,6
0°C										
20 °C	5,2	5,4	5,6	5,6	5,7	6,1	6,5	5,9	6,4	6,6
50 °C	1,8	2,0	2,2	2,4	2,4	2,8	3,0	2,7	3,0	3,2
60 °C	1,3	1,6	1,8	2,0	1,8	2,2	2,6	1,9	2,4	2,8
Коефіцієнт водостійкості	0,95	-	-	0,96	-	-	0,98	-	-	0,96
Коефіцієнт тривалої водостійкості	0,88	-	-	0,94	-	-	0,96	-	-	0,94

Згідно з табл. 5.22, введення 2,0% епоксидної смоли і 2,0% фібри підвищує міцність на стиск на 8-54%, 2,5 і 3,0% - на 25-100%, а 3,5 і 4,0% - на 27-115%. Тому оптимальним вмістом пакету добавок можна вважати 3,5% епоксидної смоли та 4,0%

фібри від маси асфальтобетону.

На рис. 5.12 наведено графіки зміни міцності на стиск з температурою для первинного асфальтобетону та асфальтобетону, що містить оптимальну кількість модифікатора (3,5%, 4,0%).

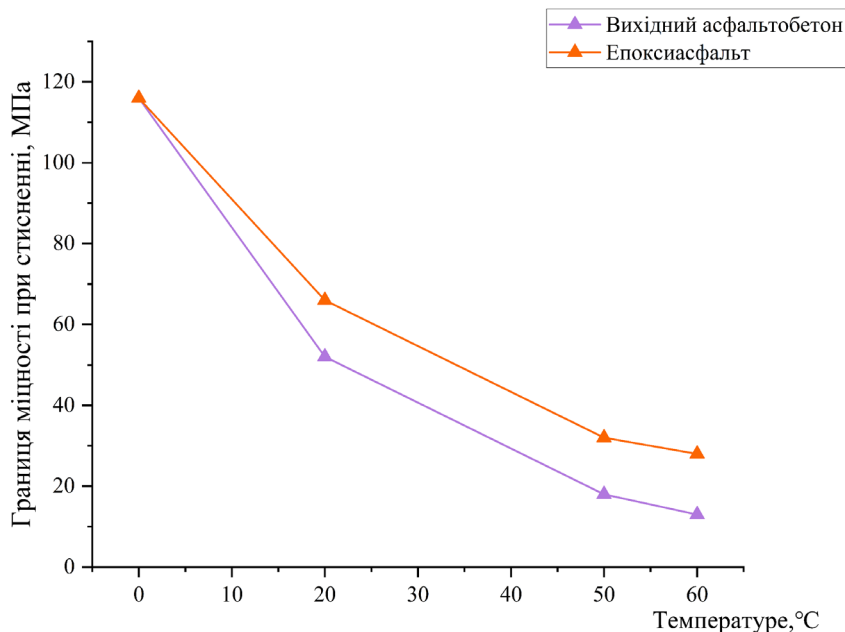


Рис. 5.12 - Зміна міцності на стиск залежно від температури

Як видно з рисунка, при 0°C міцність вихідного асфальтобетону та епоксидно-волокнистого асфальтобетону практично однакова. Це свідчить про те, що при низьких температурах епоксидна смола не підвищує крихкість та жорсткість цього матеріалу.

Міцність епоксидно-волокнистого асфальтобетону була на 27% вище, ніж у звичайного асфальтобетону, при 20°C, на 78% вище при 50°C і на 115% вище при 60°C. Таким чином вплив композитного модифікатора збільшувався зі зростанням температури.

Отже, можна говорити про те, що епоксидна смола спільно з волокнами летючої золи від ТЕС, виробленої у Китаї, суттєво підвищує тепло- та зсувостійкість асфальтобетону, не впливаючи на його низькотемпературні властивості.

5.2.4 Технічне обґрунтування приготування та застосування епоксидно-волокнистого асфальтобетону

Приготування епоксидно-волокнистої асфальтобетонної суміші здійснюють на асфальтобетонному заводі, який в обов'язковому порядку повинен бути додатково

оснащений системами дозування та подачі епоксидної смоли та затверджувача.

У складі епоксидного волоконно-асфальтобетону вміст композиційного в'язучого становить до 10% від маси асфальту. При цьому бітум може частково замінюватися модифікатором.

На підставі результатів лабораторних випробувань для більш точного призначення вмісту епоксидного компонента було виготовлено зразки епоксидного асфальту з різним вмістом модифікатора.

Оптимальна кількість епоксидної смоли CHS-EPOXY 525 з затверджувачем TELALIT 0800 складає 3,5 % усього змісту в'язучого.

Технологія приготування епоксидно-волокнистого асфальтобетону залежить від виду суміші та властивостей композиційного в'язучого. При застосуванні CHS-EPOXY 525 спільно з волокнами летючої золи від ТЕС, виробленої у Китаї, технологічний процес передбачає наступні технологічні операції:

- Подання асфальту в блок модифікації та нагрівання до температури 125 - 130 °С;
- Введення з безперервним перемішуванням необхідної кількості затверджувача (TELALIT 0800) в асфальт;
- Перемішування асфальту з затверджувачем в мішалці протягом 40 - 60 хвилин або за допомогою колоїдного млина (1 - 2 цикли);
- Приготування щебеневої суміші при температурі мінеральних матеріалів 70 - 85 °С °С;
- Введення в мінеральну суміш бітуму з затверджувачем з безперервним перемішуванням;
- Введення в суміш мінерального порошку при безперервному перемішуванні;
- Введення у суміш волокон при безперервному перемішуванні;
- Введення при безперервному перемішуванні в асфальтобетонну суміш епоксидної смоли (CHS-EPOXY 525) з наступним перемішуванням протягом 10 - 15 с;
- Вивантаження епоксидно-волокнистої асфальтобетонної суміші з асфальтозмішувача в накопичувальні місткості або транспортувальні засоби.

Подання епоксидної смоли і затверджувача виконується з бочок за допомогою обладнання, до складу якого входять дозувальні пристрої, насоси та трубопроводи; подання волокон - з бочок з дозувальними пристроями.

Вміст епоксидної смоли і затверджувача має бути проводитися по масі.

Для перемішування асфальту з затверджувачем потрібно застосовувати обладнання, оснащене механічною мішалкою (лопатевими мішалками різноманітних видів, диспергаторами) або колоїдним млином. У блок допускається заповнювати об'ємом асфальту не більше 0,75.

Закінчення процесу в'язучості визначається стабілізацією показника проникнення голки при температурі 25°C.

Під час приготування епоксидно-волокнистого асфальтобетону повинен строго дотримуватись температурний режим нагрівання мінеральної суміші та асфальту. Перевищення необхідних температур може призвести до протікання бурхливої реакції епоксидної смоли та волокна, внаслідок чого відбувається зсідання суміші та втрачається пластичність (при повторному укладанні суміші епоксидні зв'язки руйнуються і ефект модифікації знижується) суміші.

При наявності тривалої перерви поданні епоксидної смоли і волокна при закінченні роботою зміни систему подання варто промити органічним розчинником (толуол) для попередження закупорки полімеризаційними продуктами.

По закінченні кожної робочої зміни повинна проводитися відвантаження щебеню в асфальтозмішувач та перемішування протягом 3 хв, після чого щебінь вивантажується з асфальтозмішувача для забезпечення повного очищення асфальтозмішувача від залишків суміші.

Улаштування покриття автомобільних доріг загального користування, ділянок із підвищеними навантаженнями, покриттів на підходах до мостів і естакад, зон стоянок великовантажних автомобілів при застосуванні епоксидно-волокнистих асфальтобетонних сумішей відповідає вимогам ДБН В.2.3-4-2015 та інших нормативних документів для всіх дорожньо-кліматичних зон в Україні.

Укладання та ущільнення епоксидно-волокнистих асфальтобетонних сумішей необхідно здійснювати у відповідності з вимогами відповідних технологічних

регламентів та технологічних карт з приготування та укладання окремих видів сумішей, використовувати стандартну для визначеної виду суміші техніку.

Укладання епоксидно-волокнистих асфальтобетонних сумішей потрібно здійснювати в можливо стислі строки після виготовлення суміші. Рекомендується, щоб тривалість перевезення від моменту заванта приготування суміші до місця укладання не перевищувала 1 години.

Рекомендований діапазон температур для початку ущільнення сумішей із епоксидного волокнистого асфальтобетону становить 60-80°C.

Будівництво днища долини повинно проводитися в умовах, коли температура не опускається нижче 10 градусів Цельсія.

Суміші з епоксидного волокнистого асфальтобетону перевозяться самоскидами відповідно до стандартних правил перевезення сумішей.

Суміші з епоксидного волокнистого асфальтобетону не слід зберігати, а слід укладати в покриття одразу після їх приготування та доставки на робочий майданчик.

Висновки Розділу V

1. Проведені дослідження показали, що використання волокон золи-виносу від ТЕС китайського виробництва у гарячолитому та холодолитому асфальтобетоні є можливим та необхідним.

2. Застосування волокон золи-виносу від ТЕС китайського виробництва у складі гарячолитого асфальтобетону покращує міцність і зсувостійкість шару зносу, тобто забезпечує необхідну довговічність та якість виконаних ремонтів.

3. Оптимальна кількість волокон золи-виносу від ТЕС у литому гарячому асфальтобетоні визначена на рівні 4,0% до маси мінерального порошку.

4. Волокна в змішуванні з бітумом при робочих температурах 180-190 °C не втрачають свою активність і позитивно впливають на структуру бітуму, в якому вони містяться до 12 відсотків маси мінерального матеріалу.

5. Позитивні результати також отримані в експериментальних дослідженнях на холодолитому асфальтобетоні (ЛЕМС) з додатком до його складу волокон золи-виносу від вугільних ТЕС.

6. Розроблені рецептури асфальтових емульсій для технології ЛЕМС та визначені їх фізико-механічні показники. В ході вивчення визначена марка бітуму ЕКП-60 емульгованого відповідно до нормативних вимог ДСТУ Б.В.2.7-129:2014.

7. Виміряна повна поверхнева активність каменя в метиленовому блакитному. Визначено зерновий склад каменю та його відповідність типу ЛЕМС.

8. Спроектовано оптимальний склад ЛЕМС за критеріями загасання для рецептур, розроблених на бітумних емульсіях. За змістом встановлено, що застосування нетрадиційної добавки $Al_2(SO_4)_3$ разом з волокнами золи-виносу ТЕС позитивно впливає на утворення суміші ЛЕМС та затримує її розпад.

9. Визначено час ТП формування для спроектованого складу ЛЕМС. Збільшення зчеплення $Al_2(SO_4)_3$ з волокнами в середньому було швидше приблизно на 1,5 години при виконанні такої самої обробки 10% розчином Redicote E-11.

10. ЛЕМС з добавкою $Al_2(SO_4)_3$, що містить волокна золи-виносу від ТЕС, показав кращу вологостійкість за абразивним зносом, що свідчить про кращу адгезію та зв'язність суміші, зменшивши показник приблизно на 50% у порівнянні із застосуванням традиційних добавок.

11. $Al_2(SO_4)_3$ та волокно разом є певною мірою економічно доцільними, тому що алюмінію сульфат дешевший за Redicote, а волокна золи-виносу вітчизняних ТЕС є відходами промислового виробництва.

12. Модифікованому епоксидному асфальтобетону за складом підбраного епоксиду смоли та вітчизняної золи-виносу від ТЕС виробництва, порівняно з вихідним асфальтобетоном виготовленим на нафтовому в'язкому бітумі, володіє кращими деформаційними та міцнісними характеристиками.

13. Дослідженнями встановлено, що при оптимальному дозуванні добавок зростає міцність отриманого епоксидного асфальтобетону при 20°C та 50°C.

14. Встановлено, що 3,5% мас. епоксиду та 4,0% мас волокна в складі в'язучого, відповідно, збільшують зсувостійкість асфальтобетону на 27-115%. Це зумовлено підвищенням, по-перше, когезійної міцності, та по-друге, зростанням в'язкості модифікованого бітуму.

15. За результатами проведених експериментальних даних розроблено оптимальний спосіб введення та розподілення цих модифікуючих добавок в епоксидному асфальті.

16. Підвищення міцності при 50°C та 20°C та підвищення термо- та вологостійкості подовжує термін експлуатації покриттів з епоксидного асфальтобетону, а це збільшує міжремонтні терміни. Покращення показників експлуатаційних якостей при введенні в склад асфальтобетону модифікуючих добавок пов'язано зі зміною його структури. При введенні волокон від золи-виносу утворюються більш міцні структури, пов'язано з утворенням структурно-активних центрів і ново-груп'ястових елементів асфальтенів.

Загальні висновки

Попередні дослідження встановили, що при додаванні до складу бітуму сполучного волокна з летючої золи теплових електростанцій відбувається хімічна взаємодія активних частинок летючої золи, асфальтенів та смол бітуму. Це забезпечує адгезію бітуму до зерен мінерального матеріалу. Водночас теоретичні дослідження показали необхідність введення структуруючого заповнювача до складу гаряча литого асфальтобетону. У цій роботі були проведені експерименти для встановлення можливості введення до складу емульсійно-мінеральних сумішей волокна з летючої золи теплових електростанцій.

Отже, сировина, яка використовується для гарячо- та холодно литого асфальтобетону, була проаналізована за допомогою стандартних лабораторних досліджень відповідно до вимог ДСТУ Б.В.2.7-129:2014. Було визначено основні етапи взаємодії когезійної бітумної емульсії з кислим мінеральним матеріалом у процесі утворення дорожнього покриття. Крім того, була запропонована методика оцінки приросту когезійної міцності емульсійно-мінеральних сумішей за двома новими показниками (початок збільшення когезійної міцності та експрес-індикатор формування суміші).

Було встановлено, що додавання волокна з летючої золи теплових електростанцій до складу гаряча литого асфальтобетону дозволяє рівномірно розподілити збільшену кількість бітуму (до 12%) на зернах мінерального матеріалу. Більше того, воно змінило структуру в'язучої речовини та підвищило міцність, опір зсуву та шорсткість шару покриття, виготовленого з цього матеріалу. Також встановлено, що додавання волокна на основі летючої золи теплових електростанцій позитивно впливає на властивості холодно литого асфальтобетону у поєднанні з емульгатором та сприяє збільшенню когезійної міцності та щільності суміші. Таким чином, сульфат алюмінію $Al_2(SO_4)_3$ у бітумно-емульсійному в'язучому сприяє зміцненню зв'язків в активних групах бітуму, тобто асфальтенах та смолах. Більше того, використання волокна з летючої золи ТЕС у складі гаряча литого

асфальтобетону підвищує міцність і стійкість цього шару до зсуву. Відповідно, воно забезпечує необхідну довговічність та якість виконаного ремонту.

Крім того, лабораторні дослідження показали, що оптимальна кількість волокна з летючої золи в литому гарячому асфальтобетоні складає 4,0% від маси мінерального порошку. Волокно заміщується з бітумом при робочій температурі 180°C-190°C без втрати своєї активності та позитивно впливає на структуру бітуму, який знаходиться в кількості до 12% понад масу мінерального матеріалу. Окрім того, експериментальні дослідження холодної литого асфальтобетону з додаванням волокна з летючої золи ТЕС також дали позитивні результати. Внаслідок цього була розроблена рецептура бітумної емульсії для технології литих емульсійно-мінеральних сумішей.

Крім того, був визначений зерновий склад кам'яних матеріалів та їх відповідність типам литих емульсійно-мінеральних сумішей. Також були розроблені оптимальні склади литих емульсійно-мінеральних сумішей згідно з критеріями розпаду. Окрім того, було встановлено, що використання нетрадиційної добавки $Al_2(SO_4)_3$, з волокном з летючої золи ТЕС позитивно впливає на формування литих емульсійно-мінеральних сумішей та сповільнює їх розпад.

Крім того, було визначено час формування дорожнього покриття з розроблених складів литих емульсійно-мінеральних сумішей. Так, суміш з однаковим вмістом 10% розчину Redicote E-11, а саме $Al_2(SO_4)_3$ із волокном, показала швидше зростання зчеплення на 1,5 години. Отже, було зроблено висновок, що литі емульсійно-мінеральні суміші з добавкою волокна з летючої золи ТЕС характеризуються кращою абразивністю під дією води, виявляючи найкращі адгезійні та когезійні властивості. У порівнянні з використанням традиційної добавки вона знижує показник приблизно на 50%.

Крім того, при використанні $Al_2(SO_4)_3$ із волокном досягається певна економічна ефективність, оскільки сульфат алюмінію дешевший за Redicote, а волокно з летючої золи ТЕС є відходами промислового виробництва. Дослідження показали можливість та раціональність використання волокна з летючої золи ТЕС для приготування гарячолитого та холодно литого асфальтобетону (литих

емульсійно-мінеральних сумішей). Пояснити це можна тим, що волокно в литій структурі гарячого асфальтобетону допускає збільшену кількість бітуму в суміші, сприяючи зміцненню зв'язків активних частинок летючої золи та асфальтенової бітумності та утворюючи температурностійкі (180°C) вузли.

Також необхідно згадати, що гарячий литий асфальтобетон з волокном із золи виносу характеризується високими фізико-механічними та експлуатаційними властивостями, які забезпечують міцність і довговічність покриття. Вивчення бітуму різних структурних типів показало, що для приготування емульсій для холодного литого асфальтобетону можна використовувати окислений бітум, який має кращі адгезійні властивості в порівнянні з дистильованими. Крім того, за ДСТУ Б В.2.7-129 на окислених бітумах було розроблено склади бітумних емульсій для марок ЕСМ-60 та ЕСМР-60.

Також було визначено, що емульгатори Redicote 505 і Redicote 540 та вітчизняний модифікатор бітуму ІКС є оптимальними з точки зору когезійної міцності литих емульсійно-мінеральних сумішей. Це пояснюється тим, що литі емульсійно-мінеральні суміші з цими прискорювачами та оптимальним кам'яним матеріалом належать до 4 класу сумішей, який характеризується швидким схоплюванням суміші ($\leq 0,5$ год) і швидким самоущільненням ($\leq 1,0$ год). Таким чином, ці прискорювачі дозволяють зменшити час відкриття руху з обмеженням швидкості до 40 км/год до 1 години, а час відкриття руху без обмежень становить 2,5-3,0 години. Крім того, литі емульсійно-мінеральні суміші на основі окисленого бітуму, модифікованого ІКС, характеризуються в 8,5 разів меншою втратою ваги покриття у вологих умовах, ніж литі емульсійно-мінеральні суміші на основі окисленого бітуму з емульгаторами для бітумної емульсії.

Крім того, було виявлено, що на швидкість набору когезійної міцності, незалежно від природи бітуму (дистильований або окислений) і типу суміші, впливають властивості кам'яного матеріалу. Нарешті, економічна доцільність використання литого асфальтобетону (гарячого та холодного) з додаванням волокон із золи виносу ТЕС обумовлена зменшенням собівартості, оскільки волокно є дешевим відходом промисловості; збільшенням терміну служби покриття завдяки

структурі бітуму з волокном; а також підвищенням безпеки руху за рахунок створення підвищеної шорсткості поверхні покриття.

Аналіз літератури показав, що епоксидний асфальтобетон є перспективним матеріалом, вивчення властивостей якого необхідно розширити для отримання довговічного та якісного шару покриття. Також огляд досліджень та практичного досвіду використання епоксидного волокнистого асфальтобетону підтвердив високі транспортно-експлуатаційні характеристики цього матеріалу та значний інтерес до нього у розвинених країнах світу. Розширення переліку використовуваних модифікуючих добавок для бітуму при приготуванні епоксидного асфальтобетону є дуже важливим для розвитку дорожньо-будівельної галузі. При цьому вибір модифікаторів слід робити виходячи з ефективності впливу добавки на рівень фізико-механічних показників бітуму та її економічного обґрунтування з подальшою розробкою технічних вимог до кінцевого продукту. При аналізі наукових досягнень у галузі використання волокнистих наповнювачів у суміші зі смолами, зокрема епоксидними, в асфальтобетоні виявлено їх недостатню вивченість, а їх застосування свідчить про необхідність розширених експериментальних робіт з модифікації асфальтобетонних сумішей для автомобільних доріг та робить цей напрямок наукових досліджень актуальним.

Особливий інтерес викликає впровадження волокон із золи-виносу теплових електростанцій, яке комплексно впливає на міцність, опір пластичним деформаціям, водо- та морозостійкість асфальтобетону. У результаті аналізу літературних даних висунуто наукову гіпотезу про покращення якості бітуму та покращення властивостей асфальтобетону з використанням епоксидної смоли та волокон із золи виносу теплових електростанцій, впровадження яких дозволить отримати міцніший асфальтобетон. Підібрано та досліджено різні поєднання комплексного в'язучого-епоксидної смоли та ФЗВК. Встановлено, що для приготування епоксидного волокнистого асфальтобетону необхідний затверджувач, який забезпечує тривалу реакцію з епоксидною смолою.

Наукова гіпотеза підтверджується дослідженнями. Вивчено зміни групового складу бітуму при введенні епоксидної смоли та ФЗВК. Введення та збільшення

концентрації цих добавок призводить до зміни групового складу бітуму. Освіта надмолекулярних елементів дисперсної фази бітуму відбувається за рахунок накопичення активних груп епоксидної смоли та частинок золи виносу з асфальтенами з утворенням хімічних зв'язків. Використання золи виносу теплових електростанцій у суміші з епоксидною смолою для модифікації бітуму знижує кількість парафіну в бітумі за рахунок перерозподілу водневих зв'язків та звільнення бензольних кілець структурних елементів. Це призводить до підвищення структурованості та термостабільності бітуму. Розрахунок енергії активації показав, що при наявності епоксидної смоли та ФЗВК понад 2,0 та 3,0 % мас. відповідно, у складі бітуму створюються розширені супрамолекулярні структури, утворені агрегацією цих добавок.

З введенням меншої кількості добавок такі структури не утворюються. Відповідно, зола-винос розподіляється рівномірно в міжмолекулярному просторі в'язучого, а зниження енергії забезпечує більшу активність композитів. При визначенні втрати ваги в тонких плівках встановлено, що втрата ваги в тонких шарах зменшується після нагрівання бітуму. Тобто відбувається зменшення поверхневого випаровування низькокиплячих компонентів нафтового бітуму, які присутні або утворюються при старінні. Введення епоксидної смоли і ФЗВК дозволяє знизити втрату маси бітуму при нагріванні, відповідно зменшуючи його старіння. Встановлено, що внесення золи виносу в склад бітуму має більш значний вплив на поліпшення експлуатаційних властивостей бітуму за рахунок високого вмісту в золі активних частинок.

При визначенні основних деформативних властивостей комплексного в'язучого на основі бітуму з використанням епоксидної смоли та волокна золи виносу виявлено, що penetрація модифікованого бітуму зменшується зі збільшенням вмісту добавок. Введення 2,0% епоксидної смоли та 2,0% волокна в діапазоні високих температур знижує penetрацію на 20 одиниць і збільшує при низьких температурах. Встановлено, що з введенням добавок розширюється діапазон пластичності бітуму, що свідчить про зміну його структури на макрорівні. Підібрано склад модифікованого асфальтобетону з використанням епоксидної смоли

і ФЗВК, який має кращі деформативно-міцнісні властивості, ніж асфальтобетон, виготовлений з вихідного бітуму. Обраний склад епоксидно-волокнистого асфальтобетону. Оптимальний вміст епоксидних складових становить 20-30% від маси бітуму при заміні його частини. Також розроблена технологія приготування епоксидно-волокнистого асфальтобетону.

Затверджувач з'єднують з бітумом шляхом перемішування при температурі 120-140°C протягом 40-60 хв. Підготовка, транспортування, дозування та подача мінеральних матеріалів здійснюється за традиційною технологією. Температура нагрівання щебеню та піску становить 70-80°C. Бітум з затверджувачем вводять в піщано-щебеневу суміш та перемішують з нею протягом 20-30 с. Далі вводять епоксид. Перемішування смоли з сумішшю триває 30-60 секунд. Після цього вводять мінеральний порошок і волокно, після чого епоксидно-волокнистий асфальтобетон перемішують протягом 15-30 с.

Забезпечуючи якісне перемішування та повне обволікання мінеральних зерен в'язучим, мінеральний порошок може вводитися традиційно: в піщано-щебеневу суміш до подачі в'язучого. Виявлено, що при використанні оптимальної кількості добавок отриманий асфальтобетон збільшує приріст міцності при 20°C та 50°C. Встановлено, що 2,5% мас. епоксидної смоли та 4,0% мас. волокна у складі в'язучого дозволяють збільшити стійкість асфальтобетону до зсуву на 30-35 % відповідно. Це пояснюється підвищенням когезійної міцності та збільшенням в'язкості модифікованого бітуму. За результатами експериментальних даних розроблено оптимальний спосіб дозування та розподілу цих модифікаторів у бітумі. Збільшення показника міцності при 50°C та 20°C, підвищення термо- та водостійкості, що призводить до збільшення терміну служби асфальтобетонного покриття і, як наслідок, збільшення міжремонтного терміну.

Поліпшення експлуатаційних характеристик з модифікуючими добавками в складі бітуму пов'язане зі зміною його структури. З введенням волокна золи виносу формуються міцніші структури, пов'язані з утворенням активних центрів структурних та нових групових елементів бітуму.

Дослідження, проведені на епоксидно-волокнистому асфальтобетоні, показали, що епоксидні смоли та волокна можна вводити в різні типи гарячих асфальтобетонних сумішей. Усі види епоксидно-волокнистого асфальтобетону повинні принаймні відповідати умовам ДСТУ Б В.2.7-119. Випробовуючи міцність на стиск при різних температурах асфальтобетонів, до яких додано три різні рівні модифікаторів (епоксидна смола та волокна), можна отримати оптимальні рівні модифікаторів: 3,5% епоксидної смоли та 4,0% волокон. Міцнісні характеристики асфальтобетону покращуються шляхом введення композитного в'язучого. Цей ефект особливо помітний за високих температур і не знижує його низькотемпературних властивостей. Так, введення епоксидного компонента збільшує міцність асфальтобетону на 27% при 20°C, на 78% при 50°C і на 115% при 60°C, при цьому збільшення міцності при 0°C незначне. епоксидно-волокнистий асфальтобетон характеризується низькою чутливістю до температурних змін. Залежно від типу складу епоксидної смоли, коефіцієнт температурної чутливості становить 0,53-0,62, тоді як коефіцієнт температурної чутливості вихідного асфальтобетону — 0,42.

Епоксидно-волокнисті асфальтобетони характеризуються високою стійкістю до колієутворення та стійкістю до зсуву. Глибина колії на випробувальному зразку дорожнього покриття з епоксидно-волокнистого асфальтобетону через 42 доби перебування була в 3 рази менше, ніж на вихідних асфальтобетонних покриттях; існує прямий зв'язок між збільшенням міцності епоксидно-волокнистого асфальтобетону з часом (внаслідок формування структури) та зниженням інтенсивності колієутворення на покритті з цього матеріалу; з введенням епоксидних компонентів показники деформативної міцності покращуються протягом тривалого часу. Більш високі показники міцності та деформативності епоксидно-волокнистого асфальтобетону забезпечують суттєве (у 2-4 рази) збільшення терміну служби дорожніх покриттів і, таким чином, значне скорочення витрат на ремонтні роботи. Враховуючи, що собівартість робіт не зростає, оскільки використовується дешева ФЗВК, застосування матеріалу потребує розширення. Економічний ефект буде особливо помітним при будівництві покриттів з епоксидно-

волокнистого асфальтобетону на ділянках доріг з інтенсивним рухом важких транспортних засобів з режимом різкого гальмування та розгону машин, з випадками витoku агресивних речовин, паливно-мастильних матеріалів, а також у складних погодних і кліматичних умовах.

Отже, в рамках дисертаційного дослідження було доведено, що використання ФЗВК дозволяє покращити властивості литого та епоксидного асфальтобетону. Це відкриття може бути втілено в реальних дорожніх проектах у майбутньому, допомагаючи будувати довговічніші, економічніші та екологічніші асфальтові дороги.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] Hasan, U., Whyte, A., & Al Jassmi, H. (2020). Life cycle assessment of roadworks in United Arab Emirates: Recycled construction waste, reclaimed asphalt pavement, warm-mix asphalt and blast furnace slag use against traditional approach. *Journal of Cleaner Production*, 257, 120531. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120531>.
- [2] Wang, H. (2018). Life-cycle analysis of repair of concrete pavements. *Eco-Efficient Repair and Rehabilitation of Concrete Infrastructures*, 723-738. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-102181-1.00025-3>.
- [3] Embacher, R. A., & Snyder, M. B. (2001). Life-cycle cost comparison of asphalt and concrete pavements on low-volume roads; Case Study Comparisons. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1749(1), 28-37. <https://doi.org/10.3141/1749-05>.
- [4] Tajra, F., Elrahman, M. A., & Stephan, D. (2019). The production and properties of cold-bonded aggregate and its applications in concrete: A Review. *Construction and Building Materials*, 225, 29-43. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.219>.
- [5] Kimberly Joslin ,Ernesto Lopez,DingXin Cheng, Gary Hicks. (2019). Literature Review on Performance, Best Practices, and Training Needs for Chip Seals, Slurry Surfacing, and Cape Seals. *Mineta Transportation Institute*.
- [6] Hajj, E. Y., Loria, L., Sebaaly, P. E., Borroel, C. M., & Leiva, P. (2011). Optimum time for application of slurry seal to asphalt concrete pavements. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2235(1), 66-81. <https://doi.org/10.3141/2235-08>.
- [7] Sarsam, S. I., & Samor, Z. A. (2020). Evaluation of cold mix asphalt concrete properties. *Journal of Civil Engineering Inter Disciplinaries*, 1(1). <https://doi.org/10.47890/jceid/2020/sisarsam/12045784>.
- [8] Jing, R., Apostolidis, P., Liu, X., Erkens, S., & Scarpas, T. (2022). First-year field performance of epoxy-modified asphalt. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2677(3), 1110-1122. <https://doi.org/10.1177/03611981221121271>.

- [9] Ming, H. (2019). Investigation on production process of epoxy emulsified asphalt. *Procedia Manufacturing*, 30, 380-387. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.053>.
- [10] Fan, Y., Wu, Y., Chen, H., Liu, S., Huang, W., Wang, H., & Yang, J. (2022). Performance evaluation and structure optimization of low-emission mixed epoxy asphalt pavement. *Materials*, 15(18), 6472. <https://doi.org/10.3390/ma15186472>.
- [11] Mieczkowski, P., Budziński, B., Słowik, M., Kempa, J., & Sorociak, W. (2021). *Experimental study of tensile properties of styrene-butadiene-styrene modified asphalt binders*. *Materials*, 14(7), 1734. <https://doi.org/10.3390/ma14071734>.
- [12] Fedrigo, W., Núñez, W. P., Fernandes, D. P., Malabarba, L. M., Ceratti, J. A., & Brito, L. A. (2019). Effects of rap residual asphalt binder type, content and ageing on the mechanical behaviour of cold recycled cement-treated mixtures. *Road Materials and Pavement Design*, 22(6), 1389-1406. <https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1689156>.
- [13] Pan, Y., Liu, G., Tang, D., Han, D., Li, X., & Zhao, Y. (2021). A rutting-based optimum maintenance decision strategy of hot in-place recycling in semi-rigid Base asphalt pavement. *Journal of Cleaner Production*, 297, 126663. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126663>.
- [14] Klinsky, L. M. G., Kaloush, K. E., Faria, V. C., & Bardini, V. S. S. (2018). Performance characteristics of fiber modified hot mix asphalt. *Construction and Building Materials*, 176, 747-752. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.221>.
- [15] Shukla, M., Tiwari, D., & Sitaramanjaneyulu, K. (2014). Performance characteristics of fiber modified asphalt concrete mixes. *International Journal on Pavement Engineering & Asphalt Technology*, 15(1), 38-50. <https://doi.org/10.2478/ijpeat-2013-0007>.
- [16] Ho, C.-H., Shan, J., Wang, F., Chen, Y., & Almonnieay, A. (2016). Performance of fiber-reinforced polymer-modified asphalt: Two-year review in Northern Arizona. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2575(1), 138-149. <https://doi.org/10.3141/2575-15>.
- [17] Sim, J., Park, C., & Moon, D. Y. (2005). Characteristics of basalt fiber as a strengthening material for concrete structures. *Composites Part B: Engineering*, 36(6-7), 504-512. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2005.02.002>.

- [18] Carmisciano, S., Rosa, I. M., Sarasini, F., Tamburrano, A., & Valente, M. (2011). Basalt woven fiber reinforced vinylester composites: Flexural and electrical properties. *Materials & Design*, 32(1), 337-342. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.06.042>.
- [19] Ary Subagia, I. D. G., Kim, Y., Tijing, L. D., Kim, C. S., & Shon, H. K. (2014). Effect of stacking sequence on the flexural properties of hybrid composites reinforced with carbon and basalt fibers. *Composites Part B: Engineering*, 58, 251-258. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.10.027>.
- [20] Dhand, V., Mittal, G., Rhee, K. Y., Park, S.-J., & Hui, D. (2015). A short review on basalt fiber reinforced polymer composites. *Composites Part B: Engineering*, 73, 166-180. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.12.011>.
- [21] Wang, D., Ju, Y., Shen, H., & Xu, L. (2019). Mechanical properties of high performance concrete reinforced with basalt fiber and polypropylene fiber. *Construction and Building Materials*, 197, 464-473. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.181>.
- [22] Jing Y. (2010). Experimental studies on dispersion, softening and application of coal ash fiber. [Master dissertation, Tianjin University].
- [23] Chindaprasirt, P., Jaturapitakkul, C., & Sinsiri, T. (2005). Effect of fly ash fineness on compressive strength and pore size of blended cement paste. *Cement and Concrete Composites*, 27(4), 425-428. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.07.003>.
- [24] Sakai, E., Miyahara, S., Ohsawa, S., Lee, S.-H., & Daimon, M. (2005). Hydration of fly ash cement. *Cement and Concrete Research*, 35(6), 1135-1140. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.09.008>.
- [25] Ahmaruzzaman, M. (2010). A review on the utilization of Fly Ash. *Progress in Energy and Combustion Science*, 36(3), 327-363. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2009.11.003>.
- [26] Saha, A. K. (2018). Effect of class F fly ash on the durability properties of concrete. *Sustainable Environment Research*, 28(1), 25-31. <https://doi.org/10.1016/j.serj.2017.09.001>.
- [27] Moghaddam, F., Sirivivatnanon, V., & Vessalas, K. (2019). The effect of fly ash fineness on heat of hydration, microstructure, flow and compressive strength of blended

cement pastes. *Case Studies in Construction Materials*, 10. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00218>.

[28] Deb, P., & Singh, Kh. L. (2022). Performance of cement-treated cold mix asphalt with different fillers. *Innovative Infrastructure Solutions*, 8(1). <https://doi.org/10.1007/s41062-022-00978-7>.

[29] Md. Tukiran, J., Ariffin, J., & Abdul Ghani, A. N. (2016). Comparison on colored coating for asphalt and concrete pavement based on thermal performance and cooling effect. *Jurnal Teknologi*, 78(5). <https://doi.org/10.11113/jt.v78.8239>.

[30] Luo, Z., Xiao, F., Hu, S., & Yang, Y. (2013). Probabilistic analysis on fatigue life of rubberized asphalt concrete mixtures containing reclaimed asphalt pavement. *Construction and Building Materials*, 41, 401-410. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.12.013>.

[31] Yildirim, Y. (2007). Field performance comparison of Asphalt Crack-filling materials: Hot pour versus Cold pour. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 34(4), 505-512. <https://doi.org/10.1139/l06-143>.

[32] Wang, A., Shen, S., Li, X., & Song, B. (2019). Micro-surfacing mixtures with reclaimed asphalt pavement: Mix Design and Performance Evaluation. *Construction and Building Materials*, 201, 303-313. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.164>.

[33] Wang, Z., Zhou, H., Mandapaka, V., & Nguyen, L. (2021). Pavement maintenance and rehabilitation practices in California: A study of 35-year as-built data in PaveM. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 10(4), 380-392. <https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2021.04.005>.

[34] Wang, Z., Zhou, H., Mandapaka, V., & Nguyen, L. (2021a). Pavement maintenance and rehabilitation practices in California: A study of 35-year as-built data in PaveM. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 10(4), 380-392. <https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2021.04.005>.

[35] Singgih, C., Handayani, D., & Setyawan, A. (2017). Assessing the durability of polymer modified asphalt emulsions slurry seal. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 176, 012035. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/176/1/012035>.

[36] García, A., Lura, P., Partl, M. N., & Jerjen, I. (2012). Influence of cement content

and environmental humidity on asphalt emulsion and cement composites performance. *Materials and Structures*, 46(8), 1275-1289. <https://doi.org/10.1617/s11527-012-9971-6>.

[37] Abaza, K. A., & Ashur, S. A. (1999). Optimum decision policy for management of Pavement Maintenance and rehabilitation. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1655(1), 8-15. <https://doi.org/10.3141/1655-02>.

[38] Chan, S., Lane, B., Kazmierowski, T., & Lee, W. (2011). Pavement preservation. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2235(1), 36-42. <https://doi.org/10.3141/2235-05>.

[39] Xie, N., Li, H., Abdelhady, A., & Harvey, J. (2019). Laboratorial investigation on optical and thermal properties of cool pavement nano-coatings for urban heat island mitigation. *Building and Environment*, 147, 231-240. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.10.017>.

[40] Xie, N., Li, H., Zhao, W., Zhang, C., Yang, B., Zhang, H., & Zhang, Y. (2019). Optical and durability performance of near-infrared reflective coatings for cool pavement: Laboratorial investigation. *Building and Environment*, 163, 106334. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106334>.

[41] publisher, R. this. (2016, March 30). DSTU B V 2 7 129 2013 jemul'sii bitumnyo 540. Issuu. https://issuu.com/rayshawn3654/docs/dstu_b_v_2_7-129_2013_jemul_sii_bit.

[42] Matlack, G. R., Horn, A., Aldo, A., Walubita, L. F., Naik, B., & Khoury, I. (2021). Measuring surface texture of in-service asphalt pavement: Evaluation of two proposed hand-portable methods. *Road Materials and Pavement Design*, 24(2), 592-608. <https://doi.org/10.1080/14680629.2021.2009902>.

[43] Zani, L., Giustozzi, F., & Harvey, J. (2017). Effect of storage stability on chemical and rheological properties of polymer-modified asphalt binders for Road Pavement Construction. *Construction and Building Materials*, 145, 326-335. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.014>.

[44] Lu, Q., & Bors, J. (2015). Alternate uses of epoxy asphalt on bridge decks and roadways. *Construction and Building Materials*, 78, 18-25. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.125>.

[45] Yu, X., Dong, F., Ding, G., Liu, S., & Shen, S. (2016). Rheological and

microstructural properties of foamed epoxy asphalt. *Construction and Building Materials*, 114, 215-222. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.179>.

[46] Underwood, S., Caro, S., & Varveri, A. (2019). Advancements in the characterisation and design of asphalt materials. *International Journal of Pavement Engineering*, 21(8), 955-955. <https://doi.org/10.1080/10298436.2019.1650928>.

[47] Alamri, M., Lu, Q., Elmagarhe, A., & Elnihum, A. (2023). The effect of incorporating 100% of undiluted and diluted reclaimed epoxy asphalt materials into pervious cement mixes. *Coatings*, 13(7), 1178. <https://doi.org/10.3390/coatings13071178>.

[48] Jain, P., Bose, S., & Arya, I. (n.d.). Characterisation of polymer modified asphalt binders for roads and airfields. *Polymer Modified Asphalt Binders*. <https://doi.org/10.1520/stp17842s>.

[49] Vyrozhemskyi, V., Kopynets, I., Kischynskyi, S., & Bidnenko, N. (2017). Epoxy asphalt concrete is a perspective material for the construction of Roads. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 236, 012022. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/236/1/012022>.

[50] Yi, X., Chen, H., Wang, H., Shi, C., & Yang, J. (2022). The feasibility of using epoxy asphalt to recycle a mixture containing 100% reclaimed asphalt pavement (RAP). *Construction and Building Materials*, 319, 126122. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126122>.

[51] Cong, P., Luo, W., Xu, P., & Zhang, Y. (2019). Chemical and physical properties of hot mixing epoxy asphalt binders. *Construction and Building Materials*, 198, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.275>.

[52] Gong, J., Liu, Y., Wang, Q., Xi, Z., Cai, J., Ding, G., & Xie, H. (2019). Performance evaluation of warm mix asphalt additive modified epoxy asphalt rubbers. *Construction and Building Materials*, 204, 288-295. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.197>.

[53] Li, J., Huang, X., Zhang, Y., & Xu, M. (2009). Bitumen colloidal and structural stability characterization. *Road Materials and Pavement Design*, 10(SI), 45-59. <https://doi.org/10.3166/rmpd.10hs.45-59>.

[54] Harvey, J., Bejarano, M., & Popescu, L. (2001). Accelerated pavement testing

of rutting and cracking performance of asphalt-rubber and conventional asphalt concrete overlay strategies. *Road Materials and Pavement Design*, 2(3), 229-262. <https://doi.org/10.3166/rmpd.2.229-262>.

[55] Lu, X., & Isacson, U. (1997). Compatibility and storage stability of styrene-butadiene-styrene copolymer modified bitumens. *Materials and Structures*, 30(10), 618-626. <https://doi.org/10.1007/bf02486904>.

[56] Jing, R., Apostolidis, P., Liu, X., Erkens, S., & Scarpas, T. (2023). Effect of mineral fillers on epoxy-modified open-graded porous asphalt durability. *International Journal of Pavement Engineering*, 24(1). <https://doi.org/10.1080/10298436.2023.2268799>.

[57] Oldham, D., Qu, X., Wang, H., & Fini, E. H. (2020). Investigating change of polydispersity and rheology of crude oil and bitumen due to Asphaltene Oxidation. *Energy & Fuels*, 34(8), 10299-10305. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.0c01344>.

[58] Jianping Liu, Yungang Nie, & Naihui Zhai. (2011). Typical disease management and overlay maintenance technology in high-grade asphalt pavement. *2011 International Conference on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering*. <https://doi.org/10.1109/rsete.2011.5965625>.

[59] Hosseinnezhad, S., Bocoum, A., Martinez, F. M., & Fini, E. H. (2015). Biomodification of rubberized asphalt and its high temperature properties. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2506(1), 81-89. <https://doi.org/10.3141/2506-09>.

[60] Herrington, P., & Alabaster, D. (2008). Epoxy modified open-graded porous asphalt. *Road Materials and Pavement Design*, 9(3), 481-498. <https://doi.org/10.3166/rmpd.9.481-498>.

[61] Fazaeli, H., Behbahani, H., Amini, A. A., Rahmani, J., & Yadollahi, G. (2012). High and low temperature properties of FT-paraffin-modified bitumen. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2012, 1-7. <https://doi.org/10.1155/2012/406791>.

[62] Lu, Xiaohu, & Isacson, U. (2000). Modification of road bitumens with thermoplastic polymers. *Polymer Testing*, 20(1), 77-86. [https://doi.org/10.1016/s0142-9418\(00\)00004-0](https://doi.org/10.1016/s0142-9418(00)00004-0).

[63] Mohammed, M., Parry, T., & Grenfell, J. (J. R. A.). (2018). Influence of fibres

on rheological properties and toughness of bituminous binder. *Construction and Building Materials*, 163, 901-911. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.146>.

[64] Guo, Y., Tataranni, P., & Sangiorgi, C. (2023). The use of fibres in asphalt mixtures: A state of the Art Review. *Construction and Building Materials*, 390, 131754. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131754>.

[65] Kowalski, K. J., Król, J., Radziszewski, P., Casado, R., Blanco, V., Pérez, D., Viñas, V. M., Brijse, Y., Frosch, M., Le, D. M., & Wayman, M. (2016). *Eco-friendly materials for a new concept of asphalt pavement*. *Transportation Research Procedia*, 14, 3582-3591. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.426>.

[66] Behnood, A. (2019). Application of rejuvenators to improve the rheological and mechanical properties of asphalt binders and mixtures: A review. *Journal of Cleaner Production*, 231, 171-182. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.209>.

[67] Polacco, G., Filippi, S., Merusi, F., & Stastna, G. (2015). A review of the fundamentals of polymer-modified asphalts: Asphalt/Polymer Interactions and principles of compatibility. *Advances in Colloid and Interface Science*, 224, 72-112. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2015.07.010>.

[68] Eskandarsefat, S., Dondi, G., & Sangiorgi, C. (2019). Recycled and rubberized SMA modified mixtures: A comparison between polymer modified bitumen and modified fibres. *Construction and Building Materials*, 202, 681-691. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.045>.

[69] Tayfur, S., Ozen, H., & Aksoy, A. (2007). Investigation of rutting performance of asphalt mixtures containing polymer modifiers. *Construction and Building Materials*, 21(2), 328-337. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.08.014>.

[70] Nikolaidis, A., & Oikonomou, N. (2000). The use fly ash as a substitute of cement in microsurfacing. *Waste Materials in Construction Wascon 2000 - Proceedings of the International Conference on the Science and Engineering of Recycling for Environmental Protection, Harrogate, England 31 May, 1-2 June 2000*, 234-240. [https://doi.org/10.1016/s0713-2743\(00\)80035-5](https://doi.org/10.1016/s0713-2743(00)80035-5).

[71] Sakanov, D. (2020). Experience of constructing the roads with cement concrete coatings. *Dorogi i Mosti*, 2020(21), 138-145.

<https://doi.org/10.36100/dorogimosti2020.21.138>.

[72] Pecheny, B. G., Nikolov, A., & Nikolova, S. (2019). Improving the quality of emulsion-mineral mixtures. *Bituminous Mixtures and Pavements VII*, 219-224. <https://doi.org/10.1201/9781351063265-33>.

[73] Zoorob, S., & Thanaya, I. (2017). Improving the performance of cold bituminous emulsion mixtures (cbems) incorporating waste materials. *Performance of Bituminous and Hydraulic Materials in Pavements*. <https://doi.org/10.4324/9780203743928-36>.

[74] Alternative fillers for use in slurry seal. (2013). *Issue 2*, 9(2), 182-186. <https://doi.org/10.30955/gnj.000421>.

[75] Imran Khan, M., & Al-Abdul Wahhab, H. I. (1998). Improving slurry seal performance in eastern Saudi Arabia using steel slag. *Construction and Building Materials*, 12(4), 195-201. [https://doi.org/10.1016/s0950-0618\(98\)00005-1](https://doi.org/10.1016/s0950-0618(98)00005-1).

[76] Wessley, D. J. (2000). Innovative Developments for applying slurry seal. *Construction Congress VI*. [https://doi.org/10.1061/40475\(278\)130](https://doi.org/10.1061/40475(278)130).

[77] Vyrozhemsky, V. K., & Katukova, V. M. (2009). Innovative Technologies in the Reconstruction of the Kyiv-Odessa Highway. , 5.

[78] Mozgovoy, V. V., Onishchenko, A. N., Aksenov, S. Yu., Garkusha, M. V., & Nevinglovsky, V. F. (2012). Methods of preparation and test results of polymer-modified bitumen using a laboratory shovel mixer. *NTU Bulletin. - K.*, 26.

[79] Edwards, Y., & Aurstad, J. (2000). The influence of runway de-icing agents on the durability of asphalt concrete pavements for airfields. *Road Materials and Pavement Design*, 1(4), 387-405. <https://doi.org/10.1080/14680629.2000.12067152>.

[80] (N.d.). Bitumen and Bituminous Binders. *Determination of Residual Binder and Oil Distillate from Bitumen Emulsions by Distillation*. <https://doi.org/10.3403/02048760u>.

[81] Porto, M., Caputo, P., Loise, V., Eskandarsefat, S., Teltayev, B., & Oliviero Rossi, C. (2019). Bitumen and bitumen modification: A review on latest advances. *Applied Sciences*, 9(4), 742. <https://doi.org/10.3390/app9040742>.

[82] (N.d.-a). *Bitumen Road Emulsion for Penetration (Grouting and Semi Grouting) and Surface Dressing*. <https://doi.org/10.3403/30305553>.

[83] Pecheny, B. G., Nikolov, A., & Nikolova, S. (2019a). Improving the quality of

emulsion-mineral mixtures. *Bituminous Mixtures and Pavements VII*, 219-224. <https://doi.org/10.1201/9781351063265-33>.

[84] Ojstršek, A., & Fakin, D. (2019). Washing durability and photo-stability of nanotio₂-sio₂ coatings exhausted onto cotton and cotton/polyester fabrics. *Coatings*, 9(9), 545. <https://doi.org/10.3390/coatings9090545>.

[85] Edwards, Y., Tasdemir, Y., & Isacson, U. (2006). Effects of commercial waxes on asphalt concrete mixtures performance at low and medium temperatures. *Cold Regions Science and Technology*, 45(1), 31-41. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2006.01.002>.

[86] Parfenov, A., Vakulchik, Y., & Yarmolinskiy, V. (2023). The use of gravel crushing siftings sands for the production of cast emulsion-mineral mixtures «slarri SIL». *Russian Journal of Transport Engineering*, 10(1). <https://doi.org/10.15862/01sats123>.

[87] Kim, H. H., Broughton, B., Lee, M. S., & Lee, S. J. (2015). Microsurfacing successes and failures. *Journal of the Korean Society of Road Engineers*, 17(2), 71-78. <https://doi.org/10.7855/ijhe.2015.17.2.071>.

[88] Waldi, D. (1965). Coating materials for thin-layer chromatography. *Thin-Layer Chromatography*, 29-34. https://doi.org/10.1007/978-3-662-01031-0_3.

[89] Sangiorgi, C., Bitelli, G., Lantieri, C., Irali, F., & Girardi, F. (2012). A study on texture and acoustic properties of cold laid microsurfacing. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 53, 223-234. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.875>.

[90] Imran Khan, M., & Al-Abdul Wahhab, H. I. (1998a). Improving slurry seal performance in eastern Saudi Arabia using steel slag. *Construction and Building Materials*, 12(4), 195-201. [https://doi.org/10.1016/s0950-0618\(98\)00005-1](https://doi.org/10.1016/s0950-0618(98)00005-1).

[91] Suda, J., & Valentin, J. (2017). Influence of micro-milled secondary materials used as binders in low level stabilized cold recycled asphalt mixtures. *Key Engineering Materials*, 731, 29-36. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.731.29>.

[92] Road Construction Additives Europe, Middle East, India and Africa Newsletter. Asphalt concrete issues. Acids in cationic emulsions. Akzonobel surface chemistry. 2012;83:13.

[93] DSTU B V.2.7-129:2013 "Bitumen road emulsions. Specifications." - Kyiv: Ministry of the Region of Ukraine.2014.

[94] Howson, J., Masad, E., Bhasin, A., Little, D., & Lytton, R. (2011). Comprehensive analysis of surface free energy of asphalts and aggregates and the effects of changes in ph. *Construction and Building Materials*, 25(5), 2554-2564. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.098>.

[95] Yuliestyan, A., Cuadri, A. A., García-Morales, M., & Partal, P. (2016). Binder design for asphalt mixes with reduced temperature: Eva modified bitumen and its emulsions. *Transportation Research Procedia*, 14, 3512-3518. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.319>.

[96] ISSA TB-139-90 Classify emulsified asphalt/aggregate mixture systems by modified cohesion tester measurement of set and cure characteristics. 1990. <https://www.roadauthority.com/Standards/?id=d2d8e0d6-e452-477f-9ffb-26fc12f18bc7>.

[97] Hossain, M. S., Sarica, C., Zhang, H.-Q., Rhyne, L., & Greenhill, K. L. (2005). Assessment and development of heavy-oil viscosity correlations. *All Days*. <https://doi.org/10.2118/97907-ms>.

[98] Recommended performance guideline for emulsified asphalt slurry seal A105. 2010. <http://blacklineinc.net/wp-content/uploads/2016/11/Slurry-Seal-A105.pdf>.

[99] Santagata, E., & Bassani, M. (2017). Evaluation of bitumen-aggregate interactions by means of volumetric expansion tests. *Performance of Bituminous and Hydraulic Materials in Pavements*. <https://doi.org/10.4324/9780203743928-41>.

[100] Ranieri, M., & Celauro, C. (2018). Improvement of high modulus asphalt mixtures with average quality aggregate and bitumen by application of polymeric additives. *Construction and Building Materials*, 178, 183-194. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.126>.

[101] Dondi, G., Mazzotta, F., Simone, A., Vignali, V., Sangiorgi, C., & Lantieri, C. (2016). Evaluation of different short term aging procedures with neat, warm and modified binders. *Construction and Building Materials*, 106, 282-289. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.122>.

[102] Costa, L. M. B., R., H. M., Silva, D., Oliveira, J. R. M., & Fernandes, S. R. M. (n.d.). *Incorporation of waste plastic in asphalt binders to improve their performance in the pavement*. *Airiti Library*. <https://www.airitilibrary.com/Article/Detail/19971400->

201307-201308020022-201308020022-457-464.

[103] Bituminous binders, unbound materials. (2015). *Bituminous Mixtures and Pavements VI*, 19-150. <https://doi.org/10.1201/b18538-1>.

[104] Dehouche, N., Kaci, M., & Mokhtar, K. A. (2012). Influence of thermo-oxidative aging on chemical composition and physical properties of polymer modified bitumens. *Construction and Building Materials*, 26(1), 350-356. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.033>.

[105] Pan, C., Liang, D., Mo, L., Riara, M., & Lin, J. (2019). Influence of different modifiers on bonding strength and rheological performance of bitumen emulsion. *Materials*, 12(15), 2414. <https://doi.org/10.3390/ma12152414>.

[106] T. Srikanth. (2014). Behaviour of bituminous concrete modified with polyethylene glycol for blade and disk shaped aggregates. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 03(02), 318-324. <https://doi.org/10.15623/ijret.2014.0302057>.

[107] García, Á., Schlangen, E., Ven, M. van, & Bochove, G. van. (2012). Optimization of composition and mixing process of a self-healing porous asphalt. *Construction and Building Materials*, 30, 59-65. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.11.034>.

[108] Solodkiy SJ, Wallis OE, Sidun YV. Possibility of using phosphoric acids in the technology of cast iron-mineral mixtures. *Sc Notes Eng Mech Metal Mater Sc*. 2014;45:529-34.

[109] Oruc, S., Celik, F., & Akpınar, M. V. (2007, May 16). *Effect of cement on emulsified asphalt mixtures - Journal of Materials Engineering and Performance*. SpringerLink. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11665-007-9095-2>.

[110] Baker, R. (n.d.). Asphalt emulsion slurry seal and Wheelpath inlay. *Asphalt Emulsions*. <https://doi.org/10.1520/stp23511s>.

[111] (N.d.-a). Test Method for Ash Content of Asphalt and Emulsified Asphalt Residues. <https://doi.org/10.1520/d8078-18e01>.

[112] Parfenov, A., Vakulchik, Y., & Yarmolinskiy, V. (2023a). The use of gravel crushing siftings sands for the production of cast emulsion-mineral mixtures «slarri SIL».

Russian Journal of Transport Engineering, 10(1). <https://doi.org/10.15862/01sats123>.

[113] Stimilli, A., Ferrotti, G., Graziani, A., & Canestrari, F. (2013). Performance evaluation of a cold-recycled mixture containing high percentage of reclaimed asphalt. *Road Materials and Pavement Design*, 14(sup1), 149-161. <https://doi.org/10.1080/14680629.2013.774752>.

[114] Kopynets, I., & Malii, T. (2020). Comparative analysis of domestic and European requirements for cast emulsion-mineral mixtures. *Dorogi i Mosti*, 2020(22), 114-127. <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2020.22.114>.

[115] DSTU 4044-2001 "Oil road viscous bitumens. Specifications." - Kyiv: State Standard. 2001.

[116] Bratyshchak, M., Ripak, O., Namiesnik, J., Shyshchak, O., & Astakhova, O. (2018). Obtaining of coumarone-indene resins based on light fraction of coal tar. 2. coumarone-indene resins with epoxy groups. *Chemistry & Chemical Technology*, 12(1), 93-100. <https://doi.org/10.23939/chcht12.01.093>.

[117] M. Downes, R. Cool, E. Mulder. Some promising new binders and their profitability Shell International Petroleum Company: report at the 7th International Bitumen Conference, Brisbane, Australia. 08/7-11/1988.

[118] J. Beranger, J. Rivoire, J. Samano. ,J.C.Vaniscott. Practical guide to road construction: modified road binders. Technical Manual TR 9.12(R). Shell Chemicals. 1992;21.

[119] Terrel, R. (n.d.). Polymer modified asphalt concrete for environmental liners. *Polymer Modified Asphalt Binders*. <https://doi.org/10.1520/stp17841s>.

[120] Ferdous, W., Manalo, A., Wong, H. S., Abousnina, R., AlAjarmeh, O. S., Zhuge, Y., & Schubel, P. (2020). Optimal design for epoxy polymer concrete based on mechanical properties and durability aspects. *Construction and Building Materials*, 232, 117229. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117229>.

[121] Apostolidis, P., Liu, X., Erkens, S., & Scarpas, T. (2020). Oxidative aging of epoxy asphalt. *International Journal of Pavement Engineering*, 23(5), 1471-1481. <https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1806278>.

[122] Çubuk, M., Gürü, M., & Çubuk, M. K. (2009). Improvement of bitumen

performance with epoxy resin. *Fuel*, 88(7), 1324-1328.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2008.12.024>.

[123] Nie, W., Wang, D., Sun, Y., Xu, W., & Xiao, X. (2021). Integrated design of structure and material of epoxy asphalt mixture used in steel bridge deck pavement. *Buildings*, 12(1), 9. <https://doi.org/10.3390/buildings12010009>.

[124] Chenevière, P., & Ramdas, V. (2006). Cost benefit analysis aspects related to long-life pavements. *International Journal of Pavement Engineering*, 7(2), 145-152. <https://doi.org/10.1080/10298430600627037>.

[125] Kenneth, G. B. (n.d.). Chapter 9—Rolling wear, impact wear, and surface fatigue testing. *Guide to Friction, Wear, and Erosion Testing*. <https://doi.org/10.1520/mnl11349m>.

[126] Li, Jiasheng, Zhu, Y., & Yu, J. (2023). Study on physical properties, rheological properties, and self-healing properties of epoxy resin modified asphalt. *Sustainability*, 15(8), 6889. <https://doi.org/10.3390/su15086889>.

[127] You, L., You, Z., Dai, Q., Xie, X., Washko, S., & Gao, J. (2019). Investigation of adhesion and interface bond strength for pavements underlying chip-seal: Effect of asphalt-aggregate combinations and freeze-thaw cycles on chip-seal. *Construction and Building Materials*, 203, 322-330. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.058>.

[128] Chailleux, E., Audo, M., Goyer, S., Queffelec, C., & Marzouk, O. (2015a). Advances in the development of alternative binders from biomass for the production of biosourced road binders. *Advances in Asphalt Materials*, 347-362. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-100269-8.00011-8>.

[129] DSTU B V.2.7-119:2011. Asphalt concrete mixtures and road and airfield asphalt concrete. Specifications. Kyiv: Ukravtodor.2011. <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0416858-11#Text>.

[130] Sakhapov, R., Makhmutov, M., Nikolaeva, R., & Gatiatullin, M. (2018). Asphalt granulate coating for roadsides. *MATEC Web of Conferences*, 245, 02003. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201824502003>.

[131] Ronald, M., & Luis, F. P. (2016). Asphalt emulsions formulation: State-of-the-art and dependency of formulation on emulsions properties. *Construction and Building*

Materials, 123, 162-173. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.129>.

[132] Žalimienė, L., Vaitkus, A., & Čygas, D. (2020). Insights and findings following 11 years of test road exploitation. *Coatings*, 10(12), 1161. <https://doi.org/10.3390/coatings10121161>.

[133] Pyshyev, S., Grytsenko, Y., Solodkyy, S., Sidun, I., & Vollis, O. (2015). Using bitumen emulsions based on oxidated, distillation and modified oxidated bitumens for slurry seal production. *Chemistry & Chemical Technology*, 9(3), 359-366. <https://doi.org/10.23939/chcht09.03.359>.

[134] Lin, X., Wang, M., & Yan, K. (2023). Comparison on the performance of solid coumarone-indene resin and liquid coumarone-indene resin modified asphalt. *Construction and Building Materials*, 400, 132629. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132629>.

[135] Al-Mohammedawi, A., & Mollenhauer, K. (2022). Current Research and Challenges in Bitumen Emulsion Manufacturing and Its Properties. *Materials (Basel, Switzerland)*, 15(6), 2026. <https://doi.org/10.3390/ma15062026>.

[136] Vysotskaya, M., & Korotkov, A. (2015). Optimization of provide compositions bitumen emulsions, for example the cationic emulsifier. *Applied Mechanics and Materials*, 725-726, 517-522. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.725-726.517>.

[137] Castellanos Díaz, O., Sánchez-Lemus, M. C., Schoeggl, F. F., Satyro, M. A., Taylor, S. D., & Yarranton, H. W. (2014). Deep-vacuum fractionation of heavy oil and bitumen, part I: Apparatus and standardized procedure. *Energy & Fuels*, 28(5), 2857-2865. <https://doi.org/10.1021/ef500489y>.

[138] Diaz, O. C., & Yarranton, H. W. (2019). Applicability of simulated distillation for heavy oils. *Energy & Fuels*, 33(7), 6083-6087. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.9b00724>.

[139] Yarmola, T., Topilnytskyi, P., Gunka, V., Tertyshna, O., & Romanchuk, V. (2022). Production of distilled bitumen from high-viscosity crude oils of Ukrainian fields. *Chemistry & Chemical Technology*, 16(3), 461-468. <https://doi.org/10.23939/chcht16.03.461>.

[140] Events in the field of asphalt concrete. Road Additives Department Newsletter.

Use of cement in Slurry covering. AkzoNobel Surface AkzoNobel Surface Chemistry. 2009;80:9.

[141] Golub, T. P., Koopal, L. K., & Sidorova, M. P. (2004). Adsorption of cationic surfactants on silica surface: 1. adsorption isotherms and surface charge. *Colloid Journal*, 66(1), 38-43. <https://doi.org/10.1023/b:coll.0000015053.71438.fd>.

[142] Cuadri, A. A., Delgado-Sánchez, C., Navarro, F. J., & Partal, P. (2020). Short- and long-term epoxy modification of bitumen: Modification kinetics, rheological properties, and microstructure. *Polymers*, 12(3), 508. <https://doi.org/10.3390/polym12030508>.

[143] Ma, X., Li, Q., Cui, Y.-C., & Ni, A.-Q. (2016). Performance of porous asphalt mixture with various additives. *International Journal of Pavement Engineering*, 19(4), 355-361. <https://doi.org/10.1080/10298436.2016.1175560>.

[144] Golovchenko, V. (2023). Overview of technologies for obtaining cold emulsion-mineral mixtures. *Automobile Roads and Road Construction*, (114.2), 056-067. <https://doi.org/10.33744/0365-8171-2023-114.2-056-067>.

[145] Aguiar-Moya, J. P., Salazar-Delgado, J., Bonilla-Mora, V., Rodríguez-Castro, E., Leiva-Villacorta, F., & Loria-Salazar, L. (2015). Morphological analysis of bitumen phases using Atomic Force Microscopy. *Road Materials and Pavement Design*, 16(sup1), 138-152. <https://doi.org/10.1080/14680629.2015.1029672>.

[146] Ignatavicius, S., Kavanagh, A., Brennan, M. J., Colleran, D., Sheahan, J., & Newell, S. (2021). Experimental investigation of optimum adhesion properties for anionic emulsions in road maintenance applications. *Construction and Building Materials*, 304, 124678. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124678>.

[147] Pyshyev, S., Grytsenko, Y., Solodkyy, S., Sidun, I., & Vollis, O. (2015). Using bitumen emulsions based on oxidated, distillation and modified oxidated bitumens for slurry seal production. *Chemistry & Chemical Technology*, 9(3), 359-366. <https://doi.org/10.23939/chcht09.03.359>.

[148] Samieadel, A., Oldham, D., & Fini, E. H. (2018). Investigating molecular conformation and packing of oxidized asphaltene molecules in presence of Paraffin Wax. *Fuel*, 220, 503-512. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.02.031>.

[149] Pang, J., Du, S., Chang, R., Pei, Q., & Cui, D. (2014). Effect of emulsifier content on the rheological properties of asphalt emulsion residues. *Journal of Applied Polymer Science*, 132(15). <https://doi.org/10.1002/app.41806>.

[150] Claine Petersen, J. (1998). A dual, sequential mechanism for the oxidation of petroleum asphalts. *Petroleum Science and Technology*, 16(9-10), 1023-1059. <https://doi.org/10.1080/10916469808949823>.

[151] Joly, M., & Pinto, J. M. (2003). Mixed-integer programming techniques for the scheduling of fuel oil and asphalt production. *Chemical Engineering Research and Design*, 81(4), 427-447. <https://doi.org/10.1205/026387603765173691>.

[152] Shi, K., Ma, F., Liu, J., Fu, Z., Song, R., Yuan, D., & Li, C. (2023). Rejuvenation effect of aged SBS-modified asphalt utilizing molecule analysis. *Journal of Cleaner Production*, 405, 136964. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136964>.

[153] Remišová, E., & Holý, M. (2017). Changes of properties of bitumen binders by Additives Application. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 245, 032003. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/245/3/032003>.

[154] Mashaan, N. S., Chegenizadeh, A., Nikraz, H., & Rezagholilou, A. (2021). Investigating the engineering properties of asphalt binder modified with waste plastic polymer. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(2), 1569-1574. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.08.035>.

[155] Rudyk, S. (2018). Relationships between Sara fractions of conventional oil, heavy oil, natural bitumen and residues. *Fuel*, 216, 330-340. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.12.001>.

[156] Lesueur, D. (2009). The colloidal structure of bitumen: Consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification. *Advances in Colloid and Interface Science*, 145(1-2), 42-82. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2008.08.011>.

[157] Qin, Q., Schabron, J. F., Boysen, R. B., & Farrar, M. J. (2014). Field aging effect on chemistry and rheology of asphalt binders and rheological predictions for field aging. *Fuel*, 121, 86-94. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.12.040>.

[158] Yan, Y., Yang, Y., Ran, M., Zhou, X., Zou, L., & Guo, M. (2020). Application of infrared spectroscopy in prediction of Asphalt aging time history and fatigue life.

Coatings, 10(10), 959. <https://doi.org/10.3390/coatings10100959>.

[159] Zhou, Y., Chen, J., Zhang, K., Guan, Q., Guo, H., Xu, P., & Wang, J. (2019). Study on aging performance of modified asphalt binders based on characteristic peaks and molecular weights. *Construction and Building Materials*, 225, 1077-1085. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.196>.

[160] Zhao, Y., Gu, F., Xu, J., & Jin, J. (2010). Analysis of aging mechanism of SBS polymer modified asphalt based on Fourier transform infrared spectrum. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 25(6), 1047-1052. <https://doi.org/10.1007/s11595-010-0147-3>.

[161] Cao, Z., Yu, J., Yi, J., Sun, G., Qiu, K., Xu, S., & Han, X. (2023). Effect of different rejuvenation methods on the fatigue behavior of aged SBS modified asphalt. *Construction and Building Materials*, 407, 133494. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133494>.

[162] Cao, Z., Yi, J., Ding, Y., Sun, G., & Yu, J. (2023). Effects of aging degradation and reactive reconstruction on the structure and properties of styrene-butadiene-styrene block copolymer. *Construction and Building Materials*, 391, 131808. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131808>.

[163] Concrete vs asphalt: Pavement and lighting costs in Italian Road Tunnels. (2018). SP-326: Durability and Sustainability of Concrete Structures (DSCS-2018). <https://doi.org/10.14359/51711054>.

[164] Yin, Y., Chen, H., Kuang, D., Song, L., & Wang, L. (2017). Effect of chemical composition of aggregate on interfacial adhesion property between aggregate and asphalt. *Construction and Building Materials*, 146, 231-237. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.061>.

[165] Xu, G., & Wang, H. (2016). Study of cohesion and adhesion properties of asphalt concrete with molecular dynamics simulation. *Computational Materials Science*, 112, 161-169. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2015.10.024>.

[166] Guha, A. H., & Assaf, G. J. (2020). Effects of different fillers on pavement deformation of hot mix asphalt in hot climates. *Construction and Building Materials*, 261, 119898. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119898>.

[167] Zhou, T., Cao, L., Fini, E. H., Li, L., Liu, Z., & Dong, Z. (2020). Behaviors of asphalt under certain aging levels and effects of rejuvenation. *Construction and Building Materials*, 249, 118748. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118748>.

[168] Devulapalli, L., Sarang, G., & Kothandaraman, S. (2022). Characteristics of aggregate gradation, drain down and stabilizing agents in stone matrix asphalt mixtures: A state of Art Review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 9(2), 167-179. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2021.10.007>.

[169] SOU 42.1-37641918-119:2014. cast emulsion-mineral mixtures. technical conditions - Kyiv: Ukravtodor.2014.

[170] Liñan, L. Z., Lopes, M. S., Wolf Maciel, M. R., Nascimento Lima, N. M., Filho, R. M., Embiruçu, M., & Medina, L. C. (2010). Molecular distillation of petroleum residues and physical-chemical characterization of distillate cuts obtained in the process. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 55(9), 3068-3076. <https://doi.org/10.1021/je9010807>.

[171] Guo, M., Huang, Y., Wang, L., Yu, J., & Hou, Y. (2018). Using atomic force microscopy and molecular dynamics simulation to investigate the asphalt Micro Properties. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 11(4), 321-326. <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.09.017>.

Довідки про впровадження результатів науково-дослідної роботи



上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司

SHANGHAI MUNICIPAL ENGINEERING DESIGN INSTITUTE (GROUP) CO., LTD.

CERTIFICATE

On the Implementation of the Results of a Scientific Dissertation for the Degree of
Doctor of Philosophy

Shao Meiyu

«The use of fiber from the fly ash of thermal power plants in China in modern asphalt
concrete mixtures»

Shao Meiyu's thesis research results and practical suggestions on using fly ash fibers from thermal power plants in China to modify cement and asphalt concrete have been implemented in the project of Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd. (Shanghai, China) for modification design and construction of epoxy asphalt concrete.

Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd.

Director & Chief Engineer



Zheng Xiaoguang

Feb. 12, 2023



上海交通大學

SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY

CERTIFICATE

On the Implementation of the Results of a Scientific Dissertation for the Degree of
Doctor of Philosophy

Shao Meiyu

«The use of fiber from the fly ash of thermal power plants in China in modern asphalt
concrete mixtures»

The results of the thesis research are used in the education program for bachelor's
and master's degrees in 081001 Civil Engineering, as lecture courses and practical
courses and part of laboratory work in the disciplines of "Sustainable Construction",
"CE3606 Design of Concrete Structure", and "CE2609 Civil Engineering Materials".
Also used for training Doctor of Philosophy in 081001 Civil Engineering as part of
lecture courses and practical courses in the discipline "Modification of concrete with
chemicals, mineral additives, and polymers and Construction solutions".

Shanghai Jiao Tong University
School of Naval Architecture, Ocean & Civil Engineering
Department of Civil Engineering
Professor, Ph.D. in Structural Engineering



 Song Xiaobing

Jan. 17, 2024

武汉欣巨鑫建筑工程有限公司
Wuhan Xinjuxin Construction Engineering Co., Ltd.

CERTIFICATE

On the Implementation of the Results of a Scientific Dissertation for the Degree of
Doctor of Philosophy

Shao Meiyu

«The use of fiber from the fly ash of thermal power plants in China in modern asphalt
concrete mixtures»

Shao Meiyu's thesis research results and practical suggestions on using fly ash
fibers from thermal power plants in China to modify cement and asphalt concrete have
been implemented in the project of Wuhan Xinjuxin Construction Engineering Co., Ltd.
(Wuhan, China) for modification design and construction of cast asphalt concrete.

Wuhan Xinjuxin Construction Engineering Co., Ltd.
Director & Chief Engineer



Gu Min
April 16, 2023

烟台世腾建材有限公司

Yantai Shiteng Building Materials Co., Ltd.



CERTIFICATE

On the Implementation of the Results of a Scientific Dissertation for the Degree of
Doctor of Philosophy

Shao Meiyu

«The use of fiber from the fly ash of thermal power plants in China in modern asphalt
concrete mixtures»

Shao Meiyu's thesis research results and practical suggestions on using fly ash fibers from thermal power plants in China to modify cement and asphalt concrete have been implemented in the project of Yantai Shiteng Building Materials Co., Ltd. (Yantai, China) for modification design and construction of epoxy asphalt concrete.

Yantai Shiteng Building Materials Co., Ltd.
General Manager



A handwritten signature in black ink, appearing to be '刘超' (Liu Chao).

Liu Chao

October 26, 2023

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

1. Bieliatynskyi, A., Yang, S., Pershakov, V., Shao, M., & Ta, M. (2022). Investigation of the properties and technologies of epoxy asphalt concrete preparation with the addition of fiber from fly ash of thermal power plants. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 27(5), 2070-2087. <https://doi.org/10.1080/19648189.2022.2110160>. (Included in Web of Science database)
2. Bieliatynskyi, A., Yang, S., Pershakov, V., Shao, M., & Ta, M. (2022b). Investigation of the properties of cast asphalt concrete mixture with the addition of fiber from the fly ash of Thermal power plants. *Materials Science-Poland*, 40(4), 125-146. <https://doi.org/10.2478/msp-2022-0042>. (Included in Web of Science database)
3. Bieliatynskyi, A., Yang, S., Pershakov, V., Shao, M., & Ta, M. (2022c). The use of fiber made from fly ash from power plants in China in road and airfield construction. *Construction and Building Materials*, 323, 126537. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126537>. (Included in Web of Science database)

Наукові праці апробаційного характеру:

4. Bieliatynskyi, A., Yang, S., Pershakov, V., Shao, M., & Ta, M. (2022c). Study of concrete properties based on crushed stone sand mixture and fiber of fly ash of thermal power plants. *Science and Engineering of Composite Materials*, 29(1), 412-426. <https://doi.org/10.1515/secm-2022-0167>. (Included in Web of Science database)
5. Bieliatynskyi, A., Yang, S., Pershakov, V., Shao, M., & Ta, M. (2022d). Study of crushed stone-mastic asphalt concrete using fiber from fly ash of Thermal power plants. *Case Studies in Construction Materials*, 16. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00877>. (Included in Web of Science database)
6. Bieliatynskyi, A., Yang, S., Pershakov, V., Shao, M., & Ta, M. (2022c). Peculiarities of the use of the cold recycling method for the restoration of Asphalt Concrete Pavements. *Case Studies in Construction Materials*, 16. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00872>. (Included in Web of Science database)

7. Yang, S., Bieliatynskiy, A., Pershakov, V., Shao, M., & Ta, M. (2022). Asphalt concrete based on a polymer-bitumen binder nanomodified with carbon nanotubes for road and airfield construction. *Journal of Polymer Engineering*, 42(5), 458-466. <https://doi.org/10.1515/polyeng-2021-0345>. (Included in Web of Science database)
8. Bieliatynskiy, A., Yang, S., Pershakov, V., Shao, M., & Ta, M. (2022a). Features of the hot recycling method used to repair asphalt concrete pavements. *Materials Science-Poland*, 40(2), 181-195. <https://doi.org/10.2478/msp-2022-0021>. (Included in Web of Science database)
9. Bieliatynskiy, A., Yang, S., Pershakov, V., Shao, M., & Ta, M. (2022e). Study of Carbon Nano-modifier of fly ash in cement concrete mixtures of civil engineering. *Science and Engineering of Composite Materials*, 29(1), 227-241. <https://doi.org/10.1515/secm-2022-0018>. (Included in Web of Science database)
10. Bieliatynskiy, A., Yang, S., Pershakov, V., Shao, M., & Ta, M. (2022a). Comparative analysis of the influence of various materials on the state of the roadside environment during the road repair. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(6), 15523-15530. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23212-4>. (Included in Web of Science database)
11. Bieliatynskiy, A., Yang, S., Pershakov, V., Shao, M., & Ta, M. (2023). State of the roadside environment from repair works using various materials. *Materialwissenschaft Und Werkstofftechnik*, 54(6), 717-724. <https://doi.org/10.1002/mawe.202200244>. (Included in Web of Science database)
12. Yang, S., Bieliatynskiy, A., Pershakov, V., Shao, M., & Ta, M. (2023). Exploring the use of modern fly ash materials from Chinese power plants in road and airfield infrastructure. *Environmental Engineering and Management Journal*, 22(3), 527-537. <https://doi.org/10.30638/eemj.2023.041>
13. International conference “World Conference on Nanotechnology and Materials”, online, Nov. 18-20, 2022.
14. International Academic Conference on Aviation, Water and Land Sustainable Transportation Technology in the 21st Century, Yinchuan, China, November 6-8, 2023.

15. World Congress "XXII International scientific and practical conference of higher education graduates and young scientists "Polit. Modern problems of science", Kyiv, April 4-7, 2023.

16. The Tenth World Congress "Aviation in the XXI-st century" - "Safety in Aviation and Space Technologies", Kyiv, September 28-30, 2022.

17. The 4th International Conference on Advances in Civil and Ecological Engineering Research (ACEER 2022), Xi'an, July 4th-7th, 2022.

18. VI International scientific and technical conference "Effective technologies in construction", KNUBA, Kyiv, October 26-27, 2021.

19. XII International Scientific and Practical Conference "Architecture and Ecology", National Aviation University, Kyiv, November 9-11, 2021.

20. World Congress "Polit. Modern problems of science", Kyiv, April 5-9, 2021.

21. XV International scientific and technical conference "AVIA-2021", Kyiv, April 20-22, 2021.