

Національний транспортний університет
Міністерства освіти і науки України

Національний транспортний університет
Міністерства освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ЧИЖЕНКО НАТАЛІЯ ПЕТРІВНА

УДК 625.84

ДИСЕРТАЦІЯ

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ ОЦІНКИ ДОВГОВІЧНОСТІ ЦЕМЕНТОБЕТОННОГО ПОКРИТТЯ АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ

05.22.11 – автомобільні шляхи та аеродроми

Архітектура та будівництво

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

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

Науковий керівник –
Онищенко Артур Миколайович
доктор технічних наук,
доцент

Ідентичність усіх примірників дисертації
Засвідчую
Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 26.059.02
_____ О.Ю. Усиченко

Київ – 2021

АНОТАЦІЯ

Чиженко Н.П. Удосконалення методу оцінки довговічності цементобетонного покриття автомобільних доріг.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.11 «Автомобільні шляхи та аеродроми». (192 – Будівництво та цивільна інженерія). – Національний транспортний університет, Київ, 2021.

У дисертаційній роботі представлено нове рішення актуального питання щодо методу оцінки довговічності цементобетонного покриття на автомобільних дорогах з урахуванням спільного впливу усадки бетону, зміни температури та дії пневматичних коліс транспортних засобів, що дозволяє проектувати цементобетонне покриття підвищеної довговічності із заданим строком служби. Отримано аналітичну залежність та встановлено критерій граничного стану для оцінки довговічності за тріщиностійкістю цементобетонного покриття.

Розроблена методика розрахунку, яка дозволяє проектувати цементобетонне покриття на автомобільних дорогах підвищеної довговічності за рахунок використання комплексних хімічних добавок з урахуванням спільного впливу усадки цементобетону, зміни температури та дії пневматичних коліс транспортних засобів. Отримано розрахункові значення параметрів функції модуля пружності з урахуванням різного часу дії навантаження та температури; функції довговічності та показники втоми.

Ключові слова: автомобільна дорога, цементобетон, покриття, довговічність, усадка, температура, навантаження, міра пошкодження, хімічна добавка.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

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

1. A.N. Onyshchenko, A.S. Lapchenko, N.P. Chyzhenko, S.P. Voznyi Evaluation of inflammatory concerns in cementbound and other cemento-layers of road clothing for care and health. *Slovak international scientific journal*. Slovakia. 2019. № 27. P. 8-13. <http://sis-journal.com/wp-content/uploads/2019/04/Slovak-international-scientific-journal-No27-2019.pdf>

Статті у фахових виданнях:

2. Чистяков В.В., Шургая А.Г., Дорошенко Ю.М., Чиженко Н.П., Сербін В.П., Дорошенко О.Ю. Вплив комплексної добавки на структуроутворення і властивості цементобетонну для покриття доріг. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво: наук.-техн. збірник*. Київ. 2011. Вип. 82. - С. 59-64.

3. Чистяков В.В., Шургая А.Г., Дорошенко Ю.М., Чиженко Н.П. Цементобетони для покриття доріг. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво: наук.-техн. збірник*. Київ. 2012. Вип. 85. С. 48-55.

4. Гамеляк І.П., Шургая А.Г., Якименко Я.М., Чиженко Н.П. Карпюк О.А. Порівняння сучасних добавок для високоміцного дорожнього бетону. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво: наук.-техн. збірник*. Київ. 2014. Вип. 92. С. 38 – 49.

5. Чиженко Н.П. Оцінка тріщиностійкості модифікованого дорожнього бетону. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво: наук.-техн. збірник*. Київ. 2016. Вип. 97. С. 20– 26.

6. Гамеляк І.П., Шургая А.Г., Якименко Я.М., Чиженко Н.П. Математичні моделі властивостей високоміцних цементобетонів для

дорожнього будівництва. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. Харків. 2017. Вип. 169. С. 103-111.

7. Онищенко А.М., Лапченко А.С., Чиженко Н.П. «Оцінка напружень від усадки в цементобетонному покритті автомобільних доріг». *Вісник НУЛП*, серія «Теорія та практика будівництва» Львів. 2019. № 912. С. 132 - 138.

8. Онищенко А.М., Гаркуша М.В., Чиженко Н.П. Перевірка відповідності гранулометричного складу цементобетонних сумішей. *Вісник ХНАДУ*, 2019. Вип.86. С.53 – 63. DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2019.86.2.53

9. Онищенко А.М., Чиженко Н.П. Оцінка довговічності цементобетонного покриття автомобільних доріг. *Дороги і мости*. Київ, 2020. Вип. 22. С. 138-148. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2020.22.138>

10. Онищенко А.М., Худолій С.М., Чиженко Н.П. Числове моделювання впливу розташування транспортного навантаження на цементобетонне покриття автомобільних доріг. *Вісник НТУ*. Серія «Технічні науки»: наук.-техн. збірник. Київ. 2020. Вип. 46. С.237-253.

Опубліковані праці апробаційного характеру:

11. Шургая А.Г. Гамеляк И.П., Якименко Я.Н Шургая А.Г., Гудименко К.В., Чиженко Н.П. Теоретические и практические аспекты улучшения технологических показателей, экономической целесообразности и долговечности высокопрочных цементобетонов в дорожном строительстве. *Будівельні матеріали, вироби та санітарна техніка*, наук.-техн. збірник. Київ. 2013. Вип. 49. С.154–163.

12. Шургая А.Г., Гамеляк И.П., Якименко Я.Н., Чиженко Н.П.,,, Чиженко Н.П. Высокопрочный цементобетон с комплексными добавками для дорожного и аэродромного строительства. *Автомобильные дороги и мосты*. Минск. 2015. № 2 (16). С.69-74.

13. Шургая А.Г., Чиженко Н.П. Высокопрочный бетон в дорожном строительстве (теоретические аспекты). *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*: наук.-техн. збірник. Київ.2016. Вип. 96. С. 43 – 49.

14. Шургая А.Г., Гамеляк И.П., Якименко Я.Н., Чиженко Н.П., Карпюк А.А. Высокопрочный цементобетон с комплексными добавками. *Мир дорог*. Санкт-Петербург. 2017. № 98. С.72-78.

15. Дорошенко Ю.М., Дорошенко О. Ю., Борковський П.П., Чиженко Н.П., Куцоконь О., Наконешна Я. Технологічні методи регулювання властивостей бетону. *Будівельні матеріали, вироби та санітарна техніка*, наук.-техн. збірник. Київ. 2014. Вип. 51. С.50 – 54.

16. Гамеляк І.П., Шургая А.Г., Якименко Я.М., Дмитриченко А.М., Чиженко Н.П. Удосконалення технології влаштування монолітного парапетного огороження типу “Нью-Джерсі”. *Вісник НТУ*. Серія «Технічні науки»: наук.-техн. збірник. Київ. 2016. Вип.1 (34). С.78 – 88.

17. Онищенко А.М., Гаркуша М.В., Чиженко Н.П. Розробка методики оцінки довговічності цементобетонного покриття на автомобільних дорогах з урахуванням спільного впливу зміни температури та дії транспорту. *Збірник матеріалів I Міжнародної науково – технічної конференції “Дорожно-будівельний комплекс: проблеми, перспективи, інновації”*.м. Харків, ХНАДУ, 2019. – с. 197-198.

18. Онищенко А.М., Гаркуша М.В., Чиженко Н.П.. Розробка методики оцінки довговічності цементобетонного покриття на автомобільних дорогах з урахуванням спільного впливу зміни температури та дії транспорту. *Збірник матеріалів I Міжнародної науково – технічної конференції “Дорожно-будівельний комплекс: проблеми, перспективи, інновації”*.м. Харків, ХНАДУ, 2019. – с. 197-198.

19. Онищенко А.М., Чиженко Н.П. Метод оцінки довговічності цементобетонного покриття автомобільних доріг. *Збірник тез міжнародної науково-технічної конференції Гідротехнічне і транспортне будівництво*. Одеса. 28-29 травня 2020 р. С.85-89.

Опубліковані праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

20. Мозговий В.В., Пугач М.О., Мозгова Л.А., Куцман О.М., Чиженко Н.П., Соколюк М.Ю. Напрямки застосування золошлаків ТЕС у будівництві автомобільних доріг. *Вісник НТУ. Серія «Технічні науки»: наук.-техн. збірник*. Київ. 2014. Вип. 29. С. 199-205.

21. Чиженко Н.П. Дослідження можливості застосування латексів як полімерної добавки в цементний бетон. *Будівельні матеріали, виробництва та санітарна техніка*, наук.-техн. збірник. Київ. 2009. Вип. 33. – С.68 – 73.

22. Чиженко Н.П. Вплив полімерної добавки на фізико-механічні властивості цементобетонного покриття доріг. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*: наук.-техн. збірник. Київ. 2008. Вип. 75. С. 153 – 157.

23. Дорошенко Ю.М., Дорошенко О. Ю., Борковський П.П., Чиженко Н.П. Модифікація дорожнього цементобетону відходами хімічної промисловості. *Автошляховик України*: наук.-виробн. журнал. 2011. № 6. С.42-45.

Свідоцтва та патенти:

24. Свідоцтво України про реєстрацію авторського права на твір № 73075 Україна. Літературний письмовий твір науково-технічного характеру «Стандарт організації України. Дорожньо-будівельні матеріали. Визначення розрахункових модулів пружності. СОУ 45.2-00018112-059 Проект» // Мозговий В.В., Онищенко А.М., Баран С.А., Куцман О.М., Лаптева Н.С., Чиженко Н.П., Гудіменко К.В. Дата реєстрації 25.07.2017 р.

25. Свідоцтво України про реєстрацію авторського права на твір № 81519 Україна. Літературний письмовий твір науково-технічного характеру «Оцінка відповідності гранулометричного складу цементобетонних дорожніх сумішей» // Онищенко А.М., Гаркуша М.В., Чиженко Н.П. Дата реєстрації 14.09.2018 р.

26. Свідоцтво України про реєстрацію авторського права на твір № 81519 Україна. Літературний письмовий твір науково-технічного характеру.

«Удосконалення методу проектування складу високоміцного дорожнього цементобетону» // Чиженко Н.П. Дата реєстрації 14.09.2018 р.

27. Свідоцтво України про реєстрацію авторського права на твір № 81520 Україна. Літературний письмовий твір науково-технічного характеру. «Підвищення довговічності дорожнього цементобетону за рахунок використання комплексної хімічної добавки» // Чиженко Н.П. Дата реєстрації 14.09.2018 р.

28. Свідоцтво України про реєстрацію авторського права на твір № 85058 Україна. Літературний письмовий твір науково-технічного характеру. «Напруження усадки в цементобетонних та інших цементовмісних шарах дорожнього одягу при тужавінні та твердінні» // Онищенко А.М., Лапченко А.С., Чиженко Н. П. Дата реєстрації 31.01.2019 р.

29. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 97238 Україна. Літературний письмовий твір науково-технічного характеру. «Методологія розрахунку цементобетонного покриття автомобільних доріг на довговічність» // Онищенко А.М., Лапченко А.С., Чиженко Н.П. Дата реєстрації 15.04.2020 р.

ABSTRACT

N. Chyzenko Improving the method of assessing the durability of cement-concrete pavement. - As a manuscript.

The dissertation for candidate of technical sciences degree in specialty 05.22.11 «Highways and airfields». (192 – Construction and Civil Engineering). – NATIONAL TRANSPORT UNIVERSITY, Kyiv, 2021.

The dissertation presents a new solution to the topical issue of the method of cement-concrete pavement on highways durability assessing, taking into account the combined effect of concrete shrinkage, temperature changes and action of vehicles pneumatic wheels, which allows to design increased durability cement-concrete pavement.

The analytical dependence and the criterion of the limit state for the durability assessment by cement-concrete pavement crack resistance, which allows

to take into account the complex action of factors, namely concrete shrinkage, temperature change and the action of vehicles pneumatic wheels. The elastic behavior, strength characteristics and durability of cement concrete based on complex chemical additives have been experimentally studied. The calculated characteristics and durability parameters of the studied cement concretes with the use of a complex chemical additive are established, as well as the comparison of the obtained experimental data with the theoretical results. Such techniques as: testing of cement concrete for cyclic fatigue, which will assess the impact of complex additives on durability; determination of cement concrete elasticity modulus taking into account the different time of the load and temperature action, which is necessary for the cement concrete pavement durability assessment calculation were further developed. A regression dependence of predicting the cement concrete optimal composition depending on the different amount of complex admixture was designed. It allows you to directly adjust the properties of concrete by indicators: water-cement ratio, cone draft, compressive strength, modulus of elasticity, tensile strength in bending.

The results of experimental studies proved that due to the complex chemical additives use it can directly affect on the cement concrete mixture technological properties and on the cement concrete structure. It confirmed by tensile strength increasing in bending compared to the control composition by 30%, increasing early compressive strength by 30%, and 25% of brand strength, increase of cement concrete frost resistance per mark, increase of water resistance in 3 times, reduction of abrasion by 40% in comparison with control structure.

The practical significance of the obtained results is that a calculation method that allows to design cement-concrete pavement on high-durability roads through the use of complex chemical additives taking into account the combined effect of concrete shrinkage, temperature change and action of pneumatic wheels has been developed. In addition: complex chemical additives of multifunctional action are developed and their influence on technological processes of cement concrete structure formation and hardening is investigated; obtained for the cement concrete

study: the calculated values of the elasticity modulus parameters, taking into account the different time of the load and temperature action; the tensile strength in bending, taking into account the different amounts of complex chemical additives; functions of longevity and fatigue rates; the technological properties of the cement-concrete mixture are determined, the calculated characteristics and physical and mechanical properties of cement-concrete for paving of highways are established and the comparison with the modern chemical additive analogous to foreign production is carried out; the methodology of cement-concrete road mixes granulometric composition determination at quality operational control is offered.

The results of the work were used: in the development of regulations: Methods for assessing the cement-concrete pavement durability, taking into account the joint impact of changes in temperature and transport action; Methods for determining the cement-concrete road mixtures particle size distribution; Additives for concrete and building mixture complex "Shag". Practical measures to increase the durability of cement concrete pavement on the roads of Ukraine, taking into account the cement concrete shrinkage, temperature changes, the mode of vehicles loads, the traffic composition and intensity, the pavement design have been developed.

The results of dissertation research were used in the development of 5 normative document for the design, construction, reconstruction, repair and maintenance of cement-concrete roads pavement in Ukraine. These studies have found their practical application in the NTU educational process at the Transport Construction Faculty in lectures, practical classes, internships, diploma projects and master's theses.

Economic efficiency of the research results implementation, due to the use of complex chemical additive Shag-PA in the amount of 1.1% by cement weight allows to achieve a specific economic effect - 61.15 UAH/m³ of cement concrete compared to the similar foreign manufacturer additive .

Key words: highway, cement concrete, covering, durability, shrinkage, temperature, loading, degree of damage, chemical additive.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

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

1. A.N. Onyshchenko, A.S. Lapchenko, N.P. Chyzenko, S.P. Voznyi Evaluation of inflammatory concerns in cementbound and other cemento-layers of road clothing for care and health. *Slovak international scientific journal*. Slovakia. 2019. № 27. P. 8-13. <http://sis-journal.com/wp-content/uploads/2019/04/Slovak-international-scientific-journal-No27-2019.pdf>

Статті у фахових виданнях:

2. Чистяков В.В., Шургая А.Г., Дорошенко Ю.М., Чиженко Н.П., Сербін В.П., Дорошенко О.Ю. Вплив комплексної добавки на структуроутворення і властивості цементобетонну для покриття доріг. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво: наук.-техн. збірник*. Київ. 2011. Вип. 82. - С. 59-64.

3. Чистяков В.В., Шургая А.Г., Дорошенко Ю.М., Чиженко Н.П. Цементобетони для покриття доріг. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво: наук.-техн. збірник*. Київ. 2012. Вип. 85. С. 48-55.

4. Гамеляк І.П., Шургая А.Г., Якименко Я.М., Чиженко Н.П. Карпюк О.А.. Порівняння сучасних добавок для високоміцного дорожнього бетону. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво: наук.-техн. збірник*. Київ. 2014. Вип. 92. С. 38 – 49.

5. Чиженко Н.П. Оцінка тріщиностійкості модифікованого дорожнього бетону. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво: наук.-техн. збірник*. Київ. 2016. Вип. 97. С. 20– 26.

6. Гамеляк І.П., Шургая А.Г., Якименко Я.М., Чиженко Н.П. Математичні моделі властивостей високоміцних цементобетонів для дорожнього будівництва. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. Харків. 2017. Вип. 169. С. 103-111.

7. Онищенко А.М., Лапченко А.С., Чиженко Н.П. «Оцінка напружень від усадки в цементобетонному покритті автомобільних доріг». *Вісник НУЛП*, серія «Теорія та практика будівництва» Львів. 2019. № 912. С. 132 - 138.

8. Онищенко А.М., Гаркуша М.В., Чиженко Н.П. Перевірка відповідності гранулометричного складу цементобетонних сумішей. *Вісник ХНАДУ*, 2019. Вип.86. С.53 – 63. DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2019.86.2.53

9. Онищенко А.М., Чиженко Н.П. Оцінка довговічності цементобетонного покриття автомобільних доріг. *Дороги і мости*. Київ, 2020. Вип. 22. С. 138-148. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2020.22.138>

10. Онищенко А.М., Худолій С.М., Чиженко Н.П. Числове моделювання впливу розташування транспортного навантаження на цементобетонне покриття автомобільних доріг. *Вісник НТУ*. Серія «Технічні науки»: наук.-техн. збірник. Київ. 2020. Вип. 46. С.237-253.

Опубліковані праці апробаційного характеру:

11. Шургая А.Г. Гамеляк И.П., Якименко Я.Н Шургая А.Г., Гудименко К.В., Чиженко Н.П. Теоретические и практические аспекты улучшения технологических показателей, экономической целесообразности и долговечности высокопрочных цементобетонов в дорожном строительстве. *Будівельні матеріали, вироби та санітарна техніка*, наук.-техн. збірник. Київ. 2013. Вип. 49. С.154–163.

12. Шургая А.Г., Гамеляк И.П., Якименко Я.Н., Чиженко Н.П., Чиженко Н.П. Высокопрочный цементобетон с комплексными добавками для дорожного и аэродромного строительства. *Автомобильные дороги и мосты*. Минск. 2015. № 2 (16). С.69-74.

13. Шургая А.Г., Чиженко Н.П. Высокопрочный бетон в дорожном строительстве (теоретические аспекты). *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*: наук.-техн. збірник. Київ.2016. Вип. 96. С. 43 – 49.

14. Шургая А.Г., Гамеляк И.П., Якименко Я.Н., Чиженко Н.П., Карпюк А.А. Высокопрочный цементобетон с комплексными добавками. *Мир дорог*. Санкт-Петербург. 2017. № 98. С.72-78.

15. Дорошенко Ю.М., Дорошенко О. Ю., Борковський П.П., Чиженко Н.П., Куцоконь О., Наконешна Я. Технологічні методи регулювання властивостей бетону. *Будівельні матеріали, вироби та санітарна техніка, наук.-техн. збірник*. Київ. 2014. Вип. 51. С.50 – 54.

16. Гамеляк І.П., Шургая А.Г., Якименко Я.М., Дмитриченко А.М., Чиженко Н.П. Удосконалення технології влаштування монолітного парапетного огороження типу “Нью-Джерсі”. *Вісник НТУ*. Серія «Технічні науки»: наук.-техн. збірник. Київ. 2016. Вип.1 (34). С.78 – 88.

17. Онищенко А.М., Гаркуша М.В., Чиженко Н.П. Розробка методики оцінки довговічності цементобетонного покриття на автомобільних дорогах з урахуванням спільного впливу зміни температури та дії транспорту. *Збірник матеріалів I Міжнародної науково – технічної конференції “Дорожно-будівельний комплекс: проблеми, перспективи, інновації”*. м. Харків, ХНАДУ, 2019. – с. 197-198.

18. Онищенко А.М., Гаркуша М.В., Чиженко Н.П.. Розробка методики оцінки довговічності цементобетонного покриття на автомобільних дорогах з урахуванням спільного впливу зміни температури та дії транспорту. *Збірник матеріалів I Міжнародної науково – технічної конференції “Дорожно-будівельний комплекс: проблеми, перспективи, інновації”*. м. Харків, ХНАДУ, 2019. – с. 197-198.

19. Онищенко А.М., Чиженко Н.П. Метод оцінки довговічності цементобетонного покриття автомобільних доріг. *Збірник тез міжнародної науково-технічної конференції Гідротехнічне і транспортне будівництво*. Одеса. 28-29 травня 2020 р. С.85-89.

Опубліковані праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

20. Мозговий В.В., Пугач М.О., Мозгова Л.А., Куцман О.М., Чиженко Н.П., Соколюк М.Ю. Напрямки застосування золошлаків ТЕС у будівництві автомобільних доріг. *Вісник НТУ. Серія «Технічні науки»: наук.-техн. збірник*. Київ. 2014. Вип. 29. С. 199-205.

21. Чиженко Н.П. Дослідження можливості застосування латексів як полімерної добавки в цементний бетон. *Будівельні матеріали, виробництва та санітарна техніка*, наук.-техн. збірник. Київ. 2009. Вип. 33. – С.68 – 73.

22. Чиженко Н.П. Вплив полімерної добавки на фізико-механічні властивості цементобетонного покриття доріг. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*: наук.-техн. збірник. Київ. 2008. Вип. 75. С. 153 – 157.

23. Дорошенко Ю.М., Дорошенко О. Ю., Борковський П.П., Чиженко Н.П. Модифікація дорожнього цементобетону відходами хімічної промисловості. *Автошляховик України*: наук.-виробн. журнал. 2011. № 6. С.42-45.

Свідоцтва та патенти:

24. Свідоцтво України про реєстрацію авторського права на твір № 73075 Україна. Літературний письмовий твір науково-технічного характеру «Стандарт організації України. Дорожньо-будівельні матеріали. Визначення розрахункових модулів пружності. СОУ 45.2-00018112-059 Проект» // Мозговий В.В., Онищенко А.М., Баран С.А., Куцман О.М., Лаптева Н.С., Чиженко Н.П., Гудіменко К.В. Дата реєстрації 25.07.2017 р.

25. Свідоцтво України про реєстрацію авторського права на твір № 81519 Україна. Літературний письмовий твір науково-технічного характеру «Оцінка відповідності гранулометричного складу цементобетонних дорожніх сумішей» // Онищенко А.М., Гаркуша М.В., Чиженко Н.П. Дата реєстрації 14.09.2018 р.

26. Свідоцтво України про реєстрацію авторського права на твір № 81519 Україна. Літературний письмовий твір науково-технічного характеру.

«Удосконалення методу проектування складу високоміцного дорожнього цементобетону» // Чиженко Н.П. Дата реєстрації 14.09.2018 р.

27. Свідоцтво України про реєстрацію авторського права на твір № 81520 Україна. Літературний письмовий твір науково-технічного характеру. «Підвищення довговічності дорожнього цементобетону за рахунок використання комплексної хімічної добавки» // Чиженко Н.П. Дата реєстрації 14.09.2018 р.

28. Свідоцтво України про реєстрацію авторського права на твір № 85058 Україна. Літературний письмовий твір науково-технічного характеру. «Напруження усадки в цементобетонних та інших цементовмісних шарах дорожнього одягу при тужавінні та твердінні» // Онищенко А.М., Лапченко А.С., Чиженко Н. П. Дата реєстрації 31.01.2019 р.

29. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 97238 Україна. Літературний письмовий твір науково-технічного характеру. «Методологія розрахунку цементобетонного покриття автомобільних доріг на довговічність» // Онищенко А.М., Лапченко А.С., Чиженко Н.П. Дата реєстрації 15.04.2020 р.

ЗМІСТ

ВСТУП.	20
РОЗДІЛ 1	
АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЦЕМЕНТОБЕТОННОГО ПОКРИТТЯ АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ	29
1.1 Основні передумови досліджень	29
1.2 Причини утворення тріщин в цементобетонному покритті автомобільних доріг	33
1.3 Аналіз методів та критеріїв оцінки довговічності цементобетонного покриття автомобільних доріг	38
1.4 Методи та критерії розрахунку напружень в цементобетонному покритті від температури	42
1.5 Методи та критерії розрахунку напружень в цементобетонному покритті від усадки	47
1.6 Методи та критерії розрахунку напружень в цементобетонному покритті від дії транспортного навантаження	48
1.7 Існуючі способи підвищення довговічності цементобетонного покриття автомобільних доріг	51
1.8 Висновки по розділу, мета та задачі дослідження	57
РОЗДІЛ 2	
ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ РОЗРАХУНКУ ЦЕМЕНТОБЕТОННОГО ПОКРИТТЯ АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ НА ДОВГОВІЧНІСТЬ	59
2.1 Концептуальні положення з розрахунку цементобетонного покриття на автомобільних дорогах	59

2.2	Аналітичний метод розрахунку цементобетонного покриття на автомобільних дорогах з урахуванням спільного впливу усадки цементобетону, зміни температури та дії пневматичних коліс транспортних засобів	60
2.3	Визначення міри пошкодження цементобетонного покриття на автомобільних дорогах від розтягуючих напружень, що виникають внаслідок дії пневматичних коліс транспортних засобів	71
2.4	Визначення міри пошкодження цементобетонного покриття автомобільних доріг від температурних напружень, що виникають внаслідок добових і річних температурних коливань	75
2.5	Визначення міри пошкодження цементобетонного покриття автомобільних доріг від усадки бетону при твердінні	83
2.6	Оцінка довговічності цементобетонного покриття автомобільних доріг з урахуванням спільного впливу усадки цементобетону, зміни температури та дії пневматичних коліс транспортних засобів	87
2.7	Висновки по розділу	88
Розділ 3.	ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЧИСЛОВИЙ АНАЛІЗ ЦЕМЕНТОБЕТОННОГО ПОКРИТТЯ АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ	91

3.1	Об'єкти експериментальних досліджень	92
3.2	Методики визначення властивостей об'єктів досліджень	93
3.3	Результати проведення лабораторних експериментальних досліджень властивостей цементобетону для покриттів автомобільних доріг	105
3.3.1	Проведення натурних досліджень цементобетонного покриття автомобільних доріг	106
3.3.2	Аналіз результатів оптимізації складів цементобетонів для покриття автомобільних доріг	110
3.3.3	Визначення технологічних властивостей цементобетонної суміші	115
3.3.4	Визначення розрахункових характеристик цементобетонів для покриття автомобільних доріг	116
3.3.5	Визначення фізико-механічних властивостей цементобетонів для покриття автомобільних доріг	120
3.3.6	Результати визначення тріщиностійкості цементобетону для покриття автомобільних доріг	123
3.3.7	Визначення залежності модуля пружності цементобетону від різного часу дії навантаження та температури	128
3.3.8	Визначення параметрів функції довговічності цементобетонних зразків при постійному росту навантаження	130
3.3.9	Перевірка адекватності теоретичних рішень	130

3.4	Числове моделювання впливу розташування транспортного навантаження на цементобетонне покриття автомобільних доріг	132
3.5	Висновки по розділу	139
Розділ 4	ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ТА МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ЦЕМЕНТОБЕТОННОГО ПОКРИТТЯ НА АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРОГАХ ПІДВИЩЕНОЇ ДОВГОВІЧНОСТІ	142
4.1	Рецептурно – структурні заходи підвищення довговічності цементобетонного покриття автомобільних доріг	143
4.2	Конструктивні заходи підвищення довговічності цементобетонного покриття автомобільних доріг	156
4.3	Технологічні заходи підвищення довговічності цементобетонного покриття автомобільних доріг	162
4.4	Практичне впровадження наукових досліджень	170
4.5	Висновки по розділу	171
	ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	173
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	176
ДОДАТОК А	КРИТЕРІЇ ТА МЕТОДИ ОЦІНКИ ДОВГОВІЧНОСТІ ЦЕМЕНТОБЕТОННОГО ПОКРИТТЯ АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ	198

ДОДАТОК Б	ХАРАКТЕРИСТИКА МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ЛАБОРАТОРНИХ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА СКЛАДИ ДОСЛІДЖУВАНИХ ЦЕМЕНТОБЕТОНІВ	219
ДОДАТОК В	РЕЗУЛЬТАТИ ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ ВИТРАТИ КОМПЛЕКСНОЇ ХІМІЧНОЇ ДОБАВКИ І ЦЕМЕНТУ НА ТЕХНОЛОГІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЦЕМЕНТОБЕТОННОЇ СУМІШІ, НА МІЦНІСТЬ, МОДУЛЬ ПРУЖНОСТІ ЦЕМЕНТОБЕТОНУ ДЛЯ ПОКРИТТЯ АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ	225
ДОДАТОК Г	РЕЗУЛЬТАТИ ЧИСЛОВОГО МОДЕЛЮВАННЯ	228
ДОДАТОК Д	РЕЗУЛЬТАТИ СТЕНДОВИХ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	235
ДОДАТОК Е	ПРИКЛАД РОЗРАХУНКУ ДОВГОВІЧНОСТІ ЦЕМЕНТОБЕТОННОГО ПОКРИТТЯ АВТОМОБІЛЬНОЇ ДОРОГИ З ВИКОРИСТАННЯМ КОМПЛЕКСНОЇ ХІМІЧНОЇ ДОБАВКИ З УРАХУВАННЯМ СПІЛЬНОГО ВПЛИВУ УСАДКИ ЦЕМЕНТОБЕТОНУ, ЗМІНИ ТЕМПЕРАТУРИ ТА ДІЇ ПНЕВМАТИЧНИХ КОЛІС ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ	240
ДОДАТОК Ж	ДОВІДКИ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ	257
ДОДАТОК К	СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ	289

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. Досвід останніх років експлуатації цементобетонного покриття автомобільних доріг України показує, що одним з найпоширеніших дефектів на покритті від впливу усадки цементобетону, зміни температури та зростання параметрів транспортних навантажень є різного роду тріщини, які призводять до зменшення його строку служби, а відповідно і всієї конструкції дорожнього одягу в цілому. Утворення тріщин призводять як до зменшення довговічності самого покриття, так і до погіршення безпеки дорожнього руху, в результаті прояву нерівності, погіршення умов маневрування транспортних засобів під час руху, що у свою чергу не дозволяє повною мірою забезпечити комфортне та безпечне перевезення пасажирів і вантажів, а також впливає на зниження пропускнуої здатності автомобільних доріг.

Ремонт дефектів цементобетонного покриття у вигляді тріщин є складним, трудомістким та фінансово витратним процесом, що супроводжується значними матеріальними та енергетичними затратами. Окрім того, виконання ремонтних робіт по усуненню тріщин не завжди призводить до бажаного результату. Як відомо, на практиці широко використовують типові конструкції жорсткого дорожнього одягу для автомобільних доріг, які не завжди забезпечують необхідну довговічність за тріщиностійкістю, а методи їх розрахунку є недосконалими.

На сьогоднішній день існуючі методи та критерії оцінки довговічності цементобетонного покриття носять розрізнений характер, так як при оцінці довговічності цементобетонного покриття враховується окремо або лише дія пневматичних коліс транспортних засобів або дія зміни температури при цьому розрахунок напружень від усадки цементобетону при твердінні не враховується взагалі, що може свідчити про відсутність такого розрахунку. Врахування спільного впливу усадки цементобетону, зміни температури та дії пневматичних коліс транспортних засобів при оцінюванні тріщиностійкості цементобетонного покриття дозволило б більш об'єктивно проводити розрахунки на довговічність таких покриттів із заданим строком служби.

Однією з причин зменшення строку експлуатації цементобетонного покриття автомобільних доріг є недостатнє вивчення та використання хімічних добавок з метою направленою регулювання властивостей цементобетону.

Улаштування цементобетонного покриття з покращеними його властивостями за рахунок використання комплексних хімічних добавок, а також врахування спільного впливу усадки цементобетону, зміни температури та дії пневматичних коліс транспортних засобів при проектуванні такого покриття дозволить підвищити його довговічність, що в свою чергу впливає на зменшення грошових витрат при ремонті та утриманні не лише цементобетонного покриття, а і дорожньої конструкції автомобільної дороги в цілому.

Таким чином, актуальність роботи обумовлена необхідністю вирішення важливої науково-практичної задачі – підвищення довговічності цементобетонного покриття автомобільних доріг за рахунок використання комплексних хімічних добавок з урахуванням спільного впливу усадки цементобетону, зміни температури та дії пневматичних коліс транспортних засобів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Тема дисертації відповідає напрямам і завданням державних науково-технічних програм: «Національна транспортна стратегія України на період до 2030 року» (Розпорядження Кабінету міністрів України від 30.05.2018 р. № 430-р), «Державна цільова економічна програма розвитку автомобільних доріг загального користування державного значення на 2018-2022 роки» (Розпорядження Кабінету міністрів України від 21.03.2018 р. № 382). Основні дослідження теоретичного і прикладного характеру виконані згідно з тематикою науково-дослідних робіт, що виконувались на кафедрах дорожньо-будівельних матеріалів і хімії та мостів, тунелів та гідротехнічних споруд Національного транспортного університету та планами науково-дослідних і проектно-конструкторських робіт Державного агентства автомобільних доріг України «Укравтодор», в рамках виконання господарсько-договірних науково-дослідних робіт: «Розробити технології і нормативну документацію з приготування дорожніх цементобетонних сумішей з подовженим строком транспортування» (д/б №157-08, державний реєстраційний № 0108U006055); «Підвищення надійності конструкцій дорожніх та аеродромних покриттів при використанні високоміцного бетону» (д/б № 29, державний

реєстраційний № 0113U000298); «Наукові основи прогнозування термомеханічних процесів в багатошаровому напівпросторі (на прикладі дорожнього покриття) для оцінки ресурсів підвищення його довговічності (д/б № 29, державний реєстраційний 0116U002631); «Провести дослідження та розробити методику визначення гранулометричного складу цементобетонних дорожніх сумішей при операційному контролі якості» (д/б 56-17, державний реєстраційний № 0117U001967); «Провести дослідження та розробити методику оцінки довговічності цементобетонного дорожнього покриття з урахуванням спільного впливу змін температури та дії транспорту» (д/б 47-19, державний реєстраційний № 0119U101504).

Мета і задачі досліджень. *Мета* досліджень – удосконалення методу оцінки довговічності цементобетонного покриття автомобільних доріг з урахуванням спільного впливу усадки цементобетону, зміни температури та дії пневматичних коліс транспортних засобів.

Для досягнення мети роботи необхідно вирішити наступні *задачі*:

- провести аналіз умов роботи і стану цементобетонного покриття автомобільних доріг з урахуванням спільного впливу усадки цементобетону, зміни температури та дії пневматичних коліс транспортних засобів;

- розробити розрахункову схему та встановити аналітичну залежність для удосконалення методу оцінки довговічності цементобетонного покриття автомобільних доріг за тріщиностійкістю від спільного впливу усадки цементобетону, зміни температури та дії пневматичних коліс транспортних засобів;

- експериментально дослідити: розрахункові характеристики цементобетону з використанням комплексних хімічних добавок; модуль пружності з урахуванням різного часу дії навантаження і температури, параметри функції довговічності; лабораторні та стендові дослідження впливу комплексної хімічної добавки на тріщиностійкість цементобетону; моделювання максимальних розтягуючих напружень в цементобетонному покритті автомобільних доріг від дії пневматичних коліс транспортного засобу; закономірності дії комплексної хімічної добавки на особливості твердіння, будівельно-технологічні властивості суміші та фізико-механічні властивості цементобетону;

— розробити рекомендації та методику розрахунку щодо підвищення довговічності цементобетонного покриття автомобільних доріг.

Об’єкт дослідження — процес спільного впливу усадки цементобетону, зміни температури та дії пневматичних коліс транспортних засобів на цементобетонне покриття автомобільних доріг.

Предмет дослідження — встановлення закономірностей впливу факторів на довговічність цементобетонного покриття автомобільних доріг.

Методи дослідження — аналітично-експериментальні з використанням положень теорії пружності, кінетичної теорії міцності твердих тіл, стандартизовані та спеціальні методики дослідження властивостей цементобетону, експериментальних методів дослідження утворення тріщини в цементобетонному покритті автомобільних доріг; числового моделювання; математичної статистики.

Наукова новизна отриманих результатів:

— вперше отримано аналітичну залежність та встановлено критерій граничного стану для оцінки довговічності за тріщиностійкістю цементобетонного покриття автомобільних доріг, що дозволяє враховувати комплексну дію факторів, а саме: усадку цементобетону, зміну температури та дію пневматичних коліс транспортних засобів;

— удосконалено метод оцінки довговічності цементобетонного покриття на автомобільних дорогах з урахуванням спільного впливу усадки цементобетону, зміни температури та дії пневматичних коліс транспортних засобів, що дозволяє проектувати цементобетонне покриття підвищеної довговічності із заданим строком служби;

— отримали подальший розвиток такі методики, як: випробування цементобетону на втому, що дозволить оцінювати вплив комплексних хімічних добавок на довговічність; визначення модуля пружності цементобетону з урахуванням різного часу дії навантаження та температури, що необхідно для здійснення розрахунків для оцінки довговічності цементобетонного покриття;

— розроблено регресійні залежності прогнозування оптимального складу цементобетону в залежності від різної кількості комплексної хімічної добавки та портландцементу, що дозволяє направлено регулювати властивості цементобетонної суміші та цементобетону за показниками: водоцементне співвідношення, рухомості, вмісту залученого повітря, міцності на розтяг при згині, міцності при стиску, модуля пружності, вартості.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що розроблена методика розрахунку, яка дозволяє проєктувати цементобетонне покриття на автомобільних дорогах підвищеної довговічності за рахунок використання комплексних хімічних добавок із урахуванням спільного впливу усадки цементобетону, зміни температури та дії пневматичних коліс транспортних засобів. Окрім того:

— розроблено комплексні хімічні добавки поліфункціональної дії та досліджено їх вплив на особливості твердіння цементобетону;

— отримано для дослідження цементобетонів: розрахункові значення параметрів функції модуля пружності з урахуванням різного часу дії навантаження та температури; функції довговічності та показники втоми;

— визначено будівельно-технологічні властивості цементобетонних сумішей з комплексними хімічними добавками, встановлено розрахункові характеристики та фізико-механічні властивості цементобетонів для покриття автомобільних доріг та проведено порівняння із сучасною хімічною добавкою аналогом зарубіжного виробництва;

— розроблено дорожні високоміцні цементобетони класу B50B_{btb}5,2P1F200W10;

— запропоновано методологію визначення гранулометричного складу цементобетонних дорожніх сумішей при операційному контролі їх якості.

Результати роботи використані:

— при розробці нормативних документів: М 42.1-37641918-780:2020 Методика оцінки довговічності цементобетонного дорожнього покриття з

урахуванням спільного впливу змін температури та дії транспорту; М 42.1-37641918-772:2018 Методика визначення гранулометричного складу цементобетонних дорожніх сумішей; ТУ У В.2.7-20.5-38564866-001:2017 Добавки для бетонів та будівельних розчинів комплексні «ШАГ»;

— при розробці практичних заходів з підвищення довговічності цементобетонного покриття на автомобільних дорогах України з урахуванням усадки цементобетону, зміни температури, режиму руху навантаження від транспортних засобів, складу та інтенсивності руху, особливостей конструкції дорожнього одягу;

— при викладанні дисциплін: «Будівельне матеріалознавство», «В'язучі речовини», «Фізико-хімічні методи дослідження будівельних матеріалів», «Бетони та будівельні розчини для будівництва транспортних споруд» на кафедрах дорожньо-будівельних матеріалів і хімії та мостів, тунелів та гідротехнічних споруд Національного транспортного університету.

Результати роботи впроваджено при влаштуванні покриття аеродрому в Міжнародному аеропорті «Херсон»; при проведенні капітального ремонту взлітно – посадкової смуги в Міжнародному аеропорті «Запоріжжя»; при влаштуванні монолітного огороження парапетного типу «Нью-Джерсі» на автомобільній дорозі М-05 Київ-Одеса км 17+740 – км 87+000”; при виготовленні високоміцних дорожніх бетонів та виробництві дорожніх плит ПДС (0,16×2,0×3,0) на ТОВ «Бетон Комплекс».

Особистий внесок здобувача.

Дисертаційна робота є результатом самостійного наукового дослідження автора. Особистий внесок здобувача полягає в отриманні наукових результатів, викладених у даній роботі. Автором проведено аналіз умов роботи і стану цементобетонного покриття автомобільних доріг з урахуванням спільного впливу усадки цементобетону, зміни температури та дії пневматичних коліс транспортних засобів [182,183,190, 192, 195]. Проведено аналіз існуючих методів розрахунку довговічності за тріщиностійкістю цементобетонного покриття на автомобільних дорогах з

урахуванням впливу усадки, зміни температури та дії пневматичних коліс транспортних засобів [182, 190].

В спільних публікаціях [183, 190, 195] автором розроблено розрахункову схему, аналітичну залежність та удосконалено метод оцінки довговічності цементобетонного покриття автомобільних доріг за тріщиностійкістю від спільного впливу усадки цементобетону, зміни температури та дії пневматичних коліс транспортних засобів. В спільній публікації [178,] автором експериментально отримано для досліджуваних цементобетонів: розрахункові характеристики, будівельно-технологічні властивості сумішей, фізико-механічні властивості цементобетонів, а також параметри функції довговічності та тріщиностійкість цементобетонів.

В спільній публікації [178, 185-187] автором розроблено математичні моделі властивостей високоміцних цементобетонів для дорожнього будівництва. Розроблено рекомендації з урахуванням рецептурно-структурних, конструктивних та технологічних заходів, а також методику розрахунку щодо підвищення довговічності цементобетонного покриття автомобільних доріг [190, 193, 195].

Обґрунтованість та достовірність отриманих в роботі результатів підтверджується: застосуванням фізично обґрунтованих (на основі експериментальних даних) математичної моделі, яка перевірена на адекватність; достатнім обсягом експериментальних даних, що отримані з використанням сучасного лабораторного та стендового обладнання; апробацією результатів роботи під час виробничого впровадження.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи були представлені: на науковій конференції професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та структурних підрозділів університету Національного транспортного університету №№ 64-70 у 2008-2013, 2016-2019 рр.; “Наукові дослідження – теорія та експеримент 2009” п’ята міжнародна науково-практична конференція, 18-20 травня 2009 р., Полтава, Україна; VII Відкритій українській конференції молодих вчених з

високомолекулярних сполук 15-18 жовтня 2012р., Київ, Україна; третій науково – практичній конференції з іноземною участю “Застосування передових технологій в цивільному та промисловому будівництві” 24 травня 2012 р., Київ, Україна; міжнародній науково – практичній конференції “Бетони та вироби з бетону в сучасному будівництві: актуальні питання виробництва та застосування” 8-9 вересня 2009 р., Київ, Україна; міжнародних науково – практичних конференціях “Бетони та добавки для бетону в сучасному будівництві: актуальні питання виробництва та застосування” 16-17 лютого 2011 р., 14-15 березня 2012 р., 25-26 вересня 2013 р., 04-05 червня 2014 р., Київ, Україна; міжнародній науково – практичній конференції “Сучасні гідроізоляційні та покрівельні матеріали” 04-05 грудня 2014 р., Київ, Україна; міжнародній науково – практичній конференції “Бетони, цементи та добавки для бетону в сучасному будівництві: актуальні питання виробництва та застосування” 02-03 грудня 2015 р., Київ, Україна; науково – практичному семінарі “Сучасні підходи до проектування, будівництва та експлуатації цементобетонних дорожніх покриттів” 19 травня 2015 р., Київ, Україна; на XIV, XVI Міжнародних Форумах з будівництва та експлуатації автомобільних доріг і мостів "АВТОДОРЕКСПО 2016, 2018" науково – практичних конференціях з проектування та будівництва автомобільних доріг і мостів 10 листопада 2016 р., 08 листопада 2018 р., Київ, Україна; міжнародній конференції “Сучасні методи і технології проектування, будівництва, експлуатації автомобільних доріг, споруд на них та управління проектами їх розвитку” 23-24 листопада 2016 р., Київ, Україна; I Міжнародній науково – технічній конференції “Дорожньо-будівельний комплекс: проблеми, перспективи, інновації” 15 листопада 2019 р., м. Харків, Україна; міжнародній науково-технічній конференції "Гідротехнічне і транспортне будівництво" 28-29 травня 2020 р., м. Одеса, Україна.

Публікації. За темою дисертаційного дослідження опубліковано 29 наукових праць, у тому числі: 9 у періодичних фахових виданнях, що входять

до переліку МОН України; 1 стаття у зарубіжних періодичних наукових виданнях; 4 статті додатково відображають наукові результати дисертації. За матеріалами дисертаційних досліджень отримано 6 свідоцтв України про реєстрацію авторського права.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація включає вступ, чотири розділи, загальні висновки, список використаних джерел зі 195 найменувань та вісім додатки. Основний текст викладений на 160 сторінках. Текст ілюструється 39 рисунками і містить 19 таблиць.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЦЕМЕНТОБЕТОННОГО ПОКРИТТЯ АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ

1.1 Основні передумови досліджень

Зростання вантажопідйомності і швидкості руху автомобілів вимагає безперервного розвитку дорожньої мережі, вдосконалення конструкцій дорожнього одягу. Невідповідність стану автомобільної дороги вимогам транспортного потоку призводить до зростання кількості дорожньо-транспортних подій, знижує швидкість руху, збільшує знос автомобілів і витрати на їх ремонт, підвищує витрату палива.

Розвиток дорожньої інфраструктури передбачає будівництво сучасних автомагістралей з високими транспортно-експлуатаційними характеристиками, що є надзвичайно актуальним завданням для безпеки і комфорту перевезення пасажирів і вантажів [70,176].

За даними професора Гамеляка І.П. в Україні, як і в усьому світі спостерігається динамічне зростання інтенсивності руху (більш ніж у два рази за десять років) та навантаження на вісь (з 60 — 100 кН до 115 — 130 кН) та тиску в пневматику (з 0,45 — 0,60 МПа до 0,85 — 0,90 МПа) [1-3, 138].

Зараз в Україні найбільш розповсюджене будівництво дорожніх одягів не жорсткого типу і сягає 35,20 % мережі доріг згідно [6].

Необхідно враховувати той фактор, що клімат в останні роки характеризується наявністю влітку тривалого періоду, коли температура повітря перевищує $+ 30^{\circ}\text{C}$ $+ 35^{\circ}\text{C}$ [1]. За таких умов асфальтобетон нагрівається до температури вище $+ 60^{\circ}\text{C}$... $+ 65^{\circ}\text{C}$, при тому, що розрахункова температура асфальтобетонних шарів згідно з нормами на проєктування нежорстких дорожніх одягів не перевищує $+ 40^{\circ}\text{C}$, а температура випробувань навіть в діючому стандарті на асфальтобетон

обмежена + 50 ° С [1]. При таких умовах модуль пружності асфальтобетонного покриття знижується, що є однією із причин можливості утворення колій і виникнення супутніх дефектів [1]. Тому рішенням цієї проблеми може стати будівництво доріг із цементобетонним покриттям.

В Україні недостатньо виробляється бітуму, на даний час 80 % бітуму є імпортованим матеріалом [1,2,131]. Натомість за даними [4] в Україні налічується 12 цементних заводів, які в повній мірі здатні забезпечувати будівництво доріг з цементобетонним покриттям. Згідно [4] за оцінками UIF будівництво 1000 км в рік цементобетонних доріг може забезпечити зростання ВВП до 2030 року від 8,5 до 19,4 млрд. дол. Через 20 років ефект буде становити до 31 млрд. дол. [1,2,131].

У ДБН В.2.3-4 зазначено, що при проєктуванні дорожнього одягу для автомобільних доріг, на яких у складі транспортних потоків очікується понад 15 % великовантажних транспортних засобів, параметри навантаження від яких перевищують розрахункові (зерновози, контейнеровози, рефрижератори тощо) на таких дорогах необхідно передбачати лише жорсткий дорожній одяг [6].

Перша дослідна ділянка дорожнього цементобетонного покриття довжиною 45 м була влаштована в 1865 році в Шотландії в місті Inverness (Joseph Mitchell), а згодом в місті Едінбург. Згідно даними [8,9] до першої декади XX століття в Європі практично не будували цементобетонні дороги.

Лідером за кількістю цементобетонних доріг є США, де вони складають близько 60% від загальної протяжності [8]. Перша американська «бетонка» була влаштована J.Y. McClintock в м. Рочестері (шт. Нью-Йорк) в 1893 році [8]. Проте через 2,5 роки дане покриття зруйнувалося. За даними J.Y. McClintock причиною руйнування були хаотичні тріщини в результаті дії температури та дії навантаження від дії підков коней [8]. В 1891 році в місті Белфонтейн, штат Огайо George Bartholomew влаштував першу експериментальну ділянку цементобетонного покриття на пішохідній доріжці вздовж Main Street, а через три роки покриття на вулиці Court Street

[8]. Влаштоване цементобетонне покриття було двошаровим, із плит $1,5 \times 1,5$ м, які відокремлені папером, змоченим дьогтем. Довжина ділянки 67 м, ширина — 3 м. Нижній шар було влаштовано із цементобетону, товщиною 10 см. Покриття на вулиці Court Street, яке влаштовано у 1894 році зберіглося і по цей день згідно даних [8]. Перші цементобетонні покриття доріг були товщиною 15 см та мали деформаційні шви. Активне будівництво бетонних доріг почалося на початку 50-х років минулого століття. Згідно з вимогами Міністерства Транспорту США (U.S. Department Of Transportation (US DOT)) дороги категорій Interstate Highways (індекс I), US Highways (індекс US) їх необхідно було влаштовувати із цементобетону [8]. При цьому для різних регіонів технології будівництва дещо відрізнялися так як при цьому враховували кліматичні та сейсмічні особливості місцевості .

Переїнявши досвід США, в Японії, Китаї, Індії, Австралії та деяких країнах Європи активно почали будувати дороги з цементобетону. Наприклад, в Китаї за останні 15 років влаштували більше 70 000 кілометрів цементобетонних доріг. У Німеччині 25 % автомагістралей мають цементобетонне покриття; в Австрії приблизно $\frac{2}{3}$ протяжності магістральних доріг (motorways) мають цементобетонне покриття . У Бельгії, цементобетонні шосе складають 40 %, а доля місцевих доріг побудованих за цементобетонною технологією складає близько 60 %. В Білорусії при будівництві другої Мінської кільцевої дороги (МКАД-2) в якості покриття використовували цементобетон. Проте в Україні протяжність автомобільних доріг із цементобетонним покриттям складає близько 2400 км, в той час як загальна протяжність доріг загального користування складає близько 170 тис. км, тобто 1,4 % від мережі [1 — 3, 5, 29].

Аналізуючи світовий досвід будівництва доріг з цементобетонним покриттям [1 —3, 5,70,72,98,131,132,133] основними перевагами у порівнянні з асфальтобетонними покриттями є: більша міцність (в 3...5 разів), значна довговічність; можливість цементобетону нарощувати міцність з часом в 1,12 рази за 10 років або 1,21 рази за 20 років; відсутність явища колійності [103];

наявність вітчизняної сировини; менше нагрівання за рахунок світлої поверхні; можливість переробки та повторного використання тощо [4], підвищена безпека руху за рахунок кращих кольорових показників огляду поверхні під час поганих умов проїзду, в тому числі у ночі (число ДТП на 32 % менша у порівнянні з асфальтобетоном за рахунок відбивання світла фар бетонним покриттям) [4]; більш низькі витрати на експлуатацію (покриття майже не потребує утримання крім догляду за швами) [4].

Недоліки доріг з цементобетонним покриттям: покриття потребує високої культури під час технології влаштування, великі фінансові затрати на проведення ремонту, наявність швів, складність зимового утримання [5,9,70].

Аналізуючи світовий досвід будівництва цементобетонних доріг набули поширення три типи монолітних цементобетонних покриттів [2]: цементобетон з поперечними швами на відстані близько 5 м один від одного зі сталевими штирями в поперечних швах і з анкерними штирями в поздовжніх (JPCP – Jointed plain concrete pavement) - цементобетонні покриття звичайного типу [2,8,9,29,69]; армований цементобетон (залізобетон) з поперечними швами на відстані від 9 до 12 м зі сталевією сіткою, яка повинна стримувати розкриття поперечних тріщин, і зі сталевими штирями в поперечних швах і з анкерними штирями в поздовжніх (JRCP – Jointed reinforced concrete pavement) та неперервноармований цементобетон без поперечних швів, у якому арматури більше, ніж в армованому цементобетоні (CRCP – Continuously reinforced concrete pavement) [2,5]. Велика кількість поздовжньої арматури впливає на відстань між виникаючими поперечними волосяними тріщинами. Часто такий вид покриття армують і в поперечному напрямку [2]. Товщина такого виду покриття зазвичай рівна 85-90% від товщини цементобетонних покриттів звичайного типу для тих же умов роботи [2].

Дорожній одяг жорсткого типу із покриттям з монолітного цементобетону, як правило, у загальному випадку, має наступні конструктивні шари: покриття, вирівнюючий шар, основа та додаткові шари

основи, що виконують морозозахисні дренажні і теплоізолюючі функції [8,69, 172]. За кількістю шарів покриття може складатися із одного або двох шарів [172]. Цементобетонне покриття автомобільних доріг переважно влаштовують одношарове товщиною 18 - 30 см в залежності від категорії автомобільної дороги [138].

Автором роботи [2] проведено аналіз зарубіжного досвіду будівництва цементобетонних доріг та встановлено, що в якості основи використовують пісний цементобетон, пористий асфальтобетон, щебенево-піщані суміші, фракціонований щебінь. У Канаді найбільш поширеним є застосування в якості основи високопористого асфальтобетону, натомість у Європі — щільного асфальтобетону або щебенево-піщаної суміші, укріпленої цементом. Застосування в якості основи ґрунту укріпленого цементом більше не рекомендують використовувати в ряді штатів США і Європі, зокрема, і у Німеччині. Раніше в Німеччині прагнули забезпечити зчеплення між цементобетоном і основою, що містила цемент [5,8,138,123]. Наразі, навпаки, з метою відокремлення цементобетонного покриття від укріпленої цементом основи застосовують тонкий шар гарячої асфальтобетонної суміші або полотно з геотекстиля товщиною близько 5 мм. В Україні в якості покриття застосовують цементобетон з поперечними швами на відстані близько 4,5 м один від одного зі сталевими штирями в поперечних швах і з анкерними штирями в поздовжніх. В якості основи застосовують ґрунт укріплений цементом, піщано-щебенові суміші, оброблені цементом та з метою відокремлення від цементовмісної основи застосовують геотекстиль або плівки товщиною від 3 до 5 мм [2].

1.2 Причини та види утворення тріщин в цементобетонному покритті автомобільних доріг

Зарубіжний досвід будівництва доріг із цементобетонним покриттям декларує довговічність таких доріг 30 – 50 років [1—3,

5,70,72,98,131,132,133], а вітчизняні будівельні норми [173] в залежності від категорії дороги 18 – 23 роки. Проте внаслідок комплексної дії усадки, зміни температури та дії навантаження на покриття і невідповідності цементобетону умовам експлуатації, в таких випадках руйнування може відбутися значно раніше спрогнозованого терміну служби цементобетонного покриття автомобільних доріг [182,192].

Сучасні дослідження, проведені в різних країнах, в тому числі і в Україні, показали, що деякі види цементобетону (наприклад - пропарені) дають приріст міцності тільки протягом 1 року. У решти цементобетонів спостерігається приріст міцності тільки протягом перших п'яти років. Все частіше фіксуються випадки зниження міцності цементобетонів в часі [37]. Встановлено, що умови твердіння дійсно впливають на кінетику росту міцності в часі. При сухих умовах твердіння, за даними О. Графа, приріст міцності спостерігається тільки в перший рік, в подальшому можливий спад міцності. Уїзей встановив, що після 3 місяців твердіння в сухих умовах приріст міцності цементобетону припиняється [37]. Залежність тривалої міцності цементобетону від умов твердіння стало однією з причин, по якій С. В. Шестоперов запропонував ввести поняття комплексної марки бетону [37]. Як відомо, мінералогічний склад цементу зумовлює його поведінку при подальшому твердінні в складі цементобетону. Так роботами Юнга, Бутта, Андерегга, Губеля, Богі, Лерча, Кинда, Некрасова К. Д., Огорокова С. А. та інших вчених доведено, що процес гідратації мінералів цементного клінкеру в часі відбувається нерівномірно [37]. За даними, отриманим І. М. Френкелем [37], цементи з тонким помелом дають більш швидке наростання міцності в перші дні твердіння, ніж грубого помелу. С. В. Шестоперов [37] вважав, що цементобетони на домелених цементах відрізняються зниженою морозостійкістю, і пропонував, в зв'язку з цим ввести нормування гранулометричного складу цементів. Раніше (в 30-і роки минулого століття) зазначалося, що в бетоні після 15 років твердіння на повітрі міститься до 40% негідратованих реліктів. У бетонах того ж складу і віку, але процес

твердіння відбувався у вологому середовищі, кількість реліктів становить 25%. У більш пізніх дослідженнях (у 50-ті роки) було встановлено, що після 6 місяців твердіння в нормальних умовах в портландцементного камені кількість негідратованих зерен клінкеру становить 40%, а після повної гідратації – 10 – 15% (при цьому під мікроскопом не виявляються C_3S і C_3A) [37]. Напевно, така розбіжність пов'язана зі зміною дисперсності, мінералогічного складу і активності цементів за цей період.

Також автором було зазначено [108], що у зв'язку із випуском тонкомелених цементів гідратація зерен цементу в цементобетоні майже повністю завершається в перший місяць та подальший приріст міцності невеликий – менше 15 %.

Результатами аналізу Радовського Б.С., Мозгового В.В., Грушка І.М. встановлено, що цементобетонне покриття автомобільної дороги в період експлуатації втрачає свою довговічність від дії втомного навантаження транспортних засобів, зміни добової та річної температури, а також усадки цементобетону на етапі формування структури [25,105-107,125,127,149].

Аналіз зарубіжного та вітчизняного досвіду будівництва та експлуатації цементобетонних автомобільних доріг свідчить, що тріщини в цементобетонах можуть виникати через різні фактори [7, 12-17, 20, 23,26, 27, 35, 37-39, 43-45, 47- 67, 89, 104, 108-109, 111, 112, 170] різниця коефіцієнтів лінійного термічного розширення; тепловиділення цементу; несумісність хімічних добавок та цементів, внутрішні напруження в структурі цементного каменя чи в зоні контакту «цементний камінь – заповнювач»; не належний догляд за влаштованим шаром; постійний тепло і масообмін (водяний пар, рідка фаза води), що викликає нерівномірний розподіл температури і вологості по товщині; усадка під дією фізико-хімічних процесів при твердінні цементного каменя; використання існуючих типових конструкцій для автомобільних доріг, які не завжди забезпечують необхідну довговічність, а методи розрахунку їх на довговічність недосконалі; недосконалі практичні рекомендації з підвищення довговічності цементобетонного покритті, які в

комплексі враховували б матеріалознавчі, конструктивні та технологічні заходи.



а) усадочні тріщини; б) поперечні тріщини; в) тріщини просідання; г) поздовжні тріщини; д) руйнування кромки швів; е) лушення

Рисунок 1.1 — Пошкодження цементобетонного покриття автомобільних доріг

Одним із пошкоджень цементобетонного покриття автомобільних доріг є пошкодження поперечних швів. Причиною такого пошкодження є порушення їх герметичності, а також міцність та деформативність основи. Автором [2] встановлено, що внаслідок одночасної дії навантаження та

перепадів температури на поверхні та нижній грані цементобетонної плити протягом навіть доби виникає так званий «клавішний ефект». В наслідок відбувається поступове деформування та руйнування основи саме в цих місцях. В результаті порушеної герметизації шва, вода потрапляє у простір між плитою та основою, що прискорює руйнування [2].

Існуючі методи оцінки тріщиностійкості дорожніх цементобетонів [10] є: 1) методи, що ґрунтуються на візуальному спостереженні тріщини; 2) непрямі методи оцінки за фізико-механічними властивостями цементобетону — граничною розтяжністю, деформацією усадки тощо; 3) методи, що ґрунтуються на моделюванні; 4) методи механіки руйнування [70].

Авторами [7] наведено класифікацію дефектів і руйнувань, які поділяться на категорії дефектів, що виникають до введення дороги в експлуатацію та ті, що виникають в процесі експлуатації. Дану класифікацію наведено в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 — Класифікація утворення тріщин в цементобетонному покритті

Тріщини, що з'явилися до введення дороги в експлуатацію		Тріщини, що утворюються в процесі експлуатації дороги	
1	Усадочні тріщини	1	Усадочні тріщини
		2	Лущення
		3	Викришування
		4	Тріщини просідання
		5	Поперечні тріщини
2	Поперечні тріщини	6	Поперечні тріщини біля швів розширення
		7	Поперечні затухаючі тріщини
		8	Тріщини защемлення
3	Поперечні тріщини біля швів розширення	9	Тріщини-шви
		10	Поздовжні тріщини
		11	Косі тріщини
		12	Відколи кутів плит
		13	Сітка тріщин
4	Незадовільна рівність покриття після влаштування	14	Пошкодження швів
		15	Незадовільна рівність
		16	Здимлення плит
		17	Відображені тріщини

Автором в роботі [11] представлено класифікацію дефектів, які поділяються на групи А, Б, В у залежності від причин утворення .

У вітчизняному нормативному документі [10] наведено класифікацію дефектів та ступінь руйнування покриття автомобільних доріг та рівні технічного стану цементобетонних покриттів автомобільних доріг та їх характеристики, що дозволяє визначити доцільність проведення ремонтних заходів.

1.3 Аналіз методів та критеріїв оцінки довговічності цементобетонного покриття автомобільних доріг

А. А. Гріффітс вивів критерій міцності крихкого тіла з уже існуючою тріщиною [25] (Додаток А, Таблиця А.1, (А.1)).

Надалі дана теорія знайшла своє продовження в роботах Р.Ірвіна, Е. Орвана, Г.І. Баренблатта, Б.А. Дроздовського, М.Я. Леонова, В.В. Панасюка та інших вчених [25].

У роботі [25,133,138] вільна поверхнева енергія тіла була замінена питомою енергією руйнування: $G_c = 2\gamma$. Разом з енергетичним G_c використовують силовий критерій тріщиностійкості K_{IC} [26], (Додаток А, Таблиця А.1, (А.2)).

Класична теорія Гріффітса-Ірвіна не враховує повзучості матеріалу. Напружено-деформований стан конструкції більшою мірою залежить від повзучості цементобетону і можливо припустити, що при довготривалому навантаженні істотно впливає на процес руйнування. Найповніше властивості цементобетону при довготривалих навантаженнях описується теорією повзучості старіючих матеріалів, розроблених Г.Н. Масловим, Н.Х. Артюняном та інших вчених. Для узагальнення критерію Гріффітса-Ірвіна на випадок врахування повзучості цементобетону отримано вираз для внутрішньої енергії тіла, властивості якого описуються даною теорією.

Найбільш відомим узагальненням теорії Гріффітса-Ірвіна є модель Леонова-Панасюка, яка призначена для опису процесу утворення та розвитку тріщин. Згідно даної моделі передбачено, що тріщина починає розвиватися при умові, що розкриття її у вершині досягає критичного значення. Дана модель застосовується при аналізі процесів руйнування конструкцій виготовлених з багатьох матеріалів. Проте досвід використання до цементобетону невеликий. В.І. Ягуст досліджував можливість застосовувати дану модель при короточасному завантаженні бетонних конструкцій. Було встановлено, що дана модель якісно описує багато ефектів, що спостерігаються при квазікрихкому руйнуванні цементобетону, але існують помітні розбіжності між дослідними і розрахунковими даними [138].

Теорія Гріффітса і розвиваючі її варіанти успішно пояснювали явища руйнування матеріалів схильних до крихкого руйнування. На підставі випробувань на згин Голландом і Тернером [138] була запропонована наступна емпірична залежність для визначення часу до руйнування (Додаток А, Таблиця А.1, (А.3)). Цей закон набув відомого поширення в практиці досліджень міцності різних матеріалів.

Однією з найбільш фізично обґрунтованих залежностей такого типу є запропонована С. Н. Журковим (Додаток А, Таблиця А.1, (А.5)).

Як показали дослідження С. Н. Журкова, залежність має чітку фізичну інтерпретацію, яка полягає в тому, що руйнування матеріалу розглядається як кінетичний термофлуктуаційний процес постійного нагромадження і розвитку пошкоджень. С.В. Коновалов запропонував використати формулу для опису закономірностей руйнування дорожньо-будівельних матеріалів.

І.М. Грушко [25] об'єднав енергетичну (А. Гріффітс) та кінетичну теорію (С.Н. Журков) в теорію міцності квазікрихких неоднорідних матеріалів. На основі даної теорії І.М. Грушко запропонував визначати довговічність за (Додаток А, Таблиця А.1, (А.6)). Одержані результати свідчать, що показники міцності цементобетону обумовлені складними процесами, які протікають в структурі цементобетону. Розвиток даних

процесів визначається багатьма факторами: специфікою зовнішнього впливу, станом та структурою цементобетону.

Зайцевим Ю.В. на основі теоретичних та експериментальних даних були висунуті припущення щодо особливості поведінки тріщин в цементобетоні [65,66].

Автори робіт [25] на основі вчень про структуру цементобетону запропонували залежність для визначення міцності цементобетону (Додаток А, Таблиця А.1, (А.7,А.8)). Дані залежності дають змогу оцінити вплив структури на міцність і тим самим оцінити довговічність цементобетону.

Авторами робіт [40] запропоновано методи оцінки і гіпотези накопичення пошкоджень (Додаток А, Таблиця А.1, (А.8 — А.13)).

Автором [89] уточнено методику визначення витривалості та довговічності при багатоступінчатому прямокутному статичному режимі навантаження із урахуванням стану спокою матеріалу конструктивних шарів при непостійному коефіцієнті асиметрії циклу. Для врахування тимчасових інтервалів між рухом автомобілів у транспортному потоці умова розриву згідно [45] при багатоступінчатій прямокутній циклах навантаження із інтервалами спокою матеріалу моделі визначається за (Додаток А, Таблиця А.1, (А.14)).

В якості критерію граничного стану автором [70] запропоновано застосовувати величину максимальних напружень, які спричинені спільною дією розрахункових напружень і температури (Додаток А, Таблиця А.1, (А.16)).

Солодким С.Й. [70] запропоновано оцінювати довговічність цементобетонної плити під час згину із урахуванням фактору часу або кількості циклів сумарної дії навантаження і зовнішніх факторів від моменту зародження тріщини до початку її нестійкого поширення (Додаток А, Таблиця А.1, (А.15)).

Автором запропоновано визначати [70] зміну тріщиностійкості цементобетонного покриття автомобільних доріг залежно від терміну

експлуатації [43] (Додаток А, Таблиця А.1, (А.16)) та запропонована ресурс довговічності оцінювати через клас міцності цементобетону на розтяг при згині, критичний коефіцієнт інтенсивності напружень, джей інтеграл, розрахунковий термін експлуатації покриття автомобільних доріг (Додаток А, Таблиця А.1, (А.17)).

Існують аналітичні залежності, які дозволяють прогнозувати довговічність цементобетону покриття автомобільних доріг від дії температури, стирання, агресивного середовища.

С.В.Шестоперов визначив показник морозостійкості як число циклів заморожування-відтавання в проєктний період експлуатації (Додаток А, Таблиця А.1, (А.18)).

На думку Л.М. Добшица невідповідність між реальними умовами експлуатації й назначених марок по морозостійкості цементобетону, призводить до передчасного руйнування цементобетону. Л.М. Добшиц запропонував формулу, що дозволяє виначити проєктну морозостійкість цементобетону (Додаток А, Таблиця А.1, (А.19)). Наведена формула урахує тільки дію знакозмінних температур. Емпіричні коефіцієнти D і Z досить умовні й важко визначні, що робить запропоновану формулу приблизною й малопридатною для оцінки терміну служби дорожнього цементобетону.

Аналізом критеріїв оцінки стійкості цементобетонів в умовах впливу клімату встановлено, що деструкція цементобетону під впливом клімату являє собою фізичний процес поступового пошкодження структури, що не виключає можливості прогнозування деструкції з часом. Досліджений процес розвитку тріщин і накопичення пошкоджень, а також вибір характеристик і структур, достатньо повних характеристик змін, що відбуваються в цементобетоні під впливом кліматичного середовища [13]. Закономірність накопичення пошкодження представлена у вигляді залежностей (Додаток А, Таблиця А.1, (А.20)).

Автор виразив пошкодження цементобетону від впливу клімату зміною міжосьових векторів, що описують стан цементобетону. Математичні моделі зміни стану цементобетону під впливом клімату дозволяють отримувати залежності довговічності від зміни окремих параметрів стану за 1 рік або у вигляді визначення області допустимих змін параметрів стану за 1 рік, що забезпечують проєктну довговічність цементобетону [13].

Толмачев С.М. [133] запропонував розраховувати експлуатаційний період для цементобетонного покриття автомобільних доріг враховуючи при цьому одночасну дію циклічних знакоперемінних температур, водонасичення та висихання в агресивному середовищі при одночасній дії механічного стираючого навантаження. При розрахунку експлуатаційного періоду враховано: критичне стирання цементобетону, уточнений коефіцієнт тертя для цементобетону, роботу сили тертя ковзання для одержання критичного стирання та коефіцієнт агресивності, який враховано в залежності від території експлуатації покриття та агресивності середовища (Додаток А, Таблиця А.1, (А.21)).

На даний час для оцінювання якості та довговічності цементобетону при проєктуванні здійснюється переважно при вивченні фізико-механічних показників в лабораторних умовах [30-34].

1.4 Методи та критерії розрахунку напружень в цементобетонному покритті від зміни температури

Перші спроби вирішення задач по визначенню температурних напружень на основі класичної теорії пружності були присвячені дослідження Ж. Дюгамеля (1838 р.) і Ф. Неймана (1843 р.). Рівняння термопружності, які отримані Ж. Дюгамелем і Ф. Нейманом базуються на основі лінійної залежності між коефіцієнтом об'ємного розширення, температурою та константою значень теплофізичних характеристик матеріалу при зміні температури [108,109].

В 1924 році Гольдбеком було запропоновано формулу для визначення максимальної довжини цементобетонної плити при умові неможливості утворення тріщин при рівномірній зміні температури. Згідно даної формули, температурні напруження визначаються за (Додаток А, Таблиця А.2, (А.22)).

Проте дана залежність визначення напруження не залежать від величини температурної деформації, що не відповідає дійсності.

Надалі формула була уточнена з урахуванням тертя між плитою і ґрунтом: (Додаток А, Таблиця А.2, (А.23)) [108,109].

В.Ф. Бабковим було подальше уточнення залежності Гольдбека. Проте залежності (А.22, А.23) враховують температурні напруження лише в результаті тертя та не враховують залежність опору від переміщення і відповідно взаємодію плити з основою оцінено приблизними значеннями. Дані формули не враховують напруження, які утворюються від дії температури по товщині плити. В.Ф. Бабков отримав залежність (Додаток А, Таблиця А.2, (А.24)) [108].

В 1953 році І.А. Медніков розглянув дві задачі: 1) критичне підвищення температур, яке сприяє утворенню повздовжнього згину плити при відсутності швів розширення; 2) визначення розмірів плит в плані по температурним умовам. Ці задачі вирішені без врахування сил тертя між плитою та основою. Ступінь унеможливлення короблення оцінювався коефіцієнтом ε , значення якого у межах $0 \leq \varepsilon \leq 1$, при відсутності перешкод коробленню плити $\varepsilon = 0$, при наявності перешкод коробленню $\varepsilon = 1$. Проте ці залежності притаманні у разі розподілу температури по перерізу по прямолінійному закону. [108].

І.А. Медніков отримав залежності для визначення температурних напружень при зниженні температури (Додаток А, Таблиця А.2, (А.25)) та при підвищенні (Додаток А, Таблиця А.2, (А.26)). Дані рішення допустимі лише у випадку, коли температура розподіляється по перерізу по прямолінійному закону[108].

Х.М. Вестерградом були отримані аналітичні рішення, які набули широкого розповсюдження. Ці рішення дозволяють визначати напруження в цементобетонних плитах при внутрішніх змінах температури по лінійному законі при умові неможливості короблення (Додаток А, Таблиця А.2, (А.28)) [108].

Базуючись на аналітичних рішеннях Х.М. Вестерграда, Бредбюри запропонував визначати температурні напруження для краю плити та для середини плити (Додаток А, Таблиця А.2, (А.29)). Значення коефіцієнтів C в залежності від довжини плити L , вздовж края якої визначаються напруження і коефіцієнта C_x , C_y в залежності від довжини треба знаходити згідно графіку. Застосування формул Вестерграда-Бредбюри передбачені у випадку короблення плити при прямолінійному розподілі температури по товщині покриття, тобто при умові неможливості короблення плит. Дані формули не дозволяють вирішити задачу в загальному випадку, коли розподіл температури по товщині описується будь-якою функцією або є часткова можливість короблення [108].

М.М. Лебедев в своїх дослідженнях стосовно температурних напружень, встановив, що при невстановленому тепловому потоку, застосувавши функції комплексного змінного, вивів залежності для визначення напружень у випадку, коли функція температури не задовольняє рівняння Лапласа [108].

С.П. Тимошенко присвятив свої дослідження вирішенню задачі про температурні напруження у вільно обпертої прямокутної пластинки при лінійному законі розподілу температури по товщині [108].

Базуючись на рішеннях С.П. Тимошенко запропоновано визначати напруження в цементобетонних плитах при лінійному та гармонічному законі розподілу температури по товщині покриття та при випадках можливого короблення та без короблення (Додаток А, Таблиця А.2, (А.30-А37)) [108,121].

Томлінсон запропонував аналітичні залежності для визначення внутрішніх температурних напружень в дорожній плиті при синусоїдальній зміні температури на поверхні покриття, які базуються на основі відомого рішення С.П. Тимошенко (Додаток А, Таблиця А.2, (А.38)) [108].

Відомими вченими В.А. Черниговим, Ю.Ф. Левицкий та Л.І. Горецьким в своїх роботах було запропоновано визначати температурні напруження в цементобетонному покритті автомобільних доріг за аналітичною залежністю (Додаток А, Таблиця А.2, (А.39)). При вільних повздовжніх деформаціях розрахунок температурних напружень в плитах, які не мають можливість коробитися ($C_x = 1$) або мають часткову можливість короблення ($C_x < 1$) [108,109].

Сучасні дослідження по визначенню температурних напружень присвячено впливу температури на ранніх стадіях твердіння цементобетону. Важливу роль на ранніх стадіях твердіння відіграє тепловиділення під час проходження процесу гідратації цементів. О.В. Ушеров-Маршак присвятив свої дослідження проблемі тепловиділення цементів із добавками різної природи [44].

На думку Л.І Горецького ранній період твердіння є найбільш важливим, тому запропонував застосувати заходи для можливості регулювання повноти гідратації та екзотермічного тепловиділення. А.В. Михайлов запропонував визначення допустимих величин екзотермічного тепловиділення для плити покриття за (Додаток А, Таблиця А.2, (А.40)) [44].

На думку Ю.Р. Макачова екзотерія цементу відноситься до головних причин лінійних і об'ємних температурних деформацій дорожнього цементобетону. Автор встановлює пряму залежність модуля пружності цементобетону від функції екзотермії, встановивши залежність за граничним значенням модуля пружності $E_{гр.б}$ що відповідає віку еталона в 28 діб і граничній кількості тепла $\mathcal{E}_{гр.}$, яке виділяється із 1 кг цементу в бетоні (Додаток А, Таблиця А.2, (А.41)) [131, 132]. Ця залежність, за даними автора, дозволяє визначити режим догляду за цементобетоном та час нарізання швів.

І.Б. Заседателева встановила, що теплофізичні характеристики цементобетону найбільш помітно змінюються приблизно до 6 год.

Авторами [17] приведено рівняння, які дозволяють визначати температурні напруження в результаті порівняння напружень, що виникають від нерівномірності розподілу температури за товщиною покриття з величиною опору цементобетону на розтяг при згині (Додаток А, Таблиця А.2, (А.42)). Це рішення дозволяє прогнозувати утворення температурних тріщин на ранніх етапах твердіння та визначення моменту прикладання технологічних впливів. Авторами також в результаті проведених розрахунків встановлено, що мінімальна температура під час твердіння цементобетонного покриття – на поверхні, а максимальна — на нижній грані плити, де є ризики раннього тріщиноутворення [17].

С.М. Толмачов в роботі [14] встановив, що основною причиною утворення термічних тріщин монолітних цементобетонах транспортного призначення може бути градієнт температур. Автором запропоновано визначати градієнт температур за залежністю (Додаток А, Таблиця А.2, (А.43)).

Градієнт температур становить більше або дорівнює 26.3 °С, а проміжок часу дії напружень 8,3 години [14].

В формулі 6.7, 6.8 [172] при розрахунку монолітного цементобетонного покриття дію температури враховують через коефіцієнт (K_t), який оцінює вплив температурного короблення плит і визначається за таблицею 6.3 [172] в залежності від дорожньо-кліматичного району України та товщини плити (16 — 26 см). Температурні напруження визначаються [172] при визначенні необхідності влаштування швів розширення, виходячи з допустимих температурних напружень стиску (Додаток А, Таблиця А.2, (А.43,44)).

Існуючі методи визначення температурних напружень ґрунтуються на наближеному характері розподілу температур в покритті і взаємодії покриття

із основою і не розглядають температурні напруження в комплексі із напруженнями від дії автомобіля.

1.5 Методи та критерії розрахунку напружень в цементобетонному покритті від усадки

Як відомо, усадка твердіючого цементного каменю, бетону є наслідком виведення води із системи, висихання при відсутності гігromетричної рівноваги з навколишнім середовищем, що призводить до зменшення об'єму[21,43,45,89].

Величина усадочних деформацій цементного каменю в цементобетоні в основному визначається гелеподібною складовою. Також на величину усадки цементного каменю і бетону впливає витрата та мінералогічний склад цементу, водоцементне співвідношення, умови твердіння.

Усадка цементного каменю коливається в межах 3...5, цементних розчинів 0,6...1,4, важких бетонів 0,3...0,5 мм/м. Основна частина усадочних деформацій припадає на перші три місяці твердіння, повна стабілізація через одиг- два роки [155]. Поява тріщин в цементобетоні залежить не тільки від значення величини усадки, а і інших факторів: граничне значення розтягу матеріалу, модуля пружності, розмірів виробу [155].

А.В. Белов детально дослідив основну причину усадки – це процес висушування цементобетону. Він запропонував оцінювати усадку цементобетону із урахуванням втрати вологості (Додаток А, Таблиця А.3, (А.45))[89].

Г.Д. Вишневецький досліджував усадку різних цементобетонних розчинів. В результаті на основі теоретичних припущень запропонував аналітичну залежність перерахунку деформації усадки розчину на деформації цементобетону (Додаток А, Таблиця А.3, (А.46)). Співвідношення усадки цементного каменю і розчину в основному визначається об'ємом цементного каменю при однаковій рухливості вихідної розчинної суміші [89].

На даний час для прогнозування усадки важкого цементобетону існують розрахункові залежності, які дозволяють оцінити усадку виходячи із водоцементного співвідношення (B/C), витрати цементу (C) та води (B) (Додаток А, Таблиця А.3, (А.47 — А.50, А.52)). Проте дані розрахункові формули про прогнозування усадки цементобетону використані виходячи лише із складу цементобетону [155].

Л.Й. Дворкін, О.Л. Дворкін запропоновано для визначення усадки залежність (Додаток А, Таблиця А.3(А.52)), проте це рішення притаманне для пропарених цементобетонів [29].

Для розрахунку цементобетонних шарів дорожнього ГБН В.2.3-37641918-557:2016 «Дорожній одяг жорсткий» [9] — «6.1.3 Розрахунок монолітного цементобетонного покриття», необхідно визначити напруження в цементобетонних шарах від транспортних навантажень і перепаду температур, при цьому розрахунок напружень від усадки в момент тужавіння та твердіння не враховується взагалі, що може свідчити про відсутність такого розрахунку. Однак, як показує практика дуже часто напруження від усадки в цементобетонних та інших цементовмісних шарах дорожнього одягу з кристалізаційною структурою досягають величини напруження від дії транспорту і перепаду температур [47,48].

1.6 Методи розрахунку напружень в цементобетонному покритті від дії транспортного навантаження

А. Гольдбек (Goldbeck) в 1919 році винайшов першу залежність для визначення напружень в цементобетонному покритті автомобільних доріг. Було розглянуто дію зосередженого навантаження у вершині кута плити без врахування опору зі сторони основи [8,50,51]. Слід зазначити, саме А. Гольдбек вперше проводив вимірювання вертикальних напружень в ґрунті під цементобетонним шаром покриття [8,9]. В 1924 році на основі опору матеріалів було винайдено залежність Гольдбека-Ольдера, згідно якої

розтягуюче напруження на верхній поверхні плити визначається за (Додаток А, Таблиця А.4, (А.53)). Згідно даної залежності, напруження від розтягу при згині, що діє на верхній поверхні плити не залежить від відстані, розглянутого перерізу до кута плити та не враховує дію розтягуючого напруження по підшві плити при дії навантаження по середині плити та не враховує вплив основи [52]. Автором встановлено [8], що при проведенні розрахунку за даною залежністю спостерігається підвищення напруження в цементобетонній плиті в 2-2,5 рази.

Надалі розрахунок дорожнього одягу жорсткого типу здійснювався із врахуванням впливу основи. Розглядалося дві моделі із різними типами основи: вінклерівською та пружнім напівпростором [8].

Е. Winkler запропонував гіпотезу, згідно якої вертикальне переміщення в будь якій точці поверхні вінклерівської основи і дія тиску в цій точці вважалися пропорційними. Коефіцієнт постелі характеризує основу [8]. Проте для зв'язних ґрунтів та основ із укріплених матеріалів дана гіпотеза не співпадає із реальними умовами [8].

На відміну від моделі із вінклеровою основою, модель із пружнім напівпростором враховує прогини, які утворюються в області дії фактичного навантаження. Модель із вінклерівською основою більш притаманна для мулистих ґрунтів, дрібних водонасичених пісків та рідин.

Вагомий внесок в методи розрахунку жорстких дорожніх одягів було внесено Н. М. Westergaard [8,53-55].

Н. М. Westergaard вирішив задачу про згин плити на вінклерівській основі, при цьому враховуючи різні місця дії навантаження. В якості припущень при вирішенні даної задачі використано: 1. плита має необмежене розміщення в плані; 2. навантаження на сусідню плиту не передається; 3. плита знаходиться на однорідній основі; 4. глибина основи необмежена; 5. прикладене тільки одне навантаження; 6. плита плоска, не піддається дії температури і має гладкий контакт із основою [53-55].

Запропоновані аналітичні залежності Н. М. Westergaard для визначення розтягуючих напружень в цементобетонній плиті при різних варіантах розташування навантаження, в центральній частині плити, на краю та в куту. Визначення максимальних розтягуючих напружень на нижній поверхні плити при дії навантаження в центральній зоні плити виконується за залежністю (Додаток А, Таблиця А.4, (А.54)) [8].

Максимальні розтягуючі напруження на нижній поверхні плити при дії навантаження на краю плити (Додаток А, Таблиця А.4, (А.55)) [8].

Максимальні розтягуючі напруження при дії навантаження в куті плити визначаються згідно (Додаток А, Таблиця А.4, (А.56)) [8].

В результаті проведених Н.М. Westergaard розрахунків було встановлено, що найбільше напруження при дії навантаження виникає біля краю плити. Проте вірогідність проїзду колес біля краю плити на порядок менше ніж в центрі та біля кутів, тому на думку автора, для краю плити не потрібен великий запас на втому цементобетону. Напруження в куті плити більше ніж в центральній частині плити, але при виведені залежності автором не враховано передачі частини навантаження на сусідню плиту [8]. Автором [8] показано, що частина навантаження передається сусідній плиті за рахунок металевих штирів встановлених у деформаційних швах.

Аналітичні залежності Н.М. Westergaard по визначенню напружень цементобетонного покриття були апробовані на небезпечних ділянках з цементобетонним покриттям. Вимірювання прогинів і відносної деформації дали підтвердження теорії ще на початку 1942 року. Надалі дані формули перевіряли на дослідних дорогах та полігонах AASHTO. Згодом методом кінцевих елементів оцінювали вплив деяких припущень Вестергарда[1].

Дослідження Шехтера, Горбунова-Посадова, Woinowsky-Krieger були присвячені вирішенню задачі про згин цементобетонної плити на основі у вигляді пружного напівпростору [8].

М.И. Горбунов-Посадов запропонував формулу для визначення згинаючого моменту в необмеженій плиті на пружній основі (Додаток А, Таблиця А.4, (А.57)). Проте дана формула мала наближений характер [5].

Woinowsky-Krieger [61] вирішив задачу стосовно необмеженої плити на пружній основі, в результаті отримав залежність для визначення розтягуючих напружень на нижній поверхні плити (Додаток А, Таблиця А.4, (А.58)).

Аналізуючи [173] розрахунок монолітних цементобетонних покриттів полягає у порівнянні розрахункової міцності цементобетону на розтяг при згині з максимальним напруженням, що виникає в дорожній плиті на пружній основі від дії навантаження і перепаду температур за товщиною плити (Додаток А, Таблиця А.4, (А.59)). Напруження розтягу при згині визначають для розрахунку товщини покриття при умові гарантованого повного контакту плит з основою за рахунок стійкості земляного полотна і відсутності нерівномірних осідань або здимання [173]. При цьому розрахункова міцність бетону на розтяг при згині визначається за формулою А.1. Додатку А [173], яка враховує клас бетону на розтяг при згині, коефіцієнт набору міцності бетону та коефіцієнт утомленості бетону при повторному навантаженні.

1.7 Існуючі способи підвищення довговічності цементобетонного покриття автомобільних доріг

При вирішенні проблеми підвищення довговічності цементобетону для покриття автомобільних доріг враховують взаємозв'язок властивостей початкових сировинних компонентів, складу цементобетонної суміші, структури і властивостей цементобетону, технологічних чинників, експлуатаційних і природньо-кліматичних факторів [7, 38]. У зв'язку з цим проблема підвищення довговічності цементобетонних покриттів автомобільних доріг носить комплексний характер, що включає конструктивні, матеріалознавчі і технологічні заходи [73-75, 78-101].

Вплив рецептурно-технологічних заходів на довговічність цементобетонів покриття автомобільних доріг досліджено науковими школами під керівництвом І.П. Гамеляка, Л.Й.Дворкіна, Ю.В. Зайцева, А.М. Пака, Є.А. Гузеєва, К.О. Пірадова, В.В. Панасюка, В.М. Вирового, С.Й. Солодкого, С.М. Толмачова, А.В. Мішутіна та інших дослідників [73-75,78-101].

Одним із існуючих способів покращення властивостей цементобетонів для покриття доріг є їх модифікація хімічними добавками. В Україні хімічні добавки застосовують майже у всіх сферах виробництва цементобетону, що сприяє появі нових технологій, реалізувати які без хімічних добавок було б просто не можливо. Сучасний цементобетон перетворюється завдяки застосування сучасних хімічних добавок у більш складний композиційний матеріал, властивості якого перевершують традиційні склади [2].

Наукові основи застосування хімічних добавок для модифікації цементних бетонів розроблені в працях Ю.М. Баженова, В.Г. Батракова, А.І. Вовка, Л.І. Дворкіна, В.С. Ізотова, В.І. Калашникова, С.С. Капрієлова, В. Рамачандран, В.Б. Ратинова, Т.І. Розенберга, Дж. Ронсеро, В.В. Стольнікова, Б.Д. Трінкера, А.В. Ушерова - Маршака, В.В. Чистякова, Коваля, В.Р. Фалікман та інших дослідників.

У світовому досвіді застосування хімічних добавок наразі не існує єдиної їх класифікації. Вітчизняна класифікації хімічних добавок ґрунтується на роботах В.Г. Батракова, де запропоновано основні ознаки такі як: механізм дії, хімічна природа добавок, технологічна ефективність [73,74].

Добавки – модифікатори хімічного походження для бетонів і будівельних розчинів згідно з ДСТУ Б В.2.7-171:2008 класифікують функціональним призначенням на групи [155].

В залежності від природи основної діючої речовини суперпластифікатори поділяються на чотири основних типа [74]: на основі сульфированих нафталінформальдегідних поліконденсатів (тип НФ); на основі сульфированих меламінформальдегідних поліконденсатів (тип МФ);

на основі модифікованих лінгвосульфонатів (рафінованх і очищені від цукру (тип ЛСТ)); на основі полікарбоксилатів (тип ПК); на основі поліакрилатних ефірів (тип ПА) [74]. В свою чергу полікарбоксилати і поліакрилати можуть розглядатися як один тип, який належить до складних поліефірів карбонових кислот. Однак в залежності від сировини, технології виготовлення та призначення вони поділяються на підтипи [155]. У механізмі дії суперпластифікаторів на основі полікарбоксилатів та поліакрилатів, роль ζ – потенціалу менша, а взаємне відштовхування частинок цементу і стабілізація суспензії забезпечується за рахунок переважання сферичного ефекту. Таке розходження багато фахівців пов'язують з будовою молекул суперпластифікаторів на основі нафталінформальдегідних, меламінформальдегідних поліконденсатів та лігносульфонатів, що характеризуються лінійною формою полімерного ланцюга, для суперпластифікаторів на основі полікарбоксилатів та поліакрилатів характерні поперечні зв'язки дво- або тривимірної форми. Саме поперечні ланки створюють адсорбційну об'ємну захисну оболонку навколо частинок твердої фази, запобігаючи їх злипанню і сприяючи їхньому взаємному відштовхуванню [155].

Проте для отримання цементних бетонів з підвищеною міцністю, морозостійкістю, водонепроникливістю, корозійною стійкістю найбільш ефективно застосовувати не окрему хімічну добавку, а спеціально підібраний комплекс добавок поліфункціональної дії в залежності від призначення цементобетону і вимог до нього. За рахунок правильного поєднання типу і кількості співвідношення хімічних добавок можливо направлено впливати на структуру та фізико-механічні властивості цементного каменю, цементобетону та отримувати бетони із заданими властивостями [176-177].

Комплексні добавки поділяються на п'ять груп: суміші ПАР; суміші електролітів; суміші ПАР і електролітів, комплексні добавки на основі суперпластифікаторів; складні багатокомпонентні комплексні добавки [155]. До складу комплексної хімічної добавки повинен входити ефективний

суперпластифікатор, а також можуть входити добавки, які впливають на кінетику твердіння, повітрявтягуючі (газовтягуючі) добавки і тонкодисперсні мінеральні наповнювачі [176-177].

Застосування повітрявтягуючої (газовтягуючої) хімічної добавки обумовлено тим, що обсяг залученого повітря в цементобетонній суміші для одношарових та верхнього шару двошарових покриттів повинен забезпечуватися на рівні 5 — 7%, для нижнього шару двошарових покриттів 3 — 5% у відповідності з вимогами [173].

Раціональний підбір складу цементобетону є одним із способів підвищення довговічності цементобетону. На думку [26] традиційний спосіб підбору складу цементобетону не дозволяє підвищити його щільність. Авторами [26] розроблено методики проектування складу цементобетону, де враховано коефіцієнт розсунення зерен дрібного, крупного заповнювача і забезпечення їх переривчастої гранулометрії. Зменшення товщини плівок знижує ризик появи тріщин, що спричинені усадкою цементобетону, деформації повзучості при цьому підвищуються міцність та довговічність цементобетону. Проте така структура цементобетону характеризується відсутністю в ній резервних пор, що забезпечується за рахунок додаткового втягування повітря.

Для підвищення довговічності цементобетонного покриття автомобільних доріг необхідно враховувати оптимізацію цементобетонної суміші: модуль пружності гранітного щебеню $70 - 90 \cdot 10^3$ МПа, а розчину $15 - 26 \cdot 10^3$ МПа. З багаторічної зарубіжної і вітчизнаної практики матеріалознавства модуль пружності цементобетонів для дорожнього будівництва повинен складати $37 - 42 \cdot 10^3$ МПа (при 5 – 6 % залученого повітря). Виходячи з цього потрібно обмежити кількість крупного заповнювача :1050 – 1250 кг для $r = 0,35 - 0,43$ і 950 – 1100 кг для $r = 0,43 - 0,48$. Співвідношення між дрібним і крупним заповнювачем (r). При дрібному піску $M_{кр} \leq 1,8$ $r = 0,35 - 0,4$, при піску середньої крупності $M_{кр} =$

1,8 – 2,1 $r = 0,38 – 0,43$, при крупному піску $M_{кр} \geq 2,2$ $r = 0,43 – 0,48$ [184,186].

Використання коефіцієнта розсунення зерен (κ_p) по Б. Скрамтаєву і Ю.М. Баженову наперед визначено статично-пустотного крупного заповнювача ($\mathcal{U}$) і об'ємом в'язучого (цементний камінь).

Основний фактор реологічних властивостей бетонної суміші – коефіцієнт розсунення зерен.

Теоретичні моделі (Д.І. Штаєрман, Н.П. Блощин і інших вчених) формування пористості заповнювачів розглядається в ущільненому стані. З таким підходом можна погодиться якщо б не було розсунення між зернами, враховувався розмір, умовний діаметр зерен, лещадність, а також переріз конструкції.

“Оптимальність структури” підбору складу цементобетонної суміші (κ_p , r , $\mathcal{U}$ і т.д.) повинні визначатися не тільки мінімальною пористістю суміші заповнювачів і об'ємом в'язучого, але і необхідними технологічними властивостями, економічною і екологічною доцільністю із застосуванням відходів виробництва (наприклад відсіву) [177-184].

Для підвищення морозостійкості цементобетону необхідно не тільки певний інтегральний об'єм повітря, але і певний характер диференціальної повітряної пористості, яка визначає питому площу поверхні повітряних пор і фактор відстані між ними. Для дорожнього цементобетону високої морозостійкості фактор відстані не повинен перевищувати 0,15 мм, а об'єм резервних пор $d \leq 300$ мкм повинен бути не менше 5 %.

По А.М. Шейніну фактична морозостійкість (з урахуванням антижеледних реагентів) дорожнього бетону повинна бути істотно вище (орієнтовно в 2,5 – 3 рази від нормативного). Нормативні марки по морозостійкості повинні використовуватися тільки при підборі складу бетону, контролі його якості в процесі будівництва і прийманні цементобетонного покриття в експлуатацію [184,186].

В останні роки за кордоном почали все частіше застосовувати високоміцні цементобетони [97, 98]. При одній і тій же товщині плити застосування високоміцних бетонів дозволить збільшити несну здатність на 18 — 30 % і тим самим підвищити термін служби цементобетонного покриття [98].

Професором І.П. Гамеляком встановлено, що збільшення міцності цементобетону призводить до значного зменшення товщини плити цементобетонного покриття автомобільних доріг, дає можливість відмовитись від армування металевою сіткою [98]. Автором [98] встановлено, що тріщиностійкість високоміцних цементобетонів у 1,5 — 2 рази вище у порівнянні зі звичайними цементобетонами.

Для отримання високоміцного дорожнього цементобетону необхідно: підбір оптимального складу цементобетонної суміші; високоактивні (на розтяг при згині $R_u'' \geq 6,0$ МПа) цемент; зменшення В/Ц; зменшення капілярної пористості до 1,5 %; застосування ефективних комплексів суперпластифікаторів з повітрязалучаючими и або газовиділяючими добавками з водоредуціюванням більше 25 %, живучістю бетонної суміші не менше 60 — 120 хв. при збереженні кількості залученого повітря 5-6 % [89, 93, 184, 185-187].

Одним із методів зменшення усадки, підвищення міцності на розтяг при згині, тріщиностійкості цементобетонів для покриття доріг є застосування дисперсного армування волокнами різного виду [94]. Ефективність застосування волокон залежить від відношення довжини до діаметра волокна, зчеплення із бетонною матрицею та рівномірністю їх розповсюдження в об'ємі цементобетону.

Автором [78-80] запропоновано використовувати хімічні добавки, мінеральні добавки у поєднанні із волокнами для покращення властивостей цементобетонів.

Авторами [57] запропоновано використовувати шлаколузні цементы з відходами флотації золівмісної руди в дорожньому будівництві. Авторами виявлено, що шлаколузні цементы з використанням відходу флотації підвищують довговічність, міцність на розтяг при згині підвищується на 25%, значення модуля пружності зменшується на 28 – 30 %, стирання зменшується на 5 – 10 % у порівнянні із цементобетоном на основі портландцементів нормованого складу.

Технологічні заходи підвищення довговічності цементобетонів для покриття автомобільних доріг пов'язані із дотриманням вимог при технології влаштування та догляду за цементобетоном у відповідності з [173].

1.8 Висновки по розділу, мета та задачі дослідження

1. Проведено аналіз стану проблем експлуатації цементобетонного покриття автомобільних доріг, причини виникнення його руйнувань, методи та критерії розрахунку цементобетонного покриття, а також існуючі способи підвищення його довговічності.

2. Установлено, що існуючі методи та критерії оцінювання міцності та довговічності цементобетонного покриття носять розрізнений характер, так як при оцінюванні міцності цементобетонного покриття не в повній мірі враховують спільну дію усадки цементу бетону, зміну напружень від річних і добових температури та дії пневматичних коліс транспортних засобів.

3. Установлено з аналізу робіт, присвяченим лабораторним і стендовим експериментальним дослідженням, що вони не повністю враховують вплив рецептурно-структурні, конструктивних та експлуатаційних факторів на підвищення довговічності цементобетонного покриття.

4. Проведений літературний огляд свідчить про необхідність у вирішенні важливої науково-практичної задачі стосовно розробки удосконалення методу оцінювання довговічності цементобетонного покриття

автомобільних доріг з урахуванням спільного впливу усадки цементобетону, зміни температури та дії пневматичних коліс транспортних засобів.

5. Робота полягає в удосконаленні методу оцінювання довговічності цементобетонного покриття автомобільних доріг з урахуванням спільного впливу усадки цементобетону, зміни температури та дії пневматичних коліс транспортних засобів. Для досягнення поставленої мети роботи необхідно вирішити наступні задачі:

- провести аналіз умов роботи і стану цементобетонного покриття автомобільних дорогах з урахуванням спільного впливу усадки бетону, зміни температури та дії пневматичних коліс транспортних засобів;

- розробити розрахункові схеми та встановити аналітичну залежність для удосконалення методу оцінювання довговічності цементобетонного покриття автомобільних доріг за тріщиностійкістю від спільного впливу усадки бетону, зміни температури та дії пневматичних коліс транспортних засобів;

- експериментально дослідити: розрахункові характеристики цементобетону з використанням комплексних хімічних добавок; модуль пружності з урахуванням різного часу дії навантаження та температури; лабораторні та стендові дослідження впливу комплексної хімічної добавки на тріщиностійкість цементобетону; моделювання максимальних розтягуючих напружень в цементобетонному покритті автомобільних доріг від дії пневматичних коліс транспортного засобу; закономірності дії комплексної хімічної добавки на технологічні та механічні властивості цементобетону;

- розробити рекомендації та методику розрахунку щодо підвищення довговічності цементобетонного покриття автомобільних доріг. Основні результати досліджень першого розділу висвітлені в роботах автора [83 — 85, 184 — 188].

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ РОЗРАХУНКУ ЦЕМЕНТОБЕТОННОГО ПОКРИТТЯ АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ НА ДОВГОВІЧНІСТЬ

В даному розділі приведено основні теоретичні положення та аналітичні залежності для визначення оцінки довговічності цементобетонного покриття автомобільних доріг [182,183,190], які базуються на відомих теоріях та методах [49-75,95-130] (розділ 1).

2.1 Концептуальні положення з розрахунку цементобетонного покриття на автомобільних дорогах

Загальні положення як відомо в Україні 32 % транспортних засобів рухаються з перевищенням осьових навантажень. Швидке руйнування дорожніх конструкцій, спричинене збільшенням вагових навантажень від транспортних засобів, інтенсивністю руху, на які існуюча мережа доріг не розрахована.

Підвищення довговічності цементобетонного покриття автомобільних доріг за рахунок використання комплексних хімічних добавок [154], полягають у наступному: протягом заданого строку служби цементобетонне покриття повинні бути стійкими до водо-морозних впливів; повинні бути стійкими до тріщиноутворення від спільної дії впливу річних і добових температур, усадки цементобетону при твердінні та дії пневматичних коліс транспортних засобів. При цьому стійкість до водо-морозних впливів передбачено забезпечити належним вибором виду матеріалу для цементобетонного покриття конструкції дорожнього одягу, встановлення відповідних вимог до нього та технології його влаштування.

Оцінка тріщиностійкості цементобетонного покриття автомобільних доріг базується на отриманні аналітичних залежностей, що дозволяють прогнозувати напруження від: усадки цементобетону при твердінні;

спільного впливу річних і добових температур; дії пневматичних коліс транспортних. Тому для прогнозування утворення тріщин в цементобетонні від зазначених факторів пропонується оцінювати довговічність покриття, яка повинна базуватися на умові граничного стану.

Викладені у даному розділі теоретичні аспекти підтверджуються експериментальним шляхом та результатами перевірки адекватності теоретичних рішень у розділі 3, а також результатами числового аналізу, що наведений у Додатку Г.

У відповідності до проведеного аналізу (розділ 1) можемо вважати і прийняти для розробки аналітичних залежностей, що існує три основні причини, які суттєво впливають на появу тріщин в цементобетонному покритті автомобільних дорогах, а саме:

- напруження від спільного впливу річних і добових температур [14,17,44,108,109];
- напруження від усадки цементобетону при твердінні [17,20,21,24,43,47,48];
- напруження від дії пневматичних коліс транспортних засобів [8,25,64-72,114-118,122-131,134,136-148].

Цементобетонне покриття дорожнього одягу є одним із важливих елементів автомобільної дороги. Витрати на будівництво у деяких випадках досягає 60 — 70% від загальної вартості, а стан дорожнього одягу у значному випадку впливає на швидкість і безпеку руху транспортних засобів.

2.2 Аналітичний метод розрахунку цементобетонного покриття на автомобільних дорогах з урахуванням спільного впливу усадки цементобетону, зміни температури та дії пневматичних коліс транспортних засобів

Ідея даного методу полягає у обґрунтуванні вибору умови міцності та критерію граничного стану для оцінки довговічності цементобетонного

покриття автомобільних доріг. Для визначення тріщиностійкості цементобетонного покриття необхідна його кількісна оцінка на основі напружено-деформованого стану. Тобто потрібно знати при якому рівні напруження відбувається руйнування.

У вітчизняній дорожньої практиці значний внесок з підвищення довговічності цементобетону та цементобетонного покриття автомобільних доріг від впливу усадки цементобетону, зміни температури та дії пневматичних коліс транспортних засобів, внесли такі вчені: [66 — 78, 84—93, 98 — 101, 104 — 122, 128, 133 — 139] як: Батракова А.Г., Бабяк І.П., Болотін В.В., Гамеляк І.П., Гуляєв В.І., Грушко І.М., Гоц В.І., Дорошенко Ю.М., Дмитрієв М.М., Дворкін Л.Й., Дворкін О.Л., Жданюк В.К., Каменецкий Л.Б., Кваша В.Г., Кривенко П.В., Левицький Ю.Ф., Лучко Й.Й., Малицький В.А., Марчук О.В., Мозговий В.В., Мішутін А.В., Онищенко А.М., Павлюк Д.О., Панченко О.В., Пушкарева К.К., Перельмутер А.В., Ряпухін В.М., Савенко В.Я., Саницький М.А., Солодкий С.Й., Стьожка В.В., Якименко Я.М., Нагайчук В.М., Радовський Б.С., Рунова Р.Ф., Чернигов В.О., Толмачев С.М., Толмачев Д.С., Чистяков В.В., Шургая А.Г., Штарк Й., Goldbeck A., Winkler E., Westergaard H. та інші дослідники.

Встановлено, що існуючі методи та критерії оцінки довговічності цементобетонного покриття носять розрізнений характер, так як при оцінюванні не в повній мірі враховують спільну дію усадки цементобетону, зміну напружень від річних і добових температур та дії пневматичних коліс транспортних засобів.

Розрахунок цементобетонних покриттів на основі теорії пружності вперше фундаментальний внесок у методи розрахунку був розроблений американським вченим Г.М. Вестергард (Harold Malkolm Westergaard), в якому застосовувалася модель Фусса-Вінклера, запропонована вітчизняним ученим Фуссах і характеризується коефіцієнтом основи. Він розв'язав задачу про згин плити на вінклерівській основі за різного розташування навантаження: у центральній частині плити, на краю і в куті. Він запропонував формулу для напружень і вертикальних переміщень,

неодноразово вдосконалюючи своє рішення [78]. Також з Г.М. Вестергард цінний внесок в теорію розрахунку внесли такі зарубіжні вчені, як Бредбері, Харджер, Ольдер, Вільямс, Вільсон і інші [8].

Довгий час розрахунок дорожнього одягу з цементобетонним покриттям виконувався за методом граничних станів. Завдання розрахунку полягало в тому, щоб забезпечити запас міцності для запобігання настання в період експлуатації під впливом транспортних навантажень і природно-кліматичних факторів граничного стану. Перша теорія ґрунтується на такій гіпотезі: у момент настання граничного стану конструкція не здатна чинити опір зовнішнім впливам, що призводить до втрати несучої здатності. Несуча здатність покриття забезпечувалася умовою:

$$M_p \leq M_{np}, \quad (2.1)$$

де M_p — розрахунковий момент в перерізі плити при найбільш не вигідному положенні коліс;

M_{np} — гранично допустимий для даного перетину згинальний момент.

У відповідності діючого нормативно-технічним документом ГБН В.2.3-37641918-557 та ВБН В.2.3 – 218 цементобетонні покриття розраховують на тріщиностійкість від дії транспорту згідно першої теорії міцності, яка базується на зіставленні розрахункової міцності бетону на розтяг при згині і напруг, що виникають внаслідок прикладання навантаження і температури. Напруження розтягу в разі згину визначають для розрахунку товщини покриття за умови гарантованого повного контакту плити з основою за рахунок стійкості земляного полотна і відсутності нерівномірних осідань або випирань [172,173]. Згідно даного нормативного методу вимагається, щоб напруження, що виникають в покритті дорожнього одягу при прогині від дії повторних короточасних навантажень, не

викликали порушення структури цементобетону, не утворювались тріщини, тобто повинна забезпечуватись умова:

$$K_{np} \leq \frac{R_{роз}}{\sigma_{pt}}, \quad (2.2)$$

де K_{np} — коефіцієнт міцності;

$R_{роз}$ — розрахункова міцність бетону на розтяг при згині;

σ_{pt} — напруження розтягнення при вигині, що виникають в бетонному покритті від дії навантаження, з урахуванням перепаду температури по товщині плити.

У разі, коли напруження перевищить міцність при згині — настане руйнування цементобетонного покриття. Виникнення напружень в бетонному покритті пов'язано з такими факторами, як: тимчасове навантаження; коливання температури; зміна вологості цементобетону; зміна властивостей ґрунтів земляного полотна під впливом намочування і висушування; спучування ґрунту земляного полотна під впливом промерзання. Під час дії навантажень на підшві цементобетонному покритті виникають максимальні напруження у центрі поздовжнього зовнішнього краю за довжиною плити. Але постійна дія навантаження саме в цьому набагато менша і становить декілька відсотків від розрахункового числа проїздів для центральної частини плити (в методі РАС прийнято 6 %) [78].

Критеріями стійкості основи є стійкість незв'язних матеріалів в шарах основи і ґрунту земляного полотна зсуву; стійкість до недопустимих деформацій під торцями плит і недопустимих уступів між плитами. Для доріг I — III категорій величину гранично допустимих деформацій або висоту уступів між плитами у поперечних швах встановлюють не більше ніж 0,3 см. Друга теорія міцності ґрунтується на такій гіпотезі: під час розрахунку за

критерієм недопустимих уступів між плитами (висотою не більше ніж 0,3 см) стійкість вважають забезпеченою при умові :

$$q_{роз} \leq q_{доп}, \quad (2.3)$$

де $q_{роз}$ — розрахунковий тиск (МПа) на основі під час навантаження обох кутів плит біля поперечного шва;

$q_{доп}$ — допустимий тиск (МПа) на основу визначається за формулою [14].

Третя теорія міцності ґрунтується на такій гіпотезі: під час розрахунку конструкції у пружній стадії за заданого рівня надійності стійкість основи вважається забезпеченою за умови [77, 78, 83]:

$$K_{np} \leq T_{доп} / T_{акт}, \quad (2.4)$$

де $T_{доп}$ і $T_{акт}$ — активні та допустимі напруження зсуву, визначають згідно з [13] з урахуванням, що у зоні швів покриття розрахунковий модуль пружності $E_{роз}$ цементобетонного покриття набуде значень, які наведені у табл. 2.3 [173].

Однак, вище зазначені теорії міцності можна застосовувати тільки при крихкому руйнуванні. І не можуть враховувати одночасно міру пошкодження монолітної структури цементобетонного покриття автомобільних доріг від дії усадки цементобетону при твердінні, зміни спільного впливу річних і добових температур, та дії пневматичних коліс транспортних засобів.

Під дією пневматичних коліс транспортних засобів в цементобетонному покритті виникають деформації згину при відповідному часі дії навантаження, а при зміні температури покриття — деформація стиск,

розтяг і згин. Тривалість деформації залежить від часу дії навантаження або температури [8]. Виходячи із існуючих теоретичних положень (розділ 1) про властивості матеріалів на основі неорганічних в'язучих (цементобетону), зрозуміло, що для забезпечення їх суцільності необхідно мати дещо іншу умову тривалої міцності, що враховує характер руйнування при змінному в часі напруженні і змінній в часі температурі. Тому що для збереження суцільності матеріалів на неорганічному в'язучому, що виявляють пружні, в'язко-пластичні властивості, недостатньо, як було сказано вище, традиційних для пружних матеріалів вимог (напруження в будь-який момент менші межі міцності матеріалу), а варто ще врахувати закономірності попередньої зміни напруження.

Для вирішення поставлених задач, необхідно мати умову міцності, що враховує часовий характер руйнування цементобетонного покриття при змінних в часі напруженнь і температури.

Вихідною інформацією про міцнісні властивості цементобетонного покриття автомобільних доріг при вивченні тривалої міцності є, як відомо, результат випробування на довговічність при постійному навантаженні (наприклад, в умовах осьового розтягу) і постійній температурі T . При цьому визначають, як правило, залежність часу до руйнування t^* від напруження і температури, що витримує зразок, від часу дії постійного навантаження і від температури:

$$t^* = t^*(\sigma, T), \quad (2.5)$$

Найчастіше використовують степеневий або експонентний вираз для цих залежностей [85, 88, 109, 110, 131]:

$$t^*(\sigma, T) = B_t \sigma^{-b}, \quad (2.6)$$

де B_t , b — постійні, що залежать від температури.

Формула (2.6) — відома залежність Г.М.Бартенєва, застосування якої до бетонів показано в роботах [85, 88, 109, 110, 131, 132, 153, 182, 190].

В даному випадку для оцінки довговічності цементобетонного покриття автомобільних доріг з урахуванням характеру дії навантаження транспортних засобів зміни температури та усадки бетону, пропонується визначати граничний стан яким можна описувати умовам довготривалої міцності Іллюшина чи Бейлі відповідно:

$$\int_0^{t_p} \frac{d\sigma(t)}{\sigma^*(\sigma(t_p - t), T(t))} \leq 1, \quad (2.7)$$

$$\int_0^{t_p} \frac{dt}{t^*(\sigma(t), T(t))} \leq 1, \quad (2.8)$$

де t_p — час до руйнування (розтріскування) покриття;

t^* — функція довговічності цементобетону;

σ^* — граничне напруження цементобетону;

$\sigma(t)$ — напруження в цементобетонні;

$T(t)$ — температура цементобетону.

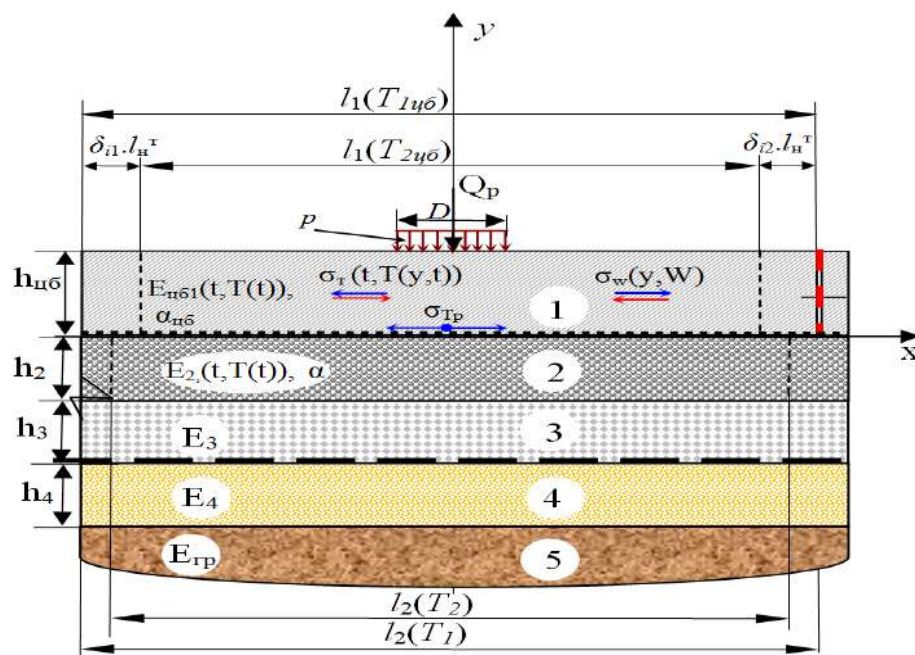
Як відомо з результатів наукових досліджень [8,102-111] що, правило лінійного підсумовування, як критерій Бейлі, більш простіший і зручний у застосовуні, особливо в інженерних розрахунках, у порівнянні із критерієм Іллюшина. Враховуючи, що критерій Бейлі можна використовувати для оцінки довговічності цементобетонного покриття [85, 88, 109, 110, 131, 132] Тому на практиці існують різні варіанти конструкції жорсткого дорожнього одягу, для руху сучасних транспортних засобів наведено в роботах [102-107,153].

В дисертаційній роботі пропонується варіант (рис. 2.1) конструкції жорсткого дорожнього одягу з різними шарами основи під цементобетонне покриття, а саме: щебінь гранітний по способу заклинки та (або) пісний бетон, асфальтобетон. Розрахункове місце прикладення навантаження до

цементобетонного покриття дорожнього одягу – поздовжній зовнішній край у центрі по довжині плити.

Між шаром цементобетонного покриття і укріпленої основи для можливості вільного переміщення плити при температурних деформаціях використовується геотекстильний прошарок або поліетиленової плівки (рис.2.1). Це принципі використовується для подальшого розрахунку жорсткого дорожнього одягу [102-107].

Оскільки характеристики міцності цементобетону залежать як від температури, так і від часу дії навантаження, проявляючи кінетичний характер руйнувань, то граничне прикладання навантаження на цементобетонне покриття на автомобільних дорогах визначали з використанням феноменологічного підходу у вигляді сумарної міри пошкодження структури цементобетону M_{Π} за час t зміни напруження, що відповідають певному рівню напружень для розрахункової схеми (рис. 2.1).



Конструкція дорожнього одягу включає в себе: 1 — цементобетонне покриття (товщиною від $h_{цб} = 17 — 28$ см); розділяючий прошарок із геотекстилю або поліетиленової плівки; 2 — щебінь гранітний фр. (20 — 40) мм по способу заклинки та (або) пісний бетон та (або) асфальтобетон; 3 — щебінь гранітний фр. 40 — 70 мм, по способу заклинки; геосинтетичний розділяючий матеріал; 4 — шар піску дрібнозернистого; 5 — ґрунт земляного полотна; $\sigma_w(y, W)$ — напруження від усадки цементобетону; $\sigma_t(t, T(y, t))$ — температурні напруження; σ_{Tp} — горизонтальні нормальні напруження; $\delta_{i2} \cdot l_n^m$, $\delta_{i1} \cdot l_n^m$ — довжина, на яку скорочується цементобетонне покриття; $\delta_{i1} \cdot l_{nT}$, $\delta_{i2} \cdot l_{nT}$ — довжина на яку скорочується цементобетонне покриття, де $\delta_{i1} + \delta_{i2} = 1$; $l_1(T_{1цб})$, $l_2(T_1)$ — довжина цементобетонного покриття та основи до початку температурного скорочення; $l_1(T_{2цб})$, $l_2(T_2)$ — довжина відповідно цементобетонного покриття та основи, після температурного

скорочення; $\alpha_{цб}$, α — коефіцієнт лінійного температурного розширення цементобетону та основи; $E_{цб1}(t, T(t))$, $E_2(t, T(t))$ — модуль пружності цементобетону та основи, який залежить від часу дії навантаження; E_3 , E_4 , $E_{тр}$ — модуль пружності відповідних шарів основи.

Рисунок 2.1 — Розрахункова схема цементобетонного покриття автомобільної дороги з урахуванням спільного впливу усадки цементобетону при твердінні, зміни температури і дії пневматичних коліс транспортних засобів

З урахуванням вище наведеного пропонуються оцінювати граничний стан цементобетонного покриття автомобільних доріг за залежністю:

$$M_{II}(t, T(y, t), W) \leq [M_{цб}], \quad (2.9)$$

де $[M_{цб}]$ — гранично допустиме значення міри пошкодження, що приймається рівним 1;

$M_{II}(t, T(y, t), W)$ — сумарна міра пошкодження цементобетонного покриття, це відносна безрозмірна величина, яка визначається за залежністю:

$$M_{II}(t, T(y, t), W) = M_{Tp}(t) + M_{Tem}(t, T(y, t)) + M_{усад}(t, y, W), \quad (2.10)$$

де $M_{Tp}(t)$, — міра пошкодження від дії пневматичних коліс транспортного засобів і залежить від часу (t), визначається за аналітичною залежністю (2.11):

$$M_{Tp}(t) = \frac{N_{pt}}{N(t)}, \quad (2.11)$$

де N_{pt} — сумарна інтенсивність руху, що визначається за методикою ГБН В.2.3-37641918-557;

$N(t)$ — гранично допустима кількість розрахункового навантаження, що може витримати цементобетонне покриття при дії горизонтального розтягуючого напруження σ_p при згині.

Проведені багаточисленні результати випробувань Малеванським Г.В., Радовським Б.С, дорожньо-будівельних матеріалів, що містять неорганічні в'язучі (цемент) речовини, підтверджуються, що опірність цих матеріалів повторним навантаженням описується однотипним рівнянням [105-107]. Тому значення N встановлюється за аналітичною залежністю:

$$N(t) = \left(\frac{K_p \cdot R_i^p}{\sigma_p(t)} \right)^m, \quad (2.12)$$

де K_p — комплексний коефіцієнт, рівний $K_p = 1,65$ для доріг Ia — II категорії, $K_p = 1,60$ — Ib — II, $K_p = 1,55$ — III та $K_p = 1,50$ для доріг IV — V категорії;

R_i^p — розрахункова міцність цементобетону на розтяг при згині визначається згідно [172]:

$$R_i^p = B_{tb} \cdot K_M \cdot K_y \cdot K_{морз}, \quad (2.13)$$

B_{tb} — клас бетону за міцністю на розтяг при згині;

K_M — коефіцієнт набору міцності цементобетону в залежності від температури повітря;

K_y — коефіцієнт втоми цементобетону при повторному навантаженні;

m — показник втоми цементобетону (приймається 0,063) або за експериментальними даними;

$K_{морз}$ — коефіцієнт морозостійкості цементобетону (приймається 0,96) або визначається за залежністю:

$$K_{морз} = \frac{R_{btb}^n}{R_{btb}}, \quad (2.14)$$

R_{btb} , R_{btb}^n — міцність на розтяг при згині цементобетонних зразків-балочок відповідно до i , після n циклів заморожування і відтавання;

R_p — розрахункова міцність на розтяг при згині в залежності від коефіцієнт міцності заданої надійності та дії розрахункового транспортного навантаження.

$\sigma_p(t)$ — розрахункове напруження розтягу при згині з урахуванням коефіцієнт міцності заданої надійності, що виникають у цементобетонному покритті від дії навантаження з урахуванням перепаду температури по товщині плити;

$M_{Тем}(t, T(y, t))$ — міра пошкодження цементобетонного покриття від зміни температури відповідного сезону (n_i) за залежністю:

$$M_{Тем}(t, T(y, t)) = n_i \int_0^{t_p} \frac{\sigma_{утем}(t, T(y, t))^{b_\tau}}{B_\tau} dt, \quad (2.15)$$

$\sigma_{утем}(t, T(y, t))$ — сумарні річні та добові температурні напруження при гармонічній зміні температури, які складаються із літніх ($\sigma_{л}$), осінньо-весняних ($\sigma_{о./в}$) і зимових (σ_3), МПа;

n_i — період сезону;

b_τ , B_τ — параметри функції довговічності цементобетону;

t_p — час до руйнування, с.

$M_{\text{усад}}(t, y, W)$ — міра пошкодження цементобетонного покриття від дії усадки цементобетону при тужавінні визначається за залежністю:

$$M_{\text{усад}}(t, y, W) = \int_0^{t_p} \frac{\sigma_{\text{усад}}(t, y, W)^{b_{\text{усад}}}}{B_{\text{усад}}} dt, \quad (2.16)$$

$b_{\text{усад}}, B_{\text{усад}}$ — параметри функції довговічності цементобетону після усадки бетону;

$\sigma_{\text{усад}}(t, y, W)$ — напруження в цементобетоні від усадки цементобетону при твердінні в залежності від вологості (W) часу (t) спостереження та початкової товщини шару (y) МПа.

2.3 Визначення міри пошкодження цементобетонного покриття автомобільних доріг від усадки цементобетону при твердінні

Для детального процесу дослідження усадки цементовмісних матеріалів з кристалізаційною структурою величину усадки ділять на частину, що обумовлена випаровуванням води і частину обумовлену процесами твердіння [47,48]. Для спрощення розрахунків об'єднаємо ці процеси в один.

При нерівномірному розподілі води $W(z, t)$ по товщині h цементовмісного матеріалу з кристалізаційною структурою в ньому виникають пружні напруження $\sigma_w(z, W)$, що описуються формулою:

$$\sigma_w(y, W) = \frac{\alpha \cdot E}{1 - \mu} \cdot \left[W(y, t) - \frac{1}{h} \cdot \int_0^h W(y, t) dz - \frac{12 \cdot (1 - C_x) \cdot \left(\frac{h}{2} - y\right)}{h^3} \cdot \int_0^h W(y, t) \cdot \left(\frac{h}{2} - y\right) dy \right], \quad (2.17)$$

де $\sigma_w(y, W)$ — напруження в цементобетоні від усадки, МПа;

y — поточна координата по товщині шару, м;

t — час догляду, год;

h — товщина шару, м;

C_x — коефіцієнт міри жолоблення;

α — коефіцієнт усадки, який характеризує зменшення лінійного розміру зразка при видаленні з нього 1 % вологи;

E — модуль пружності, МПа;

μ — коефіцієнт Пуассона;

$W(y, t)$ — функція розподілу вологи по товщині шару цементобетону.

Формула (2.17) аналогічна формулі акад. С. П. Тимошенко [47,48] для визначення температурних напружень в цементобетонних покриттях, тільки замість розрахункової функції розподілення температури по товщині покриття або шару дорожнього одягу використовується функція розподілу вологи.

Поле вологості цементобетонного покриття або шару дорожнього одягу з кристалізаційною структурою формується під дією випаровування води за рахунок температури і вітру, фізико-хімічних процесів гідратації і гідролізу води з цементом, а також можливою втратою води з цементобетонної суміші через нижче розташований шар або ґрунт земляного полотна [47,48].

Рішення базується на теорії пружності і враховує наступні параметри: масообмін (водяний пар, рідка фаза води), який формується під впливом втрат вологи на межах шару і викликає нерівномірний розподіл вологості по товщині шару; коефіцієнт вологопровідності, модуль пружності, коефіцієнт усадки, які відображають структуру і характеристики матеріалу; а також час догляду і міру жолоблення. Тому пропонується визначити розтягуючі напруження від усадки в цементобетонному покритті автомобільної дороги при тужавінні та твердінні без можливості коробитися:

$$\begin{aligned} \sigma_w(y, W) = & \frac{\alpha \cdot E \cdot t \cdot (m - m_1)}{1 - \mu} \cdot \left(\frac{y}{h} - 0,5 \right) + \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{2 \cdot h^2 \cdot \alpha \cdot E \cdot (m + m_1)}{\pi^3 \cdot n^3 \cdot a_1 \cdot (1 - \mu)} \cdot \\ & \cdot \left\{ \sin \frac{\pi \cdot n \cdot y}{h} - \frac{2}{\pi \cdot n} - e^{-\frac{a_1 \cdot t \cdot (\pi \cdot n)^2}{h^2}} \right\} + \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{2 \cdot h^2 \cdot \alpha \cdot E}{\pi^3 \cdot n^3 \cdot a_1 \cdot (1 - \mu)} \cdot e^{-\frac{a_1 \cdot t \cdot (\pi \cdot n)^2}{h^2}} \cdot \left\{ \frac{2 \cdot m}{\pi \cdot n} + \frac{2 \cdot m_1}{\pi \cdot n} \right\} + \\ & + \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} \frac{2 \cdot h^2 \cdot \alpha \cdot E \cdot (m - m_1)}{\pi^3 \cdot n^3 \cdot a_1 \cdot (1 - \mu)} \cdot \left(\sin \frac{\pi \cdot n \cdot y}{h} - e^{-\frac{a_1 \cdot t \cdot (\pi \cdot n)^2}{h^2}} \right) \end{aligned} \quad (2.18)$$

де $\sigma_w(y, W)$ — напруження в цементобетонні від усадки, МПа;

C_x — коефіцієнт міри жолоблення;

α — коефіцієнт усадки, який характеризує зменшення лінійного розміру зразка при видаленні з нього 1 % вологи;

E — модуль пружності, МПа;

μ — коефіцієнт Пуассона;

$W(y, t)$ — функція розподілу вологи по товщині шару цементобетону.

a_1 — коефіцієнт вологопровідності, м²/год;

$W_{\text{п}}$ — початкова вологість, %;

m — коефіцієнт інтенсивності зміни вологи на верхній поверхні шару цементобетону від температури та швидкості вітру, %/год;

m_1 — коефіцієнт інтенсивності зміни вологи на нижній поверхні шару цементобетону, %/год.

Визначення напруження від усадки в цементобетонному покритті при тужавінні та твердінні з можливістю коробитися:

$$\begin{aligned}
\sigma_w(y, W) = & \frac{\alpha \cdot E \cdot t \cdot (m - m_1)}{1 - \mu} \cdot \left(\frac{y}{h} - 0,5 \right) + \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{2 \cdot h^2 \cdot \alpha \cdot E \cdot (m + m_1)}{\pi^3 \cdot n^3 \cdot a_1 \cdot (1 - \mu)} \cdot \\
& \cdot \left\{ \sin \frac{\pi \cdot n \cdot y}{h} - \frac{2}{\pi \cdot n} - e^{-\frac{a_1 \cdot t \cdot (\pi \cdot n)^2}{h^2}} \right\} + \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{2 \cdot h^2 \cdot \alpha \cdot E}{\pi^3 \cdot n^3 \cdot a_1 \cdot (1 - \mu)} \cdot e^{-\frac{a_1 \cdot t \cdot (\pi \cdot n)^2}{h^2}} \cdot \left\{ \frac{2 \cdot m}{\pi \cdot n} + \frac{2 \cdot m_1}{\pi \cdot n} \right\} + \\
& + \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} \frac{2 \cdot h^2 \cdot \alpha \cdot E \cdot (m - m_1)}{\pi^3 \cdot n^3 \cdot a_1 \cdot (1 - \mu)} \cdot \left(\sin \frac{\pi \cdot n \cdot y}{h} - e^{-\frac{a_1 \cdot t \cdot (\pi \cdot n)^2}{h^2}} \right) - \frac{12 \cdot (1 - C_x) \cdot \left(\frac{h}{2} - z \right) \cdot \alpha \cdot E}{(1 - \mu)} \cdot \\
& \left[-\frac{h^2 \cdot t \cdot (m - m_1)}{12} + \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{h^4}{\pi^3 \cdot n^3 \cdot a_1} \cdot \left\{ \frac{m}{\pi \cdot n} \right\} + \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} \frac{h^4}{\pi^3 \cdot n^3 \cdot a_1} \cdot \right. \\
& \cdot \left. \left\{ \frac{2 \cdot m}{\pi \cdot n} - \frac{2 \cdot m}{\pi \cdot n} \cdot e^{-\frac{a_1 \cdot t \cdot (\pi \cdot n)^2}{h^2}} - \frac{2 \cdot m_1 \cdot (-1)^n}{\pi \cdot n} + \frac{2 \cdot m_1 \cdot (-1)^n}{\pi \cdot n} \cdot e^{-\frac{a_1 \cdot t \cdot (\pi \cdot n)^2}{h^2}} \right\} \right], \quad (2.19)
\end{aligned}$$

Якщо в формулі (2.18) C_x дорівнює одиниці, то це означає відсутність короблення в цементобетонному або іншому цементовмісному шарі дорожнього одягу і формула (2.18) автоматично перетворюється в формулу (2.19).

На основі теоретичного рішення можна розраховувати напруження від усадки, що виникають в цементобетонному покритті автомобільних доріг з кристалізаційною структурою при тужавінні та твердінні. Отримані залежності (2.17, 2.18) дозволяють розраховувати напруження від усадки на будь-якій глибині шару і в будь-який момент часу догляду за цим шаром, а в подальшому дозволять уточнити розрахунки довговічності цементобетонного покриття.

Міра пошкодження цементобетонного покриття від усадки цементобетону при тужавінні та твердінні без можливості коробитися з урахуванням залежності (2.18) буде мати такий вид:

$$M_{\text{усад}}(t) = \int_0^{t_p} \left[\frac{\alpha \cdot E \cdot t \cdot (m - m_1)}{1 - \mu} \cdot \left(\frac{y}{h} - 0,5 \right) + \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{2 \cdot h^2 \cdot \alpha \cdot E \cdot (m + m_1)}{\pi^3 \cdot n^3 \cdot a_1 \cdot (1 - \mu)} \cdot \left\{ \sin \frac{\pi \cdot n \cdot y}{h} - \frac{2}{\pi \cdot n} - e^{-\frac{a_1 \cdot t \cdot (\pi \cdot n)^2}{h^2}} \right\} + \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{2 \cdot h^2 \cdot \alpha \cdot E}{\pi^3 \cdot n^3 \cdot a_1 \cdot (1 - \mu)} \cdot e^{-\frac{a_1 \cdot t \cdot (\pi \cdot n)^2}{h^2}} \cdot \left\{ \frac{2 \cdot m}{\pi \cdot n} + \frac{2 \cdot m_1}{\pi \cdot n} \right\} + \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} \frac{2 \cdot h^2 \cdot \alpha \cdot E \cdot (m - m_1)}{\pi^3 \cdot n^3 \cdot a_1 \cdot (1 - \mu)} \cdot \left(\sin \frac{\pi \cdot n \cdot y}{h} - e^{-\frac{a_1 \cdot t \cdot (\pi \cdot n)^2}{h^2}} \right) \right] \cdot \frac{B_{\text{усад}}}{dt} \quad (2.20)$$

Міра пошкодження цементобетонного покриття від усадки цементобетону при тужавінні та твердінні із можливістю коробитися з урахуванням залежності (2.19) буде мати такий вид:

$$M_{\text{усад}}(t) = \int_0^{t_p} \left[\frac{\alpha \cdot E \cdot t \cdot (m - m_1)}{1 - \mu} \cdot \left(\frac{y}{h} - 0,5 \right) + \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{2 \cdot h^2 \cdot \alpha \cdot E \cdot (m + m_1)}{\pi^3 \cdot n^3 \cdot a_1 \cdot (1 - \mu)} \cdot \left\{ \sin \frac{\pi \cdot n \cdot y}{h} - \frac{2}{\pi \cdot n} - e^{-\frac{a_1 \cdot t \cdot (\pi \cdot n)^2}{h^2}} \right\} + \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{2 \cdot h^2 \cdot \alpha \cdot E}{\pi^3 \cdot n^3 \cdot a_1 \cdot (1 - \mu)} \cdot e^{-\frac{a_1 \cdot t \cdot (\pi \cdot n)^2}{h^2}} \cdot \left\{ \frac{2 \cdot m}{\pi \cdot n} + \frac{2 \cdot m_1}{\pi \cdot n} \right\} + \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} \frac{2 \cdot h^2 \cdot \alpha \cdot E \cdot (m - m_1)}{\pi^3 \cdot n^3 \cdot a_1 \cdot (1 - \mu)} \cdot \left(\sin \frac{\pi \cdot n \cdot y}{h} - e^{-\frac{a_1 \cdot t \cdot (\pi \cdot n)^2}{h^2}} \right) - \frac{12 \cdot (1 - C_x) \cdot \left(\frac{h}{2} - z \right) \cdot \alpha \cdot E}{(1 - \mu)} \cdot \left[-\frac{h^2 \cdot t \cdot (m - m_1)}{12} + \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{h^4}{\pi^3 \cdot n^3 \cdot a_1} \cdot \left\{ \frac{m}{\pi \cdot n} \right\} + \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} \frac{h^4}{\pi^3 \cdot n^3 \cdot a_1} \cdot \left\{ \frac{2 \cdot m}{\pi \cdot n} - \frac{2 \cdot m}{\pi \cdot n} \cdot e^{-\frac{a_1 \cdot t \cdot (\pi \cdot n)^2}{h^2}} - \frac{2 \cdot m_1 \cdot (-1)^n}{\pi \cdot n} + \frac{2 \cdot m_1 \cdot (-1)^n}{\pi \cdot n} \cdot e^{-\frac{a_1 \cdot t \cdot (\pi \cdot n)^2}{h^2}} \right\} \right] \right] \cdot \frac{B_{\text{усад}}}{dt} \quad (2.21)$$

2.4 Визначення міри пошкодження цементобетонного покриття автомобільних доріг від температурних напружень, що виникають внаслідок добових і річних температурних коливань

Для розглянутих розрахункових схем, з метою прогнозування температурних напружень, необхідно знати режим зміни температури цементобетонного покриття автомобільних доріг. Відомі результати

теоретичних і експериментальних досліджень свідчать, що на температурний режим цементобетону покриття впливають дві основні гармоніки [153,182,190]: зміна температури в річному та добовому циклі коливань.

Розрахунок розподілу температури по товщині покриття. При стаціонарному кондуктивному теплообміні в покритті розподілення температури $T(y, t)$ по товщині виражається лінійними функціями [108,109]:

$$T(y) = T_1 \left(1 - \frac{y}{h}\right) \text{ при } T_1 = T_n - T_{ng} \text{ и } T_n > T_{ng}, \quad (2.22)$$

$$T(y) = T_2 \cdot \frac{y}{h} \text{ при } T_2 = T_{ng} - T_n \text{ и } T_n < T_{ng}; \quad (2.23)$$

$$T(y) = T_n - (T_n - T_{ng}) \cdot \frac{y}{h} \text{ при } T_n > T_{ng}; \quad (2.24)$$

$$T(y) = T_n - (T_{ng} - T_n) \cdot \frac{y}{h} \text{ при } T_n < T_{ng}; \quad (2.25)$$

де T_{ng} — температура на підшві покриття.

При цьому в середній площині плити температура, задана функціями (2.22-2.25) відповідно рівна [108,109]:

$$T_1\left(\frac{h}{2}\right) = \frac{T_1}{2}; T_2\left(\frac{h}{2}\right) = \frac{T_2}{2}; T\left(\frac{h}{2}\right) = \frac{T_n + T_{ng}}{2} \quad (2.26)$$

Зміна температури $T(y, t)$ влюбі години доби по товщині покриття при гармонічній умові на поверхні в виді гармонічної функції може бути наближено знайдено на основі відомого рішення про розподіл температурних хвиль в на півпросторі [108,109]:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial T}{\partial t} &= a \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}, \quad 0 \leq y < \infty, \quad T_{y=0} = A_0 \cos \omega \cdot t, \\
T(y, t) &= A_0 \exp\left(-y \sqrt{\frac{\omega}{2a}}\right) \cdot \cos\left(\omega \cdot t - y \sqrt{\frac{\omega}{2a}}\right); \\
T(y, t) &= A_0 \exp\left(-y \sqrt{\frac{\omega}{2a}}\right) \cdot \sin\left(\omega \cdot t - y \sqrt{\frac{\omega}{2a}} + \frac{\pi}{2}\right),
\end{aligned} \tag{2.27}$$

де a — коефіцієнт температуропровідності цементобетону, $\text{м}^2/\text{г}$.

У формулі (2.27) експонента $\exp\left(-y \sqrt{\frac{\omega}{2a}}\right)$ дає коефіцієнт пониження амплітуди A_0 по товщині покриття, а $\cos\left(\omega \cdot t - y \sqrt{\frac{\omega}{2a}}\right)$ — зміна амплітуди в часі з зсувом фаз на величину $y \cdot \sqrt{\frac{\omega}{2a}}$.

Використовуючи формулу (2.27) і початкові умови про нульовий градієнт в покритті після 2-3 годин від сходу сонця, отримаємо розрахункову формулу [99, 100]:

$$T(y, t) = T_c \left(1 - \frac{y}{b_0}\right) + A_0 \exp\left(-y \sqrt{\frac{\omega}{2a}}\right) \cos\left(\omega \cdot t - y \sqrt{\frac{\omega}{2a}} - \varphi_0\right) \tag{2.28}$$

де φ_0 — зсув фаз температури поверхні покриття от $T_{n \max}$ до $T_{ніч}$ при $t = 0$, виражаємо в градусах.

Величину коефіцієнту b_0 у формулі (2.28) знайдемо з рівності $T(0, 0) = T(y, 0)$ або

$$T_c + A_0 \cos(-\varphi_0) = T_c \left(1 - \frac{y}{b_0}\right) + A_0 \exp\left(-y \sqrt{\frac{\omega}{2a}}\right) \cdot \cos\left(-y \sqrt{\frac{\omega}{2a}} - \varphi_0\right) \tag{2.29}$$

$$\text{звідки} \quad b_0 = \frac{y \cdot T_c}{A_0 \cdot \left[\exp\left(-y \sqrt{\frac{\omega}{2 \cdot a}}\right) \cdot \cos\left(-y \sqrt{\frac{\omega}{2 \cdot a}} - \varphi_0\right) - \cos \varphi_0 \right]} \quad (2.30)$$

З урахуванням залежності (2.28) можемо записати вираз для розрахунку температурного режиму цементобетонного покриття у вигляді бігармонічного закону наступного виду:

$$T(y, t) = T_c \left(1 - \frac{y}{b_0}\right) + A_0 \exp\left(-y \sqrt{\frac{\omega_0}{2 \cdot a}}\right) \cos(\omega_0 \cdot t - y \sqrt{\frac{\omega_0}{2 \cdot a}} - \varphi_0) + A_p \exp\left(-y \sqrt{\frac{\omega_p}{2 \cdot a}}\right) \cos(\omega_p \cdot t - y \sqrt{\frac{\omega_p}{2 \cdot a}} - \varphi_p) \quad (2.31)$$

де T_c — середня температура покриття;

$\bar{A}_p$ — середня по товщині амплітуда коливань температури покриття в річному циклі;

$\bar{A}_0$ — середня по товщині амплітуда коливань температури покриття в добовому циклі.

Дане рішення виразу (2.31) використовувалося в роботах [108,109] для визначення температури по глибині цементобетонного покриття на автомобільних дорогах. Тому, дане рішення прийняте для досліджень.

Для встановлення параметрів виразу (2.31) скористаємося відомими підходами, що наведено в літературі [108,109]. Тоді амплітуду річних коливань (A_{np}) можна описати наступним виразом:

$$A_{np} = \left(\frac{T_{n, \max} - T_{n, \min}}{2} \right), \quad (2.32)$$

де $T_{n, \max}$, $T_{n, \min}$ — середньомісячна температура поверхні покриття відповідно самого теплого і самого холодного місяців.

Згідно методики [108,109,121] температуру покриття у самому теплому місяці $T_{n,\max}$ з урахуванням впливу сонячного нагріву можна встановити за залежністю:

$$T_{n,\max} = \frac{4(\pi + 1)t_{нов,\max}}{3\pi}, \quad (2.33)$$

Середньомісячну температуру самого холодного місяця для цементобетонного покриття доцільно прирівнювати до відповідної температури повітря:

$$T_{n,\min} = t_{нов,\min}, \quad (2.34)$$

де $t_{нов,\min}$, $t_{нов,\max}$ — розрахункові значення середньомісячної температури повітря відповідно для самого холодного місяця (січень) та самого теплого місяця (липень).

З урахуванням статистичного розкиду розрахункові значення $t_{нов,\min}$, $t_{нов,\max}$ можуть бути визначені за наступними залежностями [108,109,121]:

$$t_{нов,\min} = \bar{t}_{нов,\min} - \sigma_t t, \quad (2.35)$$

$$t_{нов,\max} = \bar{t}_{нов,\max} - \sigma_t t, \quad (2.36)$$

де $\bar{t}_{нов,\min}$, $\bar{t}_{нов,\max}$ — середні багаторічні значення середньомісячної температури повітря відповідно для самого холодного місяця та самого теплого місяця, встановлюється на основі кліматичних даних;

σ_t — середнє квадратичне відхилення середньомісячної температури повітря, що визначається в залежності від проектної надійності згідно методики [108,109,121];

t — коефіцієнт нормованого відхилення.

Таким чином, згідно залежності (2.31) з урахуванням (2.32 — 2.36) є можливість описувати зміну температури цементобетонного покриття для різних регіональних кліматичних умов.

Крім бігармонічного закону зміни температури покриття, практичний інтерес має швидкість його охолодження. У цьому випадку, використовуючи параметри (2.31) [108], можна записати:

— при добових коливаннях температури

$$k_{\partial} = \frac{2A_{\partial}}{0,5t_{\partial}} = \frac{4A_{\partial}}{t_{\partial}}, \quad (2.37)$$

де t_{∂} — період добових коливань температури;

— при річних коливаннях температури

$$k_p = \frac{2A_p}{0,5t_p} = \frac{4A_p}{t_p}, \quad (2.38)$$

де t_p — період річних коливань температури.

Такий гармонійний характер зміни температури покриття викликає циклічну зміну температурних напружень в цементобетонному покритті.

При відсутності в покритті повздовжніх деформацій і короблення температурні напруження визначають по формулі $\sigma_{1T} = E \cdot a \cdot T(y)$ з урахуванням гармонічної функції температури $T(y, t)$, вираженої, наприклад, формулою [99, 100]. Щоб визначити напруження σ_{1T} на підшві або на поверхні

покриття за формулою $\sigma_{1T} = E \cdot a \cdot T(y)$, достатньо у формулі [108,109,121] прийняти відповідно $y=h$ або $y=0$.

При вільних повздовжніх деформаціях розрахунок температурних напружень в плитах, не маючих можливості коробитися ($C_x=1$) або маючих часткову можливість короблення ($C_x<1$), визначають за формулою [108,109,121] з урахуванням (2.37, 2.38)

$$\sigma_T(t, T(y, t)) = k \cdot E(t) \cdot (\alpha_{цб} - \alpha_{осн}) \cdot (T(y) - \frac{k \cdot E(t) \cdot (\alpha_{цб} - \alpha_{осн})}{h}) - \frac{12 \cdot k \cdot E(t) \cdot (\alpha_{цб} - \alpha_{осн}) \cdot (\frac{h}{2} - y) \cdot (1 - C_x)}{h^3} \int_0^h T(y, t) \cdot (\frac{h}{2} - y) dy, \quad (2.39)$$

де $T(y, t)$ — гармонічна функція температури по товщині покриття визначається за (108);

$E(t, T)$ — модуль пружності цементобетону, який залежить від часу дії навантаження;

$\alpha_{цб}$ — коефіцієнт лінійного температурного розширення цементобетону;

$\alpha_{осн}$ — коефіцієнт лінійного температурного розширення основи;

h — товщина покриття;

y — задана глибина.

Міра пошкодження цементобетонного покриття від зміни напружень з урахуванням добових і річних температурних коливань, визначається за наступною залежністю для розрахункової схеми (2.1):

$$M_{Tem}(t, T(y, t)) = \left(n_{i(x)} \int_0^{t_i} \frac{dt}{B_x \cdot (\sigma_x^p(T(y, t)) + \sigma_x^d(T(y, t)))^{-b\tau_x}} + n_{i(o, \delta)} \int_0^{t_i} \frac{dt}{B_{o, \delta} \cdot (\sigma_{o, \delta}^p(T(y, t)) + \sigma_{o, \delta}^d(T(y, t)))^{-b\tau_{o, \delta}}} + n_{i(z)} \int_0^{t_i} \frac{dt}{B_z \cdot (\sigma_z^p(T(y, t)) + \sigma_z^d(T(y, t)))^{-b\tau_z}} \right), \quad (2.40)$$

де

$$\sigma_{\pi}^p(t, T(y, t)) = k \cdot E_{\pi}^p(t) \cdot \alpha_{\text{цб}} \cdot T(y) - \frac{k \cdot E_{\pi}^p(t) \cdot \alpha_{\text{цб}}}{h}$$

$$\int_0^h T(y, t) dy - \frac{12 \cdot k \cdot E_{\pi}^p(t) \cdot \alpha_{\text{цб}} \cdot \left(\frac{h}{2} - y\right) \cdot (1 - C_x)}{h^3} \int_0^h T(y, t) \cdot \left(\frac{h}{2} - y\right) dy$$

$$\sigma_{\pi}^{\partial}(t, T(y, t)) = k \cdot E_{\pi}^{\partial}(t) \cdot \alpha_{\text{цб}} \cdot T(y) - \frac{k \cdot E_{\pi}^{\partial}(t) \cdot \alpha_{\text{цб}}}{h}$$

$$\int_0^h T(y, t) dy - \frac{12 \cdot k \cdot E_{\pi}^{\partial}(t) \cdot \alpha_{\text{цб}} \cdot \left(\frac{h}{2} - y\right) \cdot (1 - C_x)}{h^3} \int_0^h T(y, t) \cdot \left(\frac{h}{2} - y\right) dy$$

$$\sigma_{o, \epsilon}^p(t, T(y, t)) = k \cdot E_{o, \epsilon}^p(t) \cdot \alpha_{\text{цб}} \cdot T(y) - \frac{k \cdot E_{o, \epsilon}^p(t) \cdot \alpha_{\text{цб}}}{h}$$

$$\int_0^h T(y, t) dy - \frac{12 \cdot k \cdot E_{o, \epsilon}^p(t) \cdot \alpha_{\text{цб}} \cdot \left(\frac{h}{2} - y\right) \cdot (1 - C_x)}{h^3} \int_0^h T(y, t) \cdot \left(\frac{h}{2} - y\right) dy$$

$$\sigma_{o, \epsilon}^{\partial}(t, T(y, t)) = k \cdot E_{o, \epsilon}^{\partial}(t) \cdot \alpha_{\text{цб}} \cdot T(y) - \frac{k \cdot E_{o, \epsilon}^{\partial}(t) \cdot \alpha_{\text{цб}}}{h}$$

$$\int_0^h T(y, t) dy - \frac{12 \cdot k \cdot E_{o, \epsilon}^{\partial}(t) \cdot \alpha_{\text{цб}} \cdot \left(\frac{h}{2} - y\right) \cdot (1 - C_x)}{h^3} \int_0^h T(y, t) \cdot \left(\frac{h}{2} - y\right) dy$$

$$\sigma_3^p(t, T(y, t)) = k \cdot E_3^p(t) \cdot \alpha_{\text{цб}} \cdot T(y) - \frac{k \cdot E_3^p(t) \cdot \alpha_{\text{цб}}}{h}$$

$$\int_0^h T(y, t) dy - \frac{12 \cdot k \cdot E_3^p(t) \cdot \alpha_{\text{цб}} \cdot \left(\frac{h}{2} - y\right) \cdot (1 - C_x)}{h^3} \int_0^h T(y, t) \cdot \left(\frac{h}{2} - y\right) dy$$

$$\sigma_3^{\partial}(t, T(y, t)) = k \cdot E_3^{\partial}(t) \cdot \alpha_{\text{цб}} \cdot T(y) - \frac{k \cdot E_3^{\partial}(t) \cdot \alpha_{\text{цб}}}{h}$$

$$\int_0^h T(y, t) dy - \frac{12 \cdot k \cdot E_3^{\partial}(t) \cdot \alpha_{\text{цб}} \cdot \left(\frac{h}{2} - y\right) \cdot (1 - C_x)}{h^3} \int_0^h T(y, t) \cdot \left(\frac{h}{2} - y\right) dy$$

де $T(y, t)$ – гармонічна функція температури по товщині покриття; $E(t, T)$ – модуль пружності цементобетону, який залежить від часу дії навантаження; $\alpha_{\text{цб}}$ – коефіцієнт лінійного температурного розширення цементобетону; $\alpha_{\text{осн}}$ – коефіцієнт лінійного температурного розширення основи; h – товщина

покриття; k - швидкість охолодження цементобетону; y – задана глибина; $ni(l)$, $ni(o,v)$, $ni(z)$ - період сезону: літній, осінньо-весняний та зимовий відповідно; B_l , B_o , B_z , b_{tl} , b_{to} , b_{tz} - параметри функції довговічності цементобетону з використанням комплексних хімічних добавок, в залежності від сезону.

Враховуючи наведене вище, міра пошкодження для розрахункової схеми (рис. 2.1) від зміни напружень з урахуванням добових і річних температурних коливань, визначається за залежністю (2.40) з урахуванням температурних напружень (2.31, 2.39).

2.5 Визначення міри пошкодження цементобетонного покриття на автомобільних дорогах від розтягуючих напружень, що виникають внаслідок дії пневматичних коліс транспортних засобів

На основі вище наведених теоретичних досліджень пропонується визначати міру пошкодження структури цементобетонного покриття від дії пневматичних коліс транспортних засобів. Як відомо із вище наведеного аналізу, що модуль пружності цементобетонного покриття на автомобільних дорогах змінний від часу дії навантаження, а також підтверджено, результатами теоретичних та експериментальних досліджень таких вчених як Солодкого С.Й., Левіцького Е.Ф., Чернігова В.А., Радовського Б.С., Мозгового В.В., Шейкіна А.Е. та ін. Тому від дії пневматичних коліс транспортних засобів у цементобетонному покритті автомобільних доріг виникають розтягуючі напруження і з часом відбуваються втомні пошкодження у покритті. У зв'язку з тим, що з кожним роком збільшується навантаження великовагових транспортних засобів призводить до збільшення тиску в шині колеса, що передається на цементобетонне покриття автомобільних доріг.

У нашому випадку на цементобетонне покриття, автомобільної дороги діє колісне навантаження, яке викликає розтягуючі напруження, тому міра

пошкодження від зміни напружень та дії пневматичних коліс транспортних засобів приймається за виразом $M_{Tp}(t)$ (2.11).

Результати аналізу показують узагальнюючі теоретичні дослідження цементобетону [144].

Як показують дослідження багатьох авторів, питання про величину коефіцієнта динамічності кілька суперечливий і дискусійний. На основі узагальненого експериментального і теоретичного матеріалу було встановлено [70], що "рухомі автомобілі надають на дорожній одяг короточасний вплив, величина якого, в залежності від швидкості руху, більше статичного в 1,55 — 1,8 рази навіть при нерівностях, що залишаються на знову влаштованих покриттях".

Розвитку динамічних розрахунків жорстких дорожніх одягів при впливі рухливих автомобільних навантажень, що не використовуються присвячені роботи А.К. Бируля, А.Г. Булавко, Г.І. Глушкова, А.Н. Защепіна, М.С. Коганзона, А.В. Смирнова, Б.Б. Самойленко, В.Є. Ярового та ін. Авторів. Другий спосіб розрахунку жорстких дорожніх одягів виконується з використанням динамічних значень модулів пружності дорожньо-будівельних матеріалів, що наближає роботу дорожніх одягів до реальних умов при короточасному впливі транспорту, що рухається.

У дисертаційній роботі для розрахункової схеми (рис.2.1) згідно з ГБН В.2.3-37641918-557 напруження σ_{pt} , які виникають від розтягу при згині визначають для розрахунку товщини покриття при умові гарантованого повного контакту плит з основою за рахунок стійкості земляного полотна і відсутності нерівномірних осідань або здимання.

Також для оцінки міцності цементобетонного покриття у відповідності нормативного документу [173] пропонується визначати напруження розтягу σ_p в разі згину для розрахунку товщини покриття за умови гарантованого повного контакту плити з основою і відсутності нерівномірних осідань або випирань за залежністю [173]:

$$\sigma_p = K_{мц} \cdot \sigma_{pt}, \quad (2.41)$$

де $K_{мц}$ — коефіцієнт міцності з урахуванням заданого рівня надійності (приймається за [173]);

σ_{pt} — напруження розтягу при згині, що виникають у бетонному покритті від дії навантаження, з урахуванням перепаду температури по товщині плити приймається за [173] або визначається за допомогою моделювання методом скінчених елементів, що наведено нижче.

$$\sigma_{pt} = \frac{Q_p \cdot K_m \cdot 60 \cdot K_{умв} \cdot K_{шт} \cdot (0,0592 - 0,09284 \cdot \ln(\frac{R}{l_{np}}))}{h^2 \cdot K_t}, \quad (2.42)$$

де Q_p — розрахункове навантаження, кН, приймається згідно з таблицею Б ДБН В.2.3-4;

h — товщина цементобетонної плити, м;

D — діаметр кола, рівновеликого за площею відбитку колеса, см;

K_m — коефіцієнт, що враховує вплив місця розташування навантаження: для неармованих покриттів $K_m = 1,5$; для покриттів з крайовим армуванням або майданчиків з розташуванням смуг накату не ближче ніж 0,8 м; зовнішнього поздовжнього краю покриття — $K_m = 1,0$ для поздовжнього напрямку і $K_m = 1,5$ для поперечного;

$K_{умв}$ — коефіцієнт, що враховує умови роботи, рівний 0,66;

$K_{шт}$ — коефіцієнт, що враховує вплив штирових з'єднань на умови контакту плит з основою: при наявності у поперечних швах штирів $K_{шт} = 1$, при відсутності штирів $K_{шт} = 1,05$;

R — радіус відбитка колеса, см.

l_{np} — пружна характеристика плити, см.

K_t — коефіцієнт, що враховує вплив температурного короблення плит і визначається за таблицею 6.3[77].

Тому міру пошкодженості цементобетонного покриття від зміни напружень від дії пневматичних коліс транспортних засобів з урахуванням (2.11 — 2.41, 2.42) визначається за наступною залежністю:

$$M_{T_p}(t) = \left[\frac{N_p \cdot n_c \cdot \frac{(q^t - 1)}{(q - 1)}}{\frac{K_p \cdot B_{tb} \cdot K_M \cdot K_y \cdot K_{морз}}{K_{мц} \cdot \frac{Q_p \cdot K_m \cdot 60 \cdot K_{умв} \cdot K_{шт} \cdot (0,0592 - 0,09284 \cdot \ln(\frac{R}{l_{np}}))}{h^2 \cdot K_t}}} \right]^m, \quad (2.43)$$

де n_c — кількість днів року з позитивною температурою повітря (приймається за довідковими даними);

q — знаменник, що описує щорічний приріст інтенсивності руху;

t — строк служби цементобетонного покриття автомобільної дороги до капітального ремонту.

У даному випадку під пошкодженістю розуміють формальне кінетичне поняття незворотних розривів ушкоджень зв'язків у цементобетонному покритті автомобільної дороги, що накопичуються в часі при визначеному характері впливу основних факторів (в даному випадку від зниження температури, усадки цементобетону та під дією пневматичних коліс транспортних засобів). Міра пошкодження в нашому випадку — відносний параметр, що характеризує ступінь ушкодження структури цементобетону при впливі руйнівних факторів, у порівнянні з максимально можливим значенням пошкодження (в даному випадку руйнування).

2.6 Оцінка довговічності цементобетонного покриття автомобільних доріг з урахуванням спільного впливу усадки цементобетону, зміни (сезонних річних та добових) температури та дії пневматичних коліс транспортних засобів

Розрахунок проводять на строк служби не менший ніж строк експлуатації цементобетонного покриття на автомобільних дорогах між капітальними ремонтами згідно з ДБН В.2.3-4.

Розрахунковий (очікуваний) строк служби T_{PO3} (в роках) цементобетонного покриття на автомобільних дорогах базується на отриманих аналітичних залежностях (2.9 — 2.11, 2.15, 2.16, 2.20, 2.21, 2.40, 2.43), а саме: строк служби T_{PO3} — це співвідношення гранично допустимого значення показника міри пошкодження $[M_{цб}]$ до сумарної міри пошкодження цементобетонного покриття від спільного впливу усадки цементобетону, зміни температур та дії пневматичних коліс транспортних засобів, що в свою чергу більше або рівне нормативному строку служби цементобетонного покриття $[T_H]$.

Оцінювати довговічність цементобетонного покриття на автомобільних дорогах запропоновано визначати за залежністю (2.44). З урахуванням залежності (2.44) пропонується визначити розрахунковий (очікуваний) строк служби T_{PO3} (в роках) цементобетонного покриття на автомобільних дорогах, за аналітичною залежністю:

$$T_{PO3} = T_{np} \cdot \frac{[M_{цб}]}{M_{цб}(t, y, T(t))} \geq [T_H], \quad (2.44)$$

де T_{np} — проєктний строк експлуатації цементобетонного покриття в автомобільної дороги приймається 18 років.

T_H — нормативне значення строк експлуатації цементобетонного покриття в залежності від категорії автомобільної дороги приймається за ДБН В.2.3-4.

Таким чином, отримані залежності (2.9 — 2.44) дозволяють розраховувати строк служби запроєктованого цементобетонного покриття на автомобільних дорогах за тріщиностійкістю з урахуванням спільного впливу усадки цементобетону, зміни (сезонних річних та добових) температури та дії пневматичних коліс транспортних засобів, а також розроблено методику та алгоритм оцінювання довговічності такого покриття.

На основі проведених теоретичних досліджень, розроблено методику та алгоритм оцінювання довговічності цементобетонного покриття на автомобільних дорогах з урахуванням спільного впливу усадки цементобетону, зміни температури та дії пневматичних коліс транспортних засобів, що дозволяє проєктувати при реконструкції, капітального ремонту чи будівництва цементобетонне покриття підвищеної довговічності із заданим строком служби, дана методика представлена в четвертому розділі.

2.7 Висновки по розділу

Основними результатами, що викладені в даному розділі теоретичних досліджень стосовно методу оцінки довговічності цементобетонного покриття на автомобільних дорогах, можна вважати:

1. Розроблено основну розрахункову схему роботи цементобетонного покриття автомобільних доріг з різними видами основ шарів дорожнього одягу, що враховують особливості властивостей покриття.

2. Для цієї розрахункової схеми розроблено аналітичні залежності, а саме:

- напружень, які виникають від усадки в цементобетонному покритті при тужавінні на різній глибині і в будь-який момент часу догляду за цим

шаром, що дозволить враховувати комплексні параметри: масообмін (водяний пар, рідка фаза води), який формується під впливом втрат вологи на межах шару і викликає нерівномірний розподіл вологості по товщині шару; коефіцієнт вологопровідності, модуль пружності, коефіцієнт усадки, які відображають структуру і характеристики матеріалу; а також час догляду і міру жолоблення.

— визначення температурних напружень в цементобетонному покритті від спільного впливу річних і добових температур.

— для розрахунку горизонтальних (нормальних) розтягуючих напружень в цементобетонному покритті від дії пневматичних коліс транспортних засобів.

3. Отримано аналітичну залежність та встановлено критерій граничного стану для оцінювання довговічності за тріщиностійкістю цементобетонного покриття автомобільних доріг, що дозволяє враховувати комплексну дію факторів, а саме усадку цементобетону, зміну температури та дію пневматичних коліс транспортних засобів.

4. Удосконалено метод оцінювання довговічності цементобетонного покриття на автомобільних дорогах з урахуванням спільного впливу усадки бетону, зміни температури та дії пневматичних коліс транспортних засобів, що дозволяє проектувати цементобетонне покриття підвищеної довговічності із заданим строком служби.

5. Удосконалення методу проектування цементобетонного покриття на автомобільних дорогах, оцінювали: тріщиностійкість від спільного впливу усадки цементобетону, зміни напружень від річної та добової температури та дії пневматичних коліс транспортних засобів; використовували умову міцності, що враховує часовий характер руйнування; застосовували функцію довговічності у вигляді степеневої залежності та критерій довговічності, що запропоновано Бейлі у вигляді міри пошкодження. На основі цього, в залежності від виду розрахункової схеми, було визначено довговічність

цементобетонного покриття на автомобільних дорогах з використанням комплексних добавок.

6. Уточнено залежність (R_t^p) з визначення міцності цементобетону на розтяг при згині, яка визначається згідно [173] за рахунок введення коефіцієнту морозостійкості $K_{морз}$.

7 Результати отриманих теоретичних досліджень, дозволили розробити алгоритм розрахунку оцінки довговічності цементобетонного покриття на автомобільних дорогах з урахуванням спільного впливу усадки цементобетону, зміни температури та дії пневматичних коліс транспортних засобів, що дозволяє проектувати (при реконструкції, капітального ремонту чи будівництва) цементобетонне покриття підвищеної довговічності із заданим строком служби, дана методика представлена в четвертому розділі.

Основні результати досліджень другого розділу висвітлені в роботах автора [153,182,183,190,192].

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЧИСЛОВИЙ АНАЛІЗ ЦЕМЕНТОБЕТОННОГО ПОКРИТТЯ АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ

Загальні положення. Даний розділ присвячений експериментальному проведенню випробувань цементобетону для покриття автомобільних доріг із урахуванням реологічних властивостей сумішей, напружено – деформованого стану цементобетонів у конструкції та економічної ефективності; вивченню в'язкопружної поведінки досліджуваних цементобетонів, їх розрахункових характеристик, фізико – механічних властивостей, тріщиностійкості, довговічності цементобетонів із вмістом комплексних добавок поліфункціональної дії. Основними задачами цих досліджень було встановити: розрахункові характеристики цементобетону з використанням комплексних хімічних добавок; модуль пружності з урахуванням різного часу дії навантаження і температури, параметри функції довговічності, а також зіставлення отриманих експериментальних даних з теоретичними результатами; лабораторні та стендові дослідження впливу комплексної хімічної добавки на тріщиностійкість цементобетону; моделювання максимальних розтягуючих напружень в цементобетонному покритті автомобільних доріг від дії пневматичних коліс транспортного засобу; закономірності дії комплексної хімічної добавки на особливості твердіння, будівельно-технологічні властивості суміші та фізико-механічні властивості цементобетону.

Результати експериментальних досліджень розповсюджуються на цементобетони, що використовуються для влаштування цементобетонного покриття на автомобільних дорогах.

У даному розділі проведені випробування та наведені методики, що дозволяють встановити технологічні, механічні, фізичні, деформаційні характеристики матеріалів покриття, що є складовою методу проєктування цементобетонного покриття на автомобільних дорогах.

3.1 Об'єкти експериментальних досліджень

Для виконання поставленої задачі, в умовах науково-дослідної лабораторії кафедри дорожньо-будівельних матеріалів та хімії; мостів, тунелів та гідротехнічних споруд Національного транспортного університету, "Інноваційно-технологічному центрі ПБГ Ковальська", а також на кільцевому стенді ДП «Дорцентр» було проведено експериментальні дослідження. Цементобетонні суміші виготовлялися відповідно з [126]. Цементобетонні суміші виготовляли у бетонозмішувачах примусової дії. Виготовлено цементобетонні суміші із різним вмістом цементу та різної кількості комплексних добавок поліфункціональної дії. Час перемішування сумішей — 5 хвилин.

З метою підвищення довговічності цементобетонів покриттів автомобільних доріг розроблено і запропоновано до використання комплексні хімічні добавки поліфункціональної дії [154]. З метою забезпечення тріщиностійкості і довговічності запроектованих складів цементобетонів із розробленою комплексною добавкою поліфункціональної дії досліджувався вплив даної комплексної хімічної добавки на особливості структуроутворення, тепловиділення і твердіння цементно — водної композиції контрольного складу. Результати наведено в [176,177].

Різна кількість цементу та комплексної добавки поліфункціональної дії необхідна не лише для встановлення оптимальних параметрів цементобетону, а й з метою одержання максимального ефекту та забезпечення економічної ефективності [180] та проведено порівняння властивостей цементобетонів із хімічною добавкою аналогом зарубіжного виробництва.

Проектування та приготування цементобетонних сумішей, а також випробування лабораторних зразків із них, виконували у відповідності з [166].

Експериментальні дослідження проводились на цементобетонних сумішах малорухливих, марки Р1 та цементобетонних зразках кубах $100 \times 100 \times 100$, зразках призмах $100 \times 100 \times 40$ контрольного складу (без вмісту комплексної хімічної добавки), а також із вмістом комплексної хімічної добавки поліфункціональної дії. Характеристики сировинних матеріалів наведені в додатку Б. Проектування складів цементобетонів для покриття автомобільних доріг виконувалося згідно методик [175]. Результати наведено в Додатку Б.

3.2 Методики визначення властивостей об'єктів досліджень

Визначення натурних досліджень цементобетонного покриття автомобільних доріг

Метою натурних випробувань було проведення натурального обстеження стану цементобетонного покриття автомобільних доріг та виявлення характерних руйнувань у вигляді тріщин. При натурному обстеженні цементобетонного покриття використовувались: фотоапарат для фіксації руйнувань, металева лінійка, мірна стрічка. Результати дослідження наведено в п. 3.4.

Оптимізація складів цементобетонів для покриття автомобільних доріг

Визначення оптимальних складів цементних бетонів із комплексною добавкою проводилось за критеріями: водоцементного співвідношення суміші, збереження дотриманості властивостей цементобетонної суміші з часом, вмісту залученого повітря, міцності на згин, стиск, модуля пружності та економічної ефективності [180]. Дослідження виконували з використанням двохфакторного плану експерименту [180]. Фактори і інтервали їх варіювання наведено в табл. 3.1. Проведено статистичний аналіз та отримано експериментально — статистичні моделі за допомогою програми

STATISTICA, які наведено на рис. 3.9 — 3.14. Результати дослідження наведено в п. 3.4. [180].

Таблиця 3.1 — Фактори та інтервали їх варіювання

№ фактору	Фактори		Значення фактору		
	Натуральний вид	Кодований вид	-1	0	+1
1	Витрата в'язучого, кг/м ³	X_1	325	350	375
2	Витрата комплексної добавки ШАГ ПА SP-1М, %	X_2	1,0	1,1	1,2

Визначення технологічних властивостей цементобетонної суміші

Визначення рухомості цементобетонної суміші

Визначення рухомості цементобетонної суміші проводилося у відповідності із методикою [156]. Результати дослідження наведено в п. 3.4.

Визначення дотриманості властивостей цементобетонної суміші

Методика визначення дотриманості властивостей цементобетонної суміші полягає у одержанні і оцінці даних щодо зміни технологічних властивостей суміші протягом визначеного часу (зміни рухомості, зміни вмісту залученого повітря в суміші для дорожніх цементобетонів не раніше двох годин) у відповідності із методикою [156]. Результати дослідження наведено в п. 3.4.

Визначення вмісту залученого повітря в цементобетонній суміші

Визначення вмісту залученого повітря в цементобетонній суміші проводилися компресійним методом із використанням пороміру у відповідності до методики [156]. Результати дослідження наведено в п. 3.4.

Визначення розрахункових характеристик цементобетону

Визначення міцності цементобетону на розтяг при згині

Суть методики визначення межі міцності цементобетонних зразків-призм 100×100×400 мм на розтяг при згині полягає у визначенні навантаження, необхідного для руйнування зразка-призми при 3-х точковому

згині у відповідності із методикою [158]. При випробуванні на розтяг при згині встановлюють до випробувального пристрою і прикладають навантаження до руйнування зразка [158]. Швидкість навантаження — 0,04 МПа/с.

Границю міцності на розтяг при згині R_{tb} , обчислюють за формулою:

$$R_{tb} = \frac{3Pl}{2bh^2}, \quad (3.1)$$

де: P — руйнівне навантаження, Н;

l — відстань між опорами, см;

b — ширина зразка, см;

h — висота зразка, см.

Результати дослідження наведено в п. 3.4.

Визначення призової міцності дорожнього цементобетону на стиск

Визначення призової міцності дорожнього цементобетону на стиск проводилося у відповідності із методикою [158] на зразках призмах $100 \times 100 \times 400$ мм.

Результати дослідження наведено в п. 3.4.

Визначення модуля пружності та модуля деформації

Визначення модуля пружності та модуля деформації проводилися у відповідності до методики [160].

Для вимірювання величини прогину використовувалась рамка, на якій кріпиться індикатор годинникового типу з ціною поділки 0,001 мм. Рамка встановлюється по середині зразка (на нейтральній осі) відносно вертикальної площини і закріплюється над опорами [160].

Результати дослідження наведено в п. 3.4.

Визначення розрахункового модуля пружності на зразках-балочках

Для визначення модуля пружності використовували пристрій, що забезпечує можливість багаторазового прикладання навантаження тривалістю дії 0,05 — 0,20 с, з паузами між навантаженнями, що не менше ніж у 10 разів перевищують тривалість дії навантаження [168,169].

Для проведення випробування використовували маятниковий прилад ДерждорНДІ [168]. Пристрій ДерждорНДІ представляє собою маятник у вигляді важеля, що жорстко закріплений на каркасі зі сталевих стрижнів та станини [168]. До верхньої площадки каркаса прикріплено механізм навантаження, а на середній площадці каркаса розміщено рухому та нерухому опори під зразок-балочку, що випробовується [169].

Для визначення миттєвого значення динамічного модуля пружності використовували ультразвуковий імпульсний прилад СП УК-10ПМС (рис. 3.1) [169].

Порядок проведення випробування

Перед проведенням випробувань прилад повинен не менше 5 хв. прогріватися. Потім, зразок-балочку боковою гранню укладають на опору приладу і визначають швидкість розповсюдження ультразвукових хвиль V (м/с) в цементобетонному зразку, в залежності від частоти коливань ν (с⁻¹), яка визначає тривалість дії навантаження (с).

Модуль пружності при певній частоті коливання $E_{\text{л}}$, МПа, визначається за наступною залежністю:

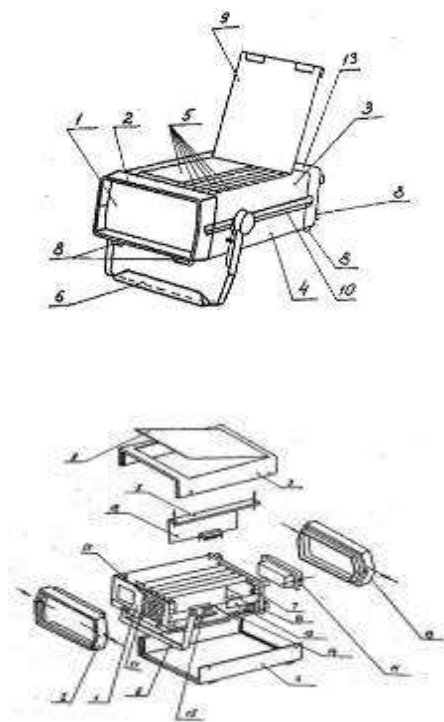
$$E_{\text{л}} = \rho \cdot V^2 \cdot \kappa_{\phi}, \quad (3.4)$$

де ρ — середня щільність зразка, кг/м³;

V — швидкість розповсюдження ультразвукових хвиль в цементобетоні, м/с;

κ_{ϕ} — коефіцієнт, що є функцією розмірі зразка.

Результати дослідження наведено в п. 3.4.



1 — передня і задня панелі; 2 та 13 —обрамлення; 3 — верхня кришка; 4 — опори; 5 — функціональний блок; 6 — ручка; 7 — задня панель; 8 — ніжки; 9 — кришка; 10 — бокові стяжки; 11 та 12 — плати; 14 — стяжки; 15 — перетворювач напруги; 16 — стабілізатор напруги; 17 — вхідне і вихідне рознімання; 18 — клавіатура

Рисунок 3.1 — Ультразвуковий імпульсний прилад

Визначення параметрів функції довговічності цементобетонних зразків при постійному росту навантаження

Визначення показники втоми дорожнього цементобетону визначалося згідно із [167]. Для випробування цементобетонних зразків при дії плавно зростаючого з постійною швидкістю силового навантаження в умовах одностороннього згину використовувалась установка А-1 (рис. 3.2) для різних схем випробування. Установка складається з станини 1, на якій кріпиться стійка 2. На стійку спирається важіль 3 через призму 4. До стійки прикріплені обмежувач з упорами 5, призначений для обмеження поворотів

коромисла в незбалансованому стані. Для приведення коромисла в рівноважний стан служить балансирний вантаж 6. Навантаження на зразок 9 передається через важіль 3 при допомозі підвіски з прийомним відерцем 7. Для наладки установки у вихідному положенні і безударного навантаження в початковій стадії служить стійка з чекою 8. Зразок з нижньої сторони через пристрій-захват 10, шарнір 14, натяжний гвинт 13 і гайку вибору люфтів 12 зв'язаний з станиною, а з верхньої сторони зразок зв'язаний з важелем за допомогою пристрою-захвату 10, перехідної ланки 11, шарніра 14, натяжного гвинта 13 і гайки вибору люфтів 14. Постійна швидкість росту напруження в зразку досягається при висипанні через калібрований отвір воронки 18 промитого річкового піску фракції 0,63 — 1,25 мм у ємність 7 [167].

Встановлюють цементобетонний зразок на опори, підвішують прийомне відерце на коромислі і врівноважують прилад, переміщуючи балансирний вантаж 6 [167].

Через калібрований отвір воронки висипають пісок з заданою першою постійною швидкістю росту навантаження $V_{\sigma 1}$ одночасно вмикаючи секундомір. При руйнуванні зразка фіксують час до руйнування з точністю до 0,1. Повторюють при іншій швидкості росту навантаження $V_{\sigma 2}$. [167].

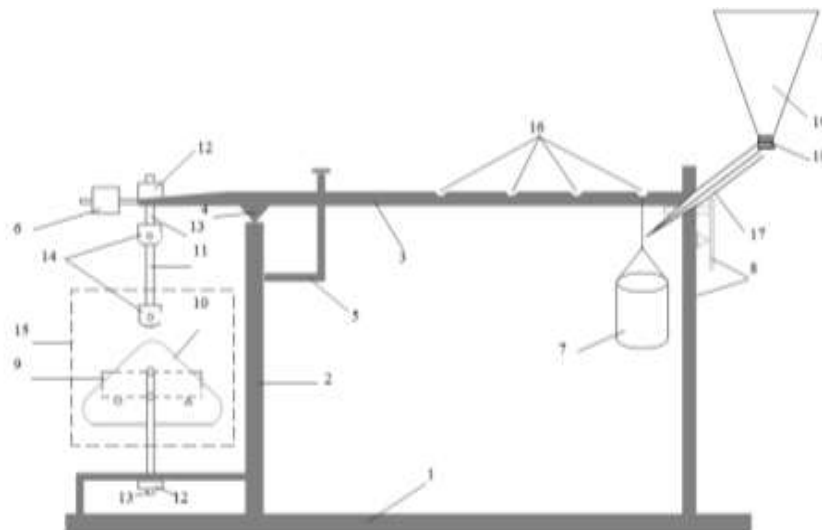


Рисунок 3.2 — Схема приладу для випробування зразків на міцність при постійній швидкості росту навантаження

Обробка результатів випробування

Параметри функції довговічності B_τ в МПа с, b_τ , обчислюють за формулами [167]:

$$b_\tau = \frac{\lg V_{\sigma 1} / V_{\sigma 2}}{\lg \sigma_1 / \sigma_2} - 1, \quad (3.5)$$

де σ_1, σ_2 — граничне напруження, МПа відповідно при першій та другій швидкості наростання навантаження;

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

$$B_\tau = \frac{\sigma_1^{b_\tau + 1}}{V_{\sigma 1} \cdot (b_\tau + 1)}, \quad (3.6)$$

Граничне напруження σ в МПа та швидкість наростання навантаження V_σ визначаються за формулами [167]:

$$\sigma = \frac{3 \cdot Pl}{2 \cdot bh^2} \cdot 10^{-2}, \quad (3.7)$$

де P — руйнівне навантаження, Н;

l — відстань між опорами, см;

b — ширина зразка, см;

h — висота зразка, см;

10^{-2} — коефіцієнт перерахунку у МПа.

$$V_\sigma = \frac{\sigma}{t_p}, \quad (3.8)$$

де t — час до руйнування, с

За результат визначення приймають округлене до другого десяткового знака середньоарифметичне значення випробувань трьох зразків.

Розбіжності між трьома паралельними випробуваннями не повинні перевищувати 10 %. Результати дослідження наведено в п. 3.4.

Визначення тріщиностійкості цементобетобетону

Визначення тріщиностійкості цементобетонних зразків проводили у відповідності до [164,179] за схемою 3-х точкового згину за допомогою 200 — тонного гідравлічного пресу. Загальний вигляд випробувальної установки наведено на рис. 3.3 та схему випробування — рис.3.4.

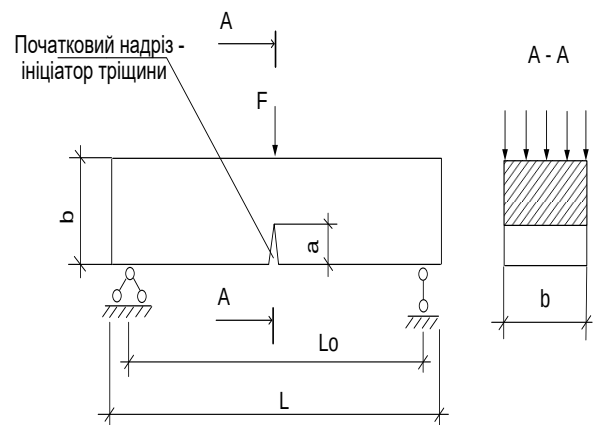
При рівноважних випробуваннях зразки навантажували безперервно до їх розділення на частини з фіксацією повної діаграми стану матеріалу $F - V$ [164,179]. Перед початком випробувань проводили два цикли навантаження та розвантаження зразків до навантаження, що становить 10 % очікуваного максимального.

При випробуваннях використовували зразки розміром 0,10 x 0,10 x 0,40 м із початковим надрізом висотою 0,04 м і шириною 0,002 м [164,179] (рис. 3.4).

Початкові надрізи створювали за допомогою ріжучого інструменту. Кожна серія складалася з чотирьох зразків.



Рисунок 3.3 — Загальний вигляд випробувальної установки



a — довжина початкового надрізу, м;
 b , L , L_0 — розміри зразка, м; F — навантаження на зразок, кН

Рисунок 3.4 — Схема випробувань зразка— призми на згин із ініційованою тріщиною нормального відриву

Методика проведення стендових експериментальних досліджень

Проведення стендових експериментальних досліджень полягає у випробуванні конструкцій дорожнього одягу на кільцевому стенді (рис. 3.5) створюючи статичне або динамічне навантаження за допомогою електромобілів та у спостереженні за напружено-деформованим станом цементобетонного покриття в умовах, наближених до роботи на автомобільних дорогах при впливі дії усадки, температури та пневматичних коліс транспортних засобів [171]. Випробування конструкції дорожнього одягу з цементобетонним покриттям на кільцевому стенді виконували у відповідності з [171]. Навантаження створювали двома електромобілями, які мають по дві осі зі спареними балонами з розрахунковим навантаженням на вісь 115 кН [171]. Проводилася візуальне спостереження появи тріщин, відбиралися керни, в яких вимірювали товщини та міцність [171].

Один оберт електромобілів еквівалентний чотирьом проходкам розрахункового автомобіля з навантаженням на вісь 11,5 т по одній точці [168]. При цьому швидкість руху електромобілів становила 5 — 10 км / год [168]. Варіанти цементобетонного покриття автомобільних доріг та результати досліджень наведено в ДОДАТКУ Д.

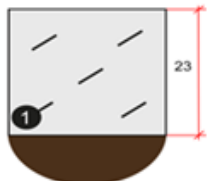
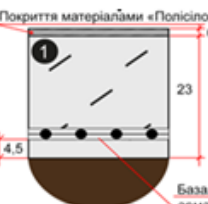


Рисунок 3.5 —
Випробування конструкцій
жорсткого дорожнього одягу на
кільцевому стенді

Були проведені стендові та натурні дослідження конструкцій жорсткого дорожнього одягу із цементобетонним покриттям. Отримані

результати дозволили підтвердити актуальність та достовірність дисертаційних досліджень. У процесі випробувань, було влаштовано п'ять варіантів експериментальних конструкцій, які піддавались дії двох рухомих 2-х вісних електромобілів з навантаженням на вісь 115 кН. Варіанти конструкцій дорожнього одягу наведено в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Варіанти конструкцій дорожнього одягу

№ п/п	Конструкція дорожнього одягу	Назва матеріалу та товщина шару в см
Сектор 1		Цементобетон, клас В 35, з використанням комплексної добавки Д2 та базальтова фібра, h=23 см Асфальтобетон щільний Крупнозернистий, Тип А, марка І на бітумі БНД 60/90, h=8 см; Асфальтобетон крупнозернистий пористий, h=8 см; Щебенево - пісчана суміш С-5, h=18 см; Грунт земляного полотна – суплинок пилуватий
Сектор 2		Застосовано захисне покриття поверхні бетону фірми "Сіка". h=1 см; Цементобетон, клас В 35, з використанням комплексної добавки Д2 та базальтова фібра, h=23 см Асфальтобетон щільний Крупнозернистий, Тип А, марка І на бітумі БНД 60/90, h=8 см; Асфальтобетон крупнозернистий пористий, h=8 см; Щебенево - пісчана суміш С-5, h=18 см; Грунт земляного полотна – суплинок пилуватий
Сектор 3		Застосовано захисне покриття поверхні бетону фірми "Полісіпор". Покриття двошарове, с посипкою кварцовим піском. h=2,6 – 3,0 мм з урахуванням посипки кварцовим піском (фракція 2,5-3,0). Матеріал – «Сіпор Ультра КМ»; Цементобетон, клас В 35, з використанням комплексної добавки Д2 та базальтова фібра, h=27 см Асфальтобетон щільний Крупнозернистий, Тип А, марка І на бітумі БНД 60/90, h=8 см; Асфальтобетон крупнозернистий пористий, h=8 см; Щебенево - пісчана суміш С-5, h=18 см; Грунт земляного полотна – суплинок пилуватий
Сектор 4		Застосовано захисне покриття поверхні бетону фірми "Полісіпор". Покриття двошарове, с посипкою кварцовим піском. h=2,6 – 3,0 мм з урахуванням посипки кварцовим піском (фракція 2,5-3,0). Матеріал – «Сіпор Ультра КМ»; Цементобетон, клас В 35, з використанням комплексної добавки Д2 та базальтова фібра, h=23 см Асфальтобетон щільний Крупнозернистий, Тип А, марка І на бітумі БНД 60/90, h=8 см; Пісний бетон -20 см Щебенево - пісчана суміш С-5, h=18 см; Грунт земляного полотна – суплинок пилуватий
Сектор 5		Застосовано захисне покриття поверхні бетону фірми "Полісіпор". Покриття двошарове, с посипкою кварцовим піском. h=2,6 – 3,0 мм з урахуванням посипки кварцовим піском (фракція 2,5-3,0). Матеріал – «Сіпор Ультра КМ»; Цементобетон, клас В 35, з використанням комплексної добавки Д2 та базальтова фібра, h=18,6 см Асфальтобетон щільний Крупнозернистий, Тип А, марка І на бітумі БНД 60/90, h=8 см; Пісний бетон -20 см Щебенево - пісчана суміш С-5, h=18 см; Грунт земляного полотна – суплинок пилуватий

Результати досліджень показали, що після тридцяти тисяч проходів електромобіля по одному сліду з'явилися декілька волосяних тріщин на цементобетонному покритті з найменшою товщиною 18,6 см на секторі 5, а у всіх інших конструкціях на поверхні покриття не виявлено пошкоджень. Результати досліджень відібраних кернів на всіх конструкціях дорожнього одягу показали відповідність вимогам чинного нормативного документу (Додаток Д).

Визначення фізико – механічних властивостей цементобетону

Середня щільність цементобетонних зразків

Середня щільність цементобетонних зразків визначалася у відповідності із методикою [157].

Середню щільність цементобетону серії зразків визначають як середнє арифметичне значення результатів випробування всіх зразків серії.

Визначення міцності на стиск зразків – кубів

Методика полягає у визначенні максимального зусилля, досягнуте в процесі випробування, при якому зразок починає руйнуватися. Визначення міцності на стиск виконувалося на цементобетонних зразках – кубах $100 \times 100 \times 100$ [158]. Навантаження зразків проводять безперервно зі швидкістю, що забезпечує підвищення розрахункового напруження до його повного руйнування в межах $0,6 \pm 0,4$ МПа/с. Міцність цементобетону на стиск визначалась за формулою [158]:

$$R_{cm} = \delta \cdot \frac{P}{S}, \quad (3.9)$$

де δ — масштабний коефіцієнт;

P — руйнівне навантаження, (Н);

S — площа навантаження (м^2).

Визначення міцності на розтяг при розколі

Цементобетонний зразок-циліндр Ø 150 мм і висотою 150, що зберігався у воді після визначення марки водонепроникливості цементобетону, випробовувався на міцність на розтяг при розколі за методикою [159]. Швидкість навантаження в межах від 0,04 МПа/с (Н/мм² х с) до 0,06 МПа/с (Н/мм² х с) [46].

Міцність на розтяг при розколюванні визначається за формулою:

$$f_{ct} = \frac{2 \times F}{\pi \times L \times d} , \quad (3.10)$$

де f_{ct} — міцність на розтяг при розколюванні, в МПа або ньютонів на квадратний міліметр;

F — максимальне навантаження, Н;

L — довжина лінії контакту зі зразком, мм;

d — встановлений розмір перерізу, мм;

Випробування на стирання цементобетонних зразків

Випробування на стирання цементобетонних зразків проводять на приладі ЛКИ-3 згідно [162].

Показник стирання цементобетону в г/см², характеризується втратою маси зразка, обчислюють із похибкою до 0,1 г/см² для кожного окремого зразка за формулою [162]:

$$G = \frac{m_1 - m_2}{F} , \quad (3.11)$$

Де m_1 — маса зразка до випробування, г;

m_2 — маса зразка після 4-х циклів випробування, г;

F — площа грані, що стирається, см².

Результати дослідження наведено в п. 3.4.

Визначення водонепроникності за методом "микрої плями"

Суть методу визначення водонепроникності цементобетону полягає оцінюванні максимального тиску води, за якого ще не спостерігається просочування води крізь зразок циліндр діаметром 150 мм і висотою 150 у відповідності з [44].

Марку бетону за водонепроникністю приймають згідно з табл. 1.2. [157].

Результати дослідження наведено в п. 3.4.

Визначення морозостійкості дорожнього цементобетону

Морозостійкість цементобетонних зразків для покриття автомобільних доріг за 3-м прискореним методом відповідно до [163].

Визначення усадки дорожнього цементобетону

Усадка визначалася згідно [161] на зразках розмірами 100x100x400 мм. Вимірювання усадки проводилися за допомогою індикаторів годинникового типу з ціною поділки 1 мкм [161]. Виготовлення зразків відповідало вимогам ДСТУ Б В.2.7-214. У процесі випробування зразки знаходилися в кліматичній камері при температурі $20 \pm 2^{\circ} \text{C}$ і відносній вологості повітря 60 % [161]. Результати дослідження наведено в п. 3.4.

3.3 Результати проведення лабораторних експериментальних досліджень властивостей цементобетону для покриттів автомобільних доріг

Для розробки методу оцінки цементобетонного покриття визначали всі необхідні технологічні, розрахункові, фізико-механічні властивості. Відповідно до задач, що були поставлені в дисертаційній роботі, в даному підрозділі наведені результати експериментальних досліджень властивостей

цементобетону для покриттів автомобільних доріг [164, 178, 179, 180, 183, 185-187] відповідно до п. 3.1.

Використання комплексних хімічних добавок у досліджуваних цементобетонах обумовлюється складною роботою покриття автомобільних доріг, де на нього крім дії коліс транспортних засобів діють також і погодно-кліматичні фактори та необхідно враховувати також усадку цементобетону.

Крім того, для порівняння результатів досліджень, випробовували склади цементобетонів із вмістом комплексної хімічної добавки зарубіжного виробництва.

Випробування проводили згідно методик викладених в п. 3.2 в умовах лабораторії кафедри дорожньо-будівельних матеріалів і хімії, мостів, тунелів та гідротехнічних споруд Національного транспортного університету, "Інноваційно-технологічному центрі ПБГ Ковальська", а також на кільцевому стенді ДП «Дорцентр».

3.3.1 Натурні дослідження цементобетонного покриття на автомобільних дорогах

Проведення натурних досліджень стійкості цементобетонного покриття до утворення тріщин. Дані базуються на результатах проведеного натурального обстеження стану цементобетонного покриття існуючої дорожньої конструкції жорсткого дорожнього одягу, яке від дії усадки, температури, транспортних засобів має характерний ряд руйнувань у вигляді тріщин. Проведені дослідження оцінки стійкості цементобетонного покриття до утворення тріщин підтвердили результати попередніх досліджень [3, 5, 7-11, 191-192 та інші]. Отримані дані натурних досліджень дозволили виявити кінетику утворення тріщин в цементобетонному покритті автомобільних доріг.

Цементобетонні покриття автомобільних доріг експлуатуються у складних умовах так як зазнають одночасно дію механічних (проїзд автомобільного транспорту, що мають динамічний характер), фізичних

(добові, сезонні та річні коливання температури, відносна вологість повітря, дія сонячної радіації, вітрова ерозія) і фізико-хімічних впливів (дія хімічних реагентів, що використовуються для боротьби з ожеледицею, дія відпрацьованих газів транспортних засобів і паливно-мастильних матеріалів) [70, 89, 105, 129, 133, 152].

Як відомо, у цементобетоні ще до початку його експлуатації присутні мікротріщини, причинами виникнення яких є [89]: неякісні сировинні матеріали зокрема цемент, хімічні добавки, неправильний підбір складу, цементобетон сам по собі як матеріал є капілярно-пористим тілом із порами різного характеру, об'ємні деформації тверднучого цементу, різниця у деформативних характеристиках матричного матеріалу та заповнювачів, усадка, різниця у значеннях коефіцієнта лінійного температурного розширення компонентів бетону, порушення технології влаштування і ущільнення сумішей, неправильний догляд особливо в початковий період твердіння [67, 89]. При поєднанні умов експлуатації і дефектів структури цементобетону у вигляді капілярної пористості, макропор, технологічних тріщини відбувається концентрація напружень, що може спричинити появу експлуатаційних тріщин [62, 154].

Згідно із сучасними уявленнями [39-42, 89] визначальний вплив на несну здатність дорожніх плит при згині мають тріщини в структурі бетону, які розвиваються за механізмом нормального відриву. При багатоцикловій втомі мікропроцеси руйнування локалізуються в малій зоні біля вершини тріщини і визначаються асимптотичними полями напружень і деформацій [39-42, 89]. Процес розвитку тріщин має стійкий характер, що супроводжується поступовим накопиченням локальних руйнувань. Коли накопичення мікро- і макродефектів у структурі цементобетону сягає певної критичної межі, утворення нових тріщин і розвиток уже існуючих відбувається лавиноподібно – цементобетон руйнується [39-42, 89]. Якщо цементобетон працює в межах прогнозованих експлуатаційних навантажень, цей процес може тривати десятки років [39-42, 89]. Прискорення руйнування

відбувається при перевищенні розрахункових навантажень і посиленні агресивної дії тепло-вологісних і корозійних чинників [53].

Проводилося обстеження стану існуючих плит цементобетонного покриття на ділянці км 21+620 – км 38+ 880 на ділянки автомобільної дороги Н-01 Київ – Знам'янка, км 21+620 – км 38+880». Дана дорога відноситься до категорії Іб [13,170].

За результатами проведених обстежень станом на 2015 року загальна площа руйнувань складає 14,67 % [170]. В табл.3.3 наведено результати обстеження цементобетонного покриття на ділянці км 21+620 — км 38+ 880 [13].

Аналіз видів руйнувань свідчить про збільшення кількості дефектів, що виникли у результаті втрати несної здатності цементобетонних плит [170]. Кількість зруйнованих плит і об'єм дефектів у 2015 році збільшились майже на порядок у порівнянні з даними 2011 року [170]. Це свідчить про лавиноподібний характер виникнення дефектів, пов'язаних із втратою несної здатності плит [12,170].

В табл.3.4 наведено результати обстеження цементобетонного покриття на ділянах дороги в м. Олександрівка (Київська область) Т 10-26, Петрівцях, Дніпропетровську, Столичному ринку, де термін експлуатації покриття становить 10 років, цементобетонне покриття біля ТРЦ Атмосфера м. Київ (термін експлуатації 6 років).

Результати наведені в табл. 3.4, підтверджують, що в результаті дії усадки, температури та транспорту на покриття автомобільних доріг сприяє утворенню пошкоджень, кількість яких з часом збільшується [170].

Таблиця 3.3 — Результати обстеження цементобетонного покриття на ділянці км 21+620 — км 38+ 880

Умовні позначення дефектів	Кількість ділянок плит L=4м	Кількість плит, шт	Відсоток, %	покрита а/дорога і згідно ГН В.2.3-	Рівень технічного стану
Тріщина широка	158	317	3,9	Відсереднього до високого	Не задовільно
Тріщина волосяна	611	1622	19,8	Низький	Задовільно
Сітка тріщин	32	63	0,8	Низький	Задовільно
Вибойна та глибина (см)	237	475	5,8	Відсереднього до високого	Не задовільно
Лущення	34	67	0,8	Середній	Не задовільно
раковини	288	576	7,0	Відсереднього до високого	Не задовільно
Здиблення					
Руйнування крайків шву	750	1500	18,3	Відсереднього до високого	Не задовільно
Повністю зруйновані плити	8	16	0,2	Зруйновані	Не задовільно
Частково пошкоджені (в основному поперечні та поздовжні шви)	407	814	9,9		Задовільно
Не пошкоджені	1377	2754	33,6		Добрий
Всього	4102	8204	100		

Таблиця 3.4 — Результати обстеження цементобетонного покриття

Найменування об'єкту	Кількість тріщин на 1000м ² цементобетонного покриття					
	Усадочні тріщини	Лущення	Поздовжні, м.п.	Поперечні, м.п.	Сітка тріщин, м ²	Групування кромки
1	2	3	4	5	6	7
Олександрівка Т 10-26	62 %	30 %	63%	85 %	84%	30
Петрівці	30%	35%	40%	20%	10%	25%
Дніпропетровськ	75 %	45%	40%	35%	50%	40%
Цементобетонне покриття на столичному ринку в м. Києві	35%	30%	15%	10%	10%	15%
Цементобетонне покриття біля ТРЦ Атмосфера м.Київ	40%	30%	30%	25%	15%	25%

3.3.2 Аналіз результатів оптимізації складів цементобетонів для покриття автомобільних доріг

Визначення оптимальних складів цементних бетонів із комплексною хімічною добавкою проводилось за критеріями: водоцементного співвідношення суміші, забезпечення дотриманості властивостей цементобетонної суміші з часом, вмісту залученого повітря, міцності на стиск і згин, економічної ефективності. Дослідження виконували з використанням двохфакторного плану експерименту. Фактори і інтервали їх варіювання наведено в табл.3.1. Проведено статистичний аналіз та отримано експериментально — статистичні моделі за допомогою програми STATISTICA, які наведено на рис. 3.6 — 3.11.

Представлено математичну модель водоцементного співвідношення суміші (рис. 3.6). Згідно із вимогами [180] водоцементне співвідношення повинно бути не більше 0,5. Дана вимога задовольняється для всіх складів цементобетонів (рис.3.10).

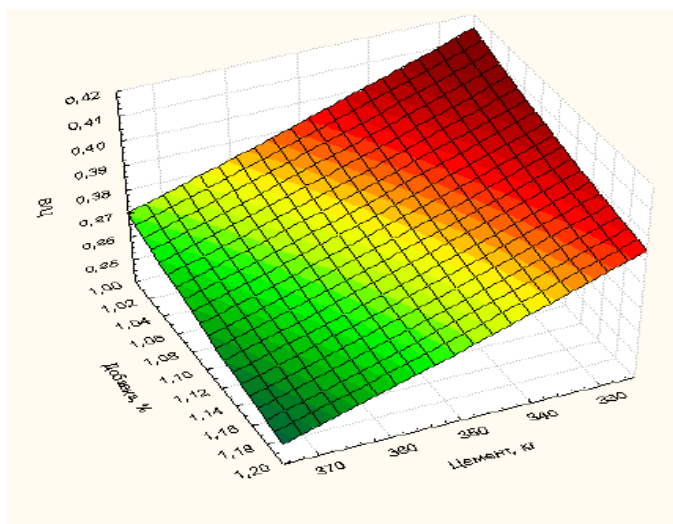
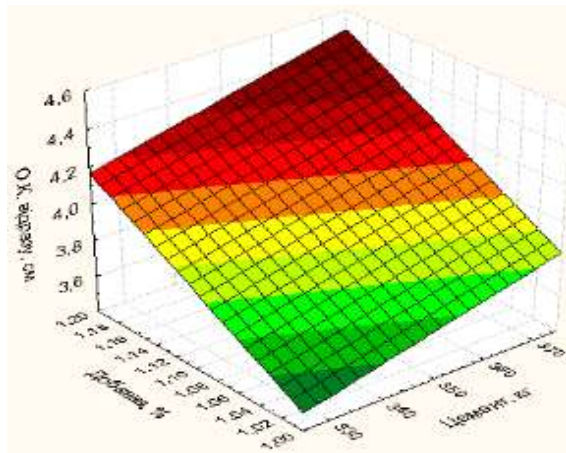


Рисунок 3.6 — Математична модель водоцементного співвідношення суміші

$$\begin{aligned} \text{В/Ц} = & 1,1566 - 0,0017 * x - 0,4733 * y + 1,3333E-6 * x * x - \\ & 0,0001 * x * y + 0,1833 * y * y \quad R^2 = 0,997 \end{aligned}$$

Важливим в технології будівництва монолітних цементобетонних покриттів є забезпечення збереження технологічних властивостей бетонної суміші (не менше 2 годин) [180]. Представлені математичні моделі впливу

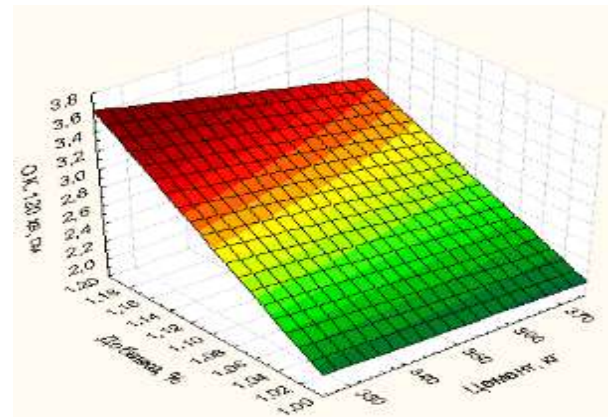
комплексної добавки на збереження легкоукладальності бетонної суміші протягом 2 годин (рис. 3.7) і вмісту залученого повітря (рис. 3.8). Марка суміші по легкоукладальності становила P1, P2.



а)

$$OK_0 = -2 + 0,01 \cdot X_1 + 3,33 \cdot X_2 + 1,87 \cdot E-15 \cdot X_1^2 + 5,91 \cdot E-14 \cdot X_1 \cdot X_2 - 5,18 \cdot E-11 \cdot X_2^2;$$

$$R^2 = 0,83$$



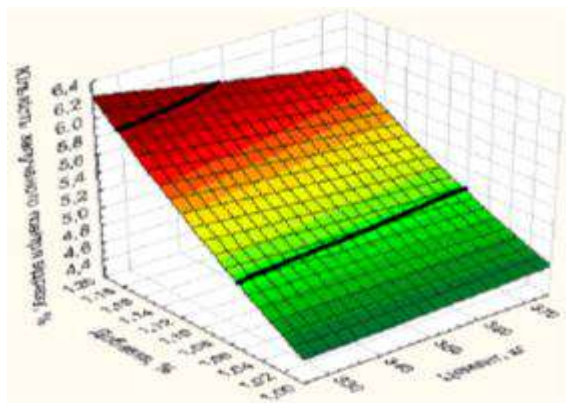
б)

$$OK_{120\text{хв.}} = -21,58 + 0,05 \cdot X_1 + 24,17 \cdot X_2 + 1,57 \cdot E-14 \cdot X_1^2 - 0,05 \cdot X_1 \cdot X_2 + 3,96 \cdot E-10 \cdot X_2^2;$$

$$R^2 = 0,94$$

а) відразу; б) через 120 хв

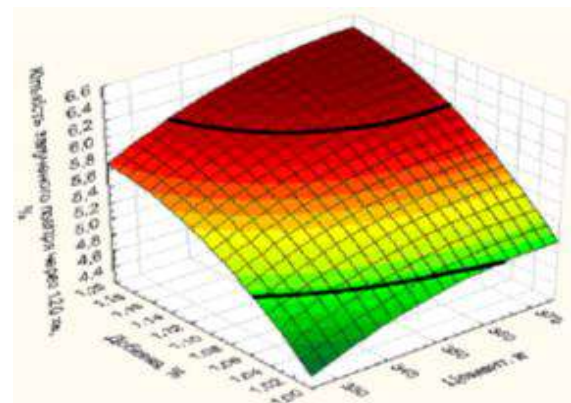
Рисунок 3.7 — Математична модель рухомості



а)

$$V_0 = -10,98 + 0,05 \cdot X_1 + 7,68 \cdot X_2 + 1,07 \cdot E-5 \cdot X_1^2 - 0,06 \cdot X_1 \cdot X_2 + 8,67 \cdot X_2^2$$

$$R^2 = 0,94$$



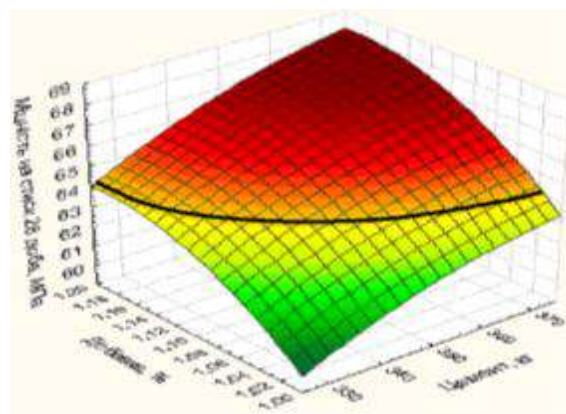
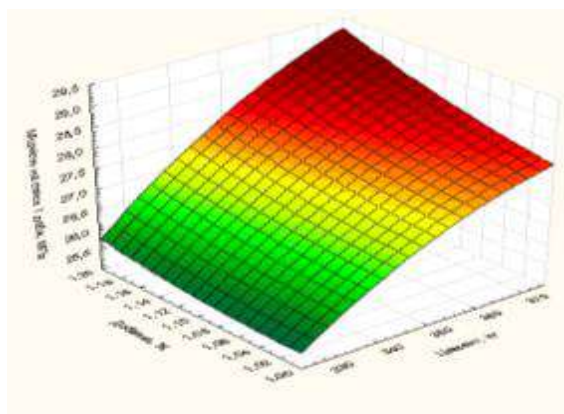
б)

$$V_{120} = -68,78 + 0,19 \cdot X_1 + 62,85 \cdot X_2 - 0,0003 \cdot X_1^2 + 0,02 \cdot X_1 \cdot X_2 - 28,5 \cdot X_2^2$$

$$R^2 = 0,86$$

а) відразу; б) через 120 хв

Рисунок 3.8 — Математична модель вмісту залученого повітря в суміші



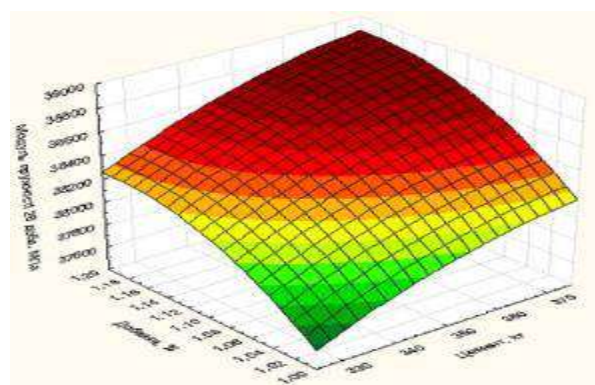
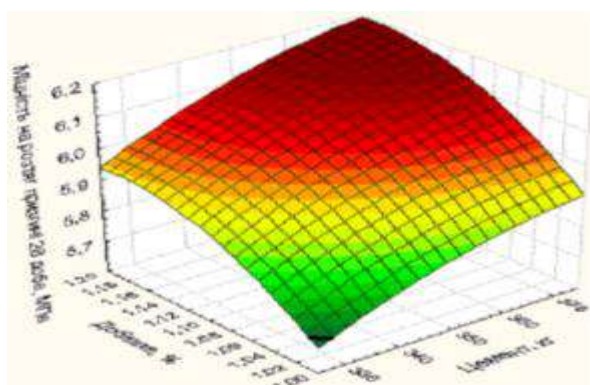
а) нарізання швів
 $R^{100}_{ст} = -24,83 + 0,39 \cdot X_1 - 53 \cdot X_2 - 0,0006 X_1^2 + 0,09 X_1 \cdot X_2 + 11,67 \cdot X_2^2$;
 $R^2 = 0,93$
 а) 1 доба, б) 28 доба

б) марочна міцність на стиск В50
 $R^{28}_{ст} = -226,21 + 0,66 \cdot X_1 + 272,67 \cdot X_2 - 0,0009 \cdot X_1^2 + 0,06 \cdot X_1 \cdot X_2 - 123,33 X_2^2$;
 $R^2 = 0,89$

Рисунок 3.9 — Математична модель міцності при стиску

За результатами наведених на рис. 3.9 (а) всі склади характеризуються високою ранньою міцністю, тому нарізання деформаційних швів слід виконувати через 5 ... 6 годин після укладання в залежності від температури повітря.

Модуль пружності для дорожнього цементобетону повинен складати $37 - 42 \cdot 10^3$ МПа (при 5 — 6 % залученого повітря). Всі склади задовольняють дану вимогу (рис. 3.10 (б)).



а)
 марочна міцність на розтяг при згині (B_{btb} 4,4)
 $R^{28}_{зг} = -12,29 + 0,04 \cdot X_1 + 17,11 \cdot X_2 - 5,82 \cdot X_1^2 + 0,0032 \cdot X_1 \cdot X_2 - 7,67 \cdot X_2^2$; $R^2 = 0,92$

б)
 $E_{28} = -10631,36 + 113,87 X_1 + 45762,98 X_2 - 0,15 X_1^2 + 4,16 \cdot X_1 \cdot X_2 - 19861,81 X_2^2$; $R^2 = 0,92$

а) марочної міцності на розтяг при згині, б) модуля пружності

Рисунок 3.10 — Математична модель

Проведено техніко-економічне обґрунтування отримання високоміцного дорожнього цементобетону [180]:

$$C_{\text{ЦБС}} = C_{\text{щ}} V_{\text{щ}} + C_{\text{п}} V_{\text{п}} + C_{\text{ц}} V_{\text{ц}} + C_{\text{д}} V_{\text{д}} + C_{\text{тех}} + C_{\text{пер}} \Rightarrow \min, \quad (3.12)$$

де $C_{\text{ЦБС}}$ — питома вартість 1 м³ цементобетонної суміші, грн.;

$C_{\text{щ}}, C_{\text{п}}, C_{\text{ц}}, C_{\text{д}}$ — вартість щебеню, піску, цементу та добавки, грн./м³ (із урахуванням цін на будівельні матеріали станом на 01.02.2018);

$V_{\text{щ}}, V_{\text{п}}, V_{\text{ц}}, V_{\text{д}}$ — кількість щебеню, піску, цементу та добавки, яка необхідна для приготування 1 м³ цементобетону;

$C_{\text{тех}}$ — вартість технології приготування цементобетонної суміші (загальновиробничі та адміністративні витрати, амортизація обладнання, прибуток, ПДВ тощо);

$C_{\text{пер}}$ — вартість технології влаштування цементобетонного покриття (доставка суміші, заробітна плата, вартість машин та механізмів тощо).

Вартість високоміцного цементобетону не враховує витрати на доставку суміші.

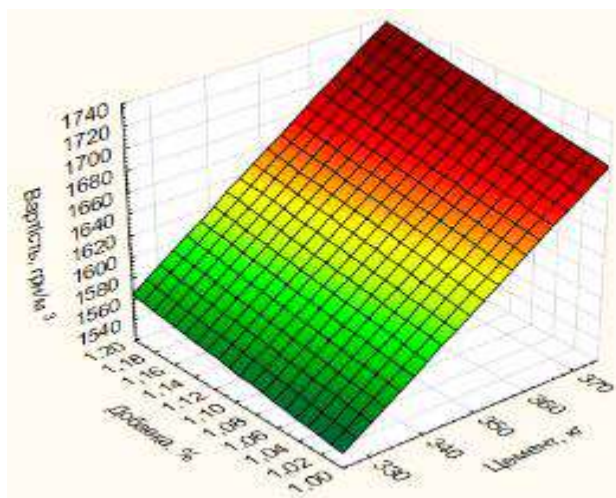


Рисунок 3.11 — Математична модель вартості цементобетонної суміші з комплексною добавкою

$$C_{\text{ЦБС}} = 201,98 + 4,28 X_1 - 0,60 X_2 - 0,002 \cdot X_1^2 + 0,47 X_1 \cdot X_2 + 0,17 \cdot X_2^2; R^2 = 0,99$$

Отримані результати досліджень стали основою для оптимізації складів цементобетону, що використовується для будівництва покриття доріг. Задачу оптимізації сформульовано як задачу пошуку оптимальних складів бетонів із урахуванням реологічних властивостей сумішей, напружено – деформованого стану цементобетонів у конструкції та економічної ефективності [180].

Міцність дорожнього бетону на розтяг при згині – це властивість, яка визначає їх тріщиностійкість, витривалість та довговічність. Тому критерієм оптимізації прийнято границю міцності цементобетону на розтяг при згині: $B_{btb} \geq 4,4$ [180].

Аналізуючи попередні результати досліджень міцності цементобетону на стиск прийнято граничне значення класу міцності B50 [180].

Бетонна суміш повинна зберігати свою легкоукладальність протягом двох годин і становити $1,0 \leq OK \leq 4,0$ [180].

Для забезпечення марки по морозостійкості цементобетон для будівництва покриття доріг повинен містити залучене повітря, вміст якого регламентовано в $5,0 \leq V \leq 6,0$ [173].

Гранична вартість складів дорожніх високоміцних цементобетонів становить 1700 грн./м³. Оптимізація складів цементобетонів для покриття доріг [179] представлена на рис. 3.12.

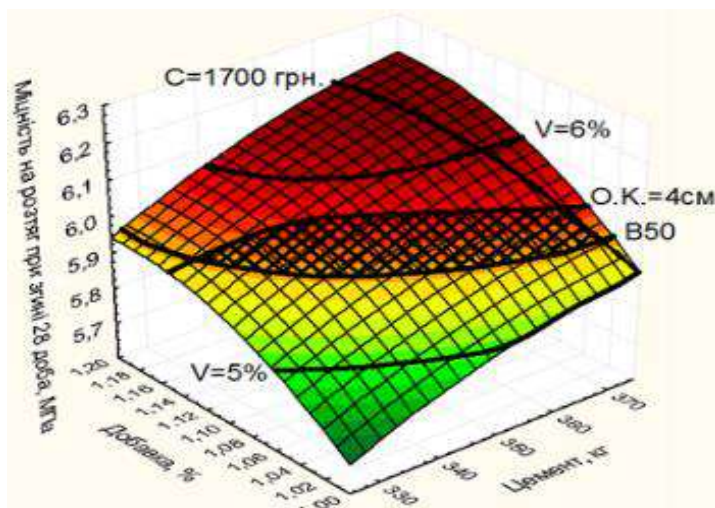


Рисунок 3.12 — Оптимізація складів високоміцних дорожніх цементобетонів

Для подальших досліджень впливу комплексної хімічної добавки на реологічні, фізико-механічні, розрахункові характеристики, тріщиностійкість і показник втоми цементобетону прийнято оптимальний склад при витраті в'язучого — 350 кг/м^3 і комплексної хімічної добавки ШАГ ПА SP-1М 1,1 % від маси в'язучого) [154].

3.3.3 Визначення технологічних властивостей цементобетонних сумішей із хімічними добавками

Проведено порівняння добавки ШАГ ПА SP-1М (Д2) [154] із комплексною добавкою, яка складається із суперпластифікатора і повітрявтягуючої добавки зарубіжного виробництва МС – Bauchemie (Д1) та ШАГ ПА SR-3М (хімічною добавкою аналогом досліджуваної комплексної добавки із іншим % вмістом компонентів) (Д3) [178,186,187,].

Показник легкоукладальності цементобетонної суміші становить 4,5 см, вміст залученого повітря 5 %. На рис. 3.13, 3.14 наведено дані впливу на дотримання властивостей сумішей (рухомості, вмісту залученого повітря) протягом 120 хвилини. Всі склади задовольняють вимогу.

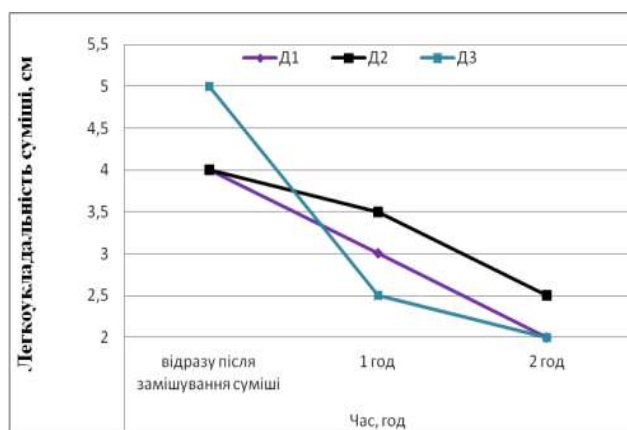


Рисунок 3.13 — Вплив добавок на збереження легкоукладальності цементобетонної суміші

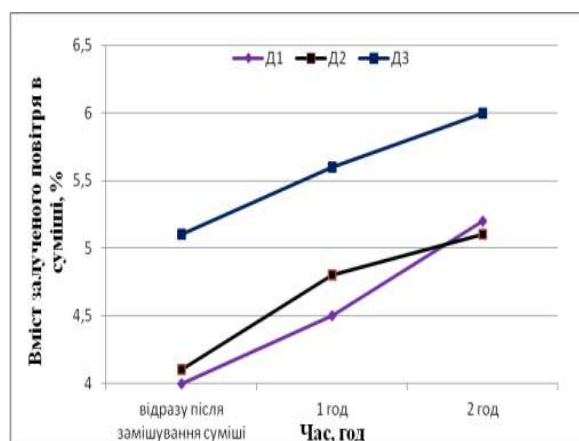


Рисунок 3.14 — Вплив добавок на вміст залученого повітря в бетонній суміші

3.3.4 Визначення розрахункових характеристик цементобетонів для покриття автомобільних доріг

Для розрахунку конструкцій дорожнього одягу жорсткого типу необхідно мати достовірні дані про розрахункові характеристики цементобетону: міцність на розтяг при згині, модуль пружності, коефіцієнт Пуассона та показник витривалості [172].

Міцність і деформативність дорожнього бетону на розтяг при згині — це властивості, які визначають їх тріщиностійкість, витривалість та довговічність. Модуль деформації залежить від фізико-механічних властивостей заповнювачів та їх кількісного вмісту в суміші.

За результатами розрахунків, наведених в [98], збільшення міцності бетону призводить до значного зменшення товщини плити і дозволяє відмовитися від армування.

На рис. 3.15 наведено вплив комплексних хімічних добавок на міцність на розтяг при згині зразків призм цементобетонну випробуваних на 28 добу твердіння.

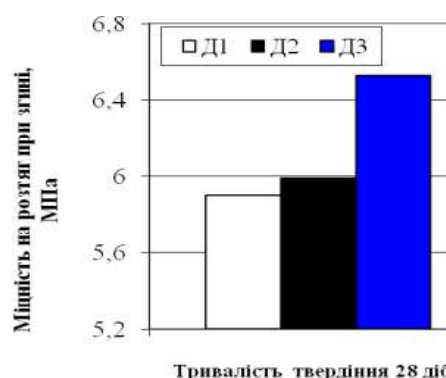


Рисунок 3.15 — Загальний вигляд при випробування цементобетонної призми на розтяг при згині і результати випробування на розтяг при згині

Розрахункове значення міцності на розтяг при згині становить:

$$B_{btb} = R_{cp} \cdot (1 - 1,64 \cdot C_v / 100), \quad (3.13)$$

де R_{cp} — середнє значення міцності на розтяг при згині,

C_v — коефіцієнт варіації міцності на розтяг при згині.

Результати випробування цементобетону на різних добавках наведено в табл. 3.5.

Таблиця 3.5 — Порівняння результатів випробувань

Характеристика		Добавки		
		Д1	Д2	Д3
Середня щільність, г / см ³		2,387	2,393	2,347
	1 доба	36,64	33,23	41,73
	3 доба	48,3	48,39	53,49
	7 доба	56,21	57,25	57,86
	14 доба	60,66	60,2	61,8
	28 доба	63,6	63,98	66,7
Міцність при стиску зразків призми, (28 доба твердіння в нормальних умовах), МПа		49,8	50,1	52,22
Міцність на розтяг при згині, (28 доба твердіння в нормальних умовах), МПа		5,9	5,99	6,53
Міцність на розтяг при розколі зразків циліндрів, (28 доба твердіння в нормальних умовах), МПа		4,16	4,22	4,28

Отже, при витраті цементу 350 кг/м³ і вмісті 1,1% комплексної хімічної добавки від маси цементу отриманий дорожній високоміцний бетон В50 Вbtb5,2P1F200 [178,186,187]. Бетонна суміш з комплексними добавками Д1, Д2, Д3 характеризується збереженням рухливості в часі не менше 2 годин і вмістом залученого повітря 4% — 6% для забезпечення необхідної морозостійкості [178,186,187]. За результатами випробування міцності на стиск зразків кубів 100x100x100 мм з різними комплексними хімічними добавками видно, що зразки з комплексною добавкою Д3 на першу добу тверднення мають більшу ранню міцність: на 12 % в порівнянні з добавкою Д1 і на 20 % в порівнянні з добавкою Д2. Надалі значення міцності на стиск для Д1 і Д2 досить близькі, а для Д3 на 4 % більше, ніж для Д1 і Д2. За результатами випробування на стиск призми, зразки з комплексною добавкою Д3, Д1 мають близькі значення міцності: 58,21 МПа, 56,06 МПа, відповідно, а з добавкою Д2 — 50,86 МПа [178,186,187]. Результати випробування зразків-циліндрів на розтягування при розколюванні показують, що найбільше

значення мають зразки з добавкою Д3 — 4,28 МПа і з добавкою Д2 — 4,22 МПа [178,186,187].

За результатами випробування на розтяг при згині, найбільшу міцність мають зразки з комплексною добавкою Д3 — 6,53 МПа і на 9,7 % і 8,3 %, відповідно, менше зразки з добавками Д1 і Д2 .

На рис. 3.16 наведено вплив хімічних добавок на міцність при стиску зразків призм, випробуваних на 28 добу твердіння. При випробуванні на стиск зразки руйнуються під кутом 70° — 80° по площині максимальних дотичних напружень [178].

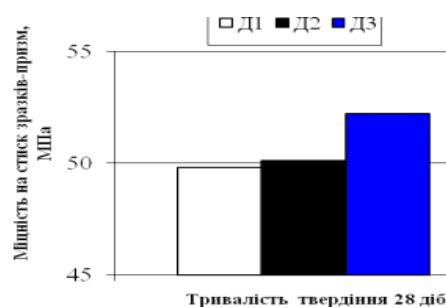


Рисунок 3.16 — Характерне руйнування зразка – призми і результати порівняння зразків з хімічними добавками на міцність при стиску призм

На рис. 3.17 наведено загальний вигляд обладнання для визначення модуля пружності та результати дослідження (рис. 3.18).

Модуль пружності цементобетону хімічною добавкою Д3 більший і складає 42567 МПа, зразок хімічною добавкою Д1 має дещо менше значення модуля пружності ніж Д3 і становить — 41298 МПа, проте зразок з хімічною добавкою має дещо менше значення модуля пружності — 39189 МПа, тобто слід очікувати, що цементобетон із запропонованою хімічною добавкою Д2 має більшу тріщиностійкість [178].

На рис. 3.20 наведено результати визначення модуля деформації цементобетонних зразків. Для вимірювання величини прогину

використовувалась рамка, на якій кріпиться індикатор годинникового типу з ціною поділки 0,001 мм [186,187].



Рисунок 3.17 — Загальний вигляд обладнання при визначенні модуля пружності

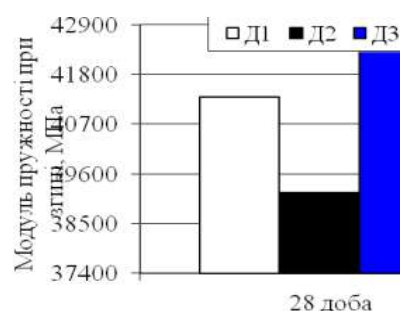


Рисунок 3.18 — Результати визначення модуля пружності цементобетону

Рамка встановлюється по середині зразка (на нейтральній осі) відносно вертикальної площини і закріплюється над опорами (рис. 3.20) [176].

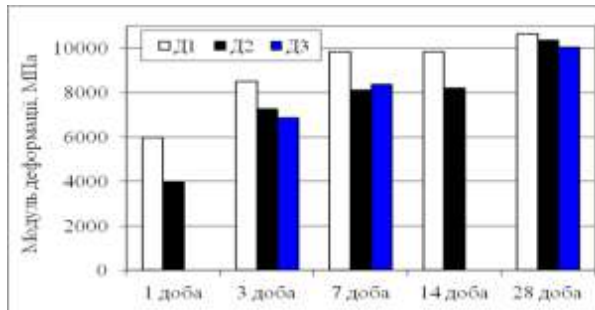


Рисунок 3.19 — Результати визначення модуля деформації цементобетонних зразків



Рисунок 3.20 — Загальний вигляд при випробуванні цементобетонної призми на розтяг при згині

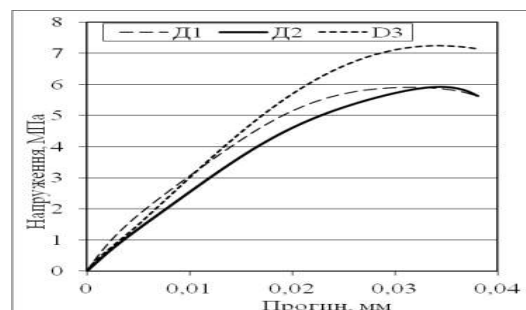


Рисунок 3.21 — Діаграма “напруження деформація”

3.3.5 Визначення фізико-механічних властивостей цементобетонів для покриття автомобільних доріг

Результати визначення середньої щільності цементобетонних зразків наведено на рис.

Функція розподілу середньої щільності бетонних зразків найкраще описується законом Пірсона типу I такого виду (рис. 3.26) [186]:

$$\tilde{n}_j = \tilde{n}_0 \left(1 + \frac{x}{l_1}\right)^{q_1} \left(1 + \frac{x}{l_2}\right)^{q_2}, \quad (3.14)$$

де: q_1, q_2 — показники форми ($q_1 = 14,57$; $q_2 = 7,48$);

l_1, l_2 — параметри масштабу ($l_1 = 13,28$; $l_2 = 6,82$);

$\tilde{n}_0$ — частота.

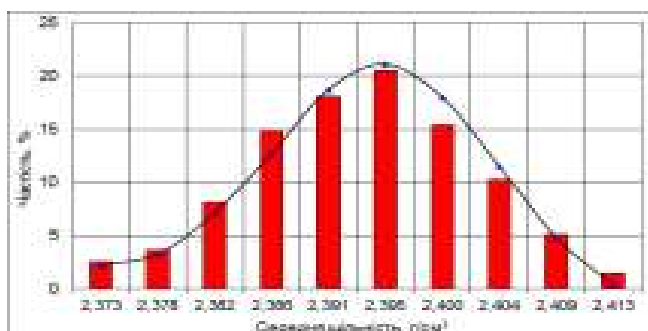


Рисунок 3.22 — Розподіл середньої щільності за результатами гідростатичного зважування

Середнє значення щільності бетону на різних добавках практично співпадає $2,387 \text{ г/см}^3$ з добавкою Д1; $2,393 \text{ г/см}^3$ з добавкою Д2; $2,347 \text{ г/см}^3$ з добавкою Д3[176].

На рис. 3.23 наведено вплив хімічних добавок на границю міцності при стиску зразків кубів.

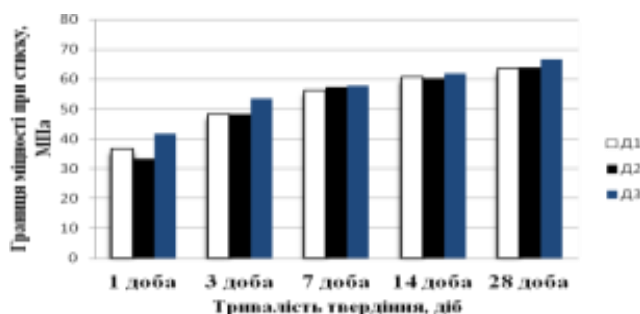


Рисунок 3.23 — Вплив хімічних добавок на границю міцності при стиску цементобетонних зразків

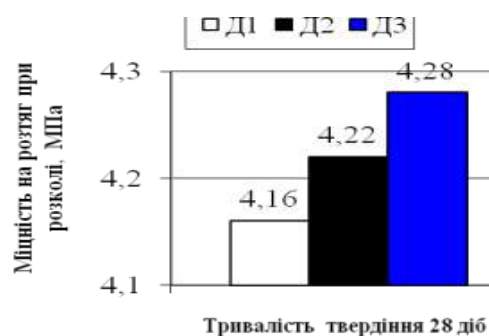
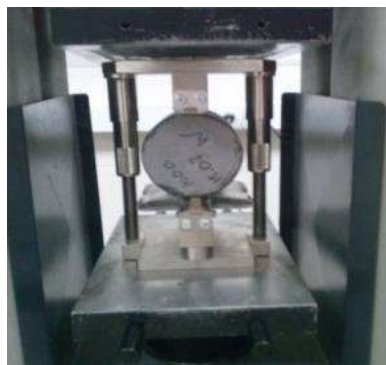


Рисунок 3.24 — Рисунок 3.25 — Порівняння випробування цементобетонних різних хімічних добавок на міцність циліндрів на розтяг при розколі на розтяг при розколі

В табл. 3.6 наведено результати випробування цементобетонних зразків з хімічними добавками на стирання. Згідно вимог [166] показник стирання цементобетону для покриття доріг повинен бути менше 0,7.

Таблиця 3.6 — Результати випробування на стирання цементобетонних зразків

п/п	Наявність хімічної добавки	Площа стираної грані, см ²	Вага до випробування, г	Вага після випробування, г	Стиранність, г/см ²	Середнє значення	Вимога згідно ДСТУ Б В.2.7–145
1	ШАГ ПА SP-1М (Д2)	49,53	823,5	801,7	0,44	0,43	< 0,7
		49,26	834,5	813,3	0,43		
		49,83	834,0	813,5	0,41		
		49,40	827,5	805,9	0,44		
2	ШАГ ПА SR-3М (Д3)	49,0	838,6	806,6	0,65	0,65	
		49,0	818,6	788,2	0,64		
		49,0	829,1	797,5	0,65		
		49,0	833,9	802,0	0,65		

При проведенні випробування цементобетонних зразків на водо непроникливість було встановлено, що зразки витримали тиск 1,0 МПа, що відповідає марці по водонепроникності W10.

На рис. 3.26 показані зразки, які витримали 30 циклів заморожування-відтавання за III-м прискореним методом F200. Результати випробувань наведені в табл. 3.7.

Зразки витримали 30 циклів заморожування-відтаювання, що відповідає марці за морозостійкістю F200, різниця по міцності на стиск складає 1 %, втрата маси 0,12 %.

Проведено дослідження впливу розробленої комплексної хімічної добавки (Д2) у порівнянні із хімічною добавкою аналогом зарубіжного виробництва (Д1) та контрольним складом. Дослідження проводилися на цементобетонах марки за рухомістю — Р4. Результати визначення повітряної усадки наведені на рис. 3.28.

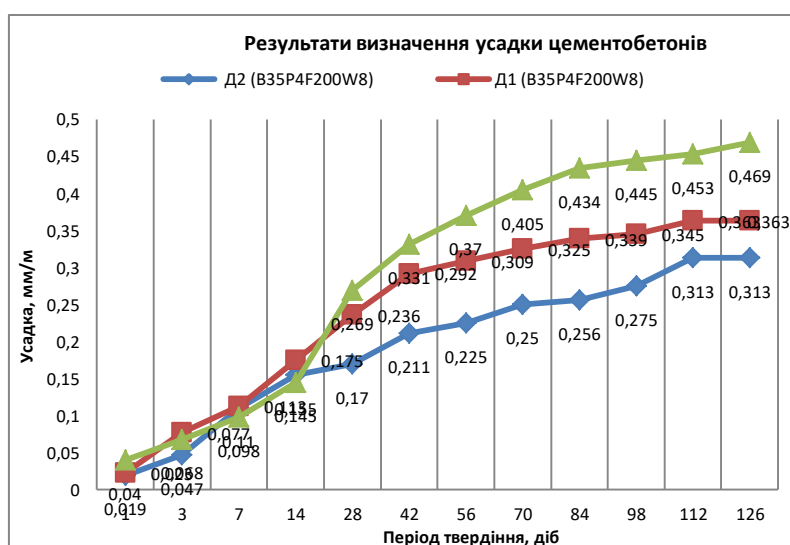


Рисунок 3.27 — Вплив добавки на усадку цементобетону

Отримані результати показують, що цементобетон із вмістом комплексної хімічної добавки Д2 має найменше значення усадки на 126 добу твердіння (0,313 мм/м), найбільше значення у контрольного складу — 0,469 мм/м.

3.3.6 Результати визначення тріщиностійкості цементобетону для покриття автомобільних доріг

Вплив хімічної добавки Д2 [154] на тріщиностійкість дорожнього цементобетону (B50 P1 F200 W10) у порівнянні із контрольним складом.

Аналіз характеристик тріщиностійкості було проведено із врахуванням двох стадій деформування і руйнування дорожнього бетону: I — докритична стадія руйнування (до моменту початку руху магістральної тріщини) за параметрами W_m , W_i, G_i , J_i , K_i ; II — закритична стадія руйнування (з моменту старту тріщини і до повного руйнування зразка) за параметрами W_l , G_F, K_c . [179].

На рис. 3.28 представлені ПРДД дорожніх бетонів контрольного складу (зразки серії К) та з вмістом комплексної добавки ШАГ (зразки серії D), а результати розрахунку на їх основі параметрів тріщиностійкості наведено в [179].

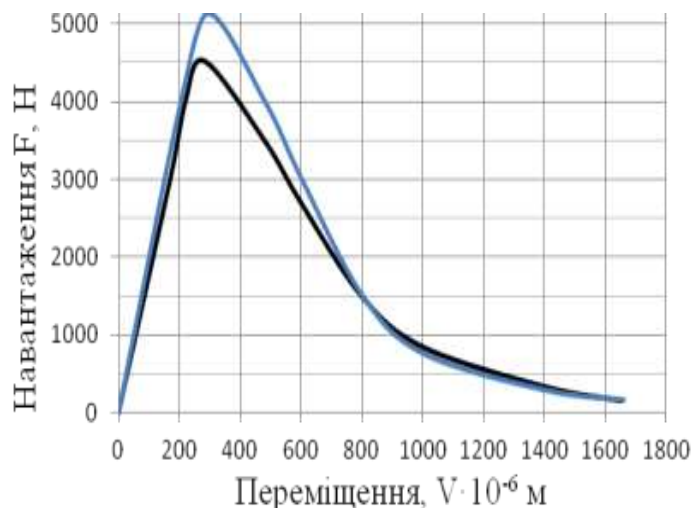


Рисунок 3.28 — Діаграми стану цементобетонів серії К (контрольного складу) і D (із вмістом комплексної хімічної добавки) (усереднені)

Аналіз першого етапу деформування (зростаюча вітка на діаграмі) на рис. 3.28 показує, що витрати енергії на стадії мікротріщиноутворення і формування кінцевої зони магістральної тріщини бетону (W_m) серії Dc становить 15,48 Нм і перевищує відповідні значення для бетонів серії Kc на 29 % [184]. Енерговитрати на пружне деформування бетону (W_e) серії Dc — 68,09 Нм, що перевищує значення для бетонів серії Kc на 20 % [179].

Тобто зразки серії Dc характеризуються більшим опором мікротріщиноутворенню [179].

Питомі витрати енергії на статичне руйнування до моменту початку руху магістральної тріщини бетонів (G_I) серії Dc мають на 22 % вище значення за Kc. Статичний J — інтеграл, що характеризує роботу пластичної деформації та руйнування в околі вершини магістральної тріщини, для бетону серії Dc має більше значення порівняно з бетоном серії Kc на 23 % [184]. Величина статичного критичного коефіцієнту інтенсивності напружень (K_I) у зразків серії Dc вище на 15 %. Результати ординати точки зламу діаграми свідчить про більшу міцність на розтяг при згині і більші енерговитрати в докритичній стадії деформування до моменту зрушування макротріщини. Більша площа діаграми під спадною віткою свідчить про більші можливості цементобетону із комплексною хімічною добавкою чинити опір поширенню макротріщини. За енергетичними показниками тріщиностійкості (робота і питома енергія) і силовими показниками (критичні коефіцієнти інтенсивності напружень) перевагу має цементобетон із вмістом комплексної хімічної добавки. Силові та енергетичні характеристики тріщиностійкості цементобетонів наведено в таблиці 3.8.

Аналіз здатності цементобетону опиратися розвитку тріщин (спадаюча вітка) проводилася за параметрами W_L , G_F , K_c . Витрати енергії на локальне статичне деформування в зоні магістральної тріщини (W_L) для бетону серії Dc становить 221, 44 Нм, а для серії зразків Kc — 211,88 Нм. Питомі ефективні витрати енергії на статичне руйнування бетону (G_F) серії Dc становить 413,62 Дж/м², а для серії Kc — 383,66 Дж/м². Це узгоджується з конфігурацією спадної вітки діаграми (рис. 3.31). За показником в'язкості руйнування з урахуванням закритичної стадії деформування (K_c) незначну перевагу зберігає бетон серії Dc [179].

Отже, здатність бетону опиратися розвитку макротріщин для серії із вмістом комплексної хімічної добавки вища ніж у цементобетонах контрольного складу.

1. Зростання ординати точки зламу діаграми свідчить про більшу міцність на розтяг при згині і більші енерговитрати в докритичній стадії деформування до моменту зрушування макротріщини.

2. Більша площа діаграми під спадною віткою свідчить про більші можливості цементобетону із вмістом комплексної хімічної добавки чинити опір поширенню макротріщини.

3. Граничний прогин (точка дефрагментації) практично однакові у серій зразків контрольного складу та із вмістом комплексної хімічної добавки.

Таблиця 3.8 – Силіві та енергетичні характеристики тріщиностійкості цементобетонів

Тип та № з/п зразків	$W_m \cdot 10^{-2},$ Н·м (SOTCA)	$W_e \cdot 10^{-2},$ Н·м (SACH)	$W_i \cdot 10^{-2},$ Н·м (SOTCH)	$W_L \cdot 10^{-2},$ Н·м (SHCDK)	$W_{ui} \cdot 10^{-2},$ Н·м (SOCUM)	$W_{CE} \cdot 10^{-2},$ Н·м (SOTC'X'O)	$G_i,$ Дж/м ²	$G_F,$ Дж/м ²	$G_{CE},$ Дж/м ²	$J_i,$ Дж/м ²	$K_i,$ МПа·м ^{1/2}	$K_c,$ МПа·м ^{1/2}
K1	5,49	52,58	58,07	194,24	26,04	11,44	82,95	352,59	16,35	45,75	0,63	0,28
K2	22,10	58,95	81,05	216,09	29,20	38,79	115,79	392,91	55,41	74,08	0,78	0,54
K3	24,79	47,28	72,07	201,04	23,41	42,91	102,95	354,74	61,31	69,51	0,69	0,54
K4	1,68	67,39	69,07	238,54	33,37	22,39	98,67	437,04	31,98	50,99	0,72	0,41
Kc	12,04	56,69	68,73	211,88	28,07	25,76	98,18	383,66	36,79	58,08	0,70	0,43
Ka	13,51	56,55	70,06	212,48	28,01	28,88	100,09	384,32	41,26	60,08	0,71	0,44
D2	37,89	72,96	110,84	231,98	36,13	70,37	158,35	435,62	100,53	106,73	0,97	0,77
D3	3,51	63,94	67,45	235,98	31,67	19,14	96,35	428,45	27,34	51,12	0,66	0,35
D4	5,29	67,49	72,78	189,16	33,42	6,38	103,97	366,63	9,12	56,22	0,77	0,23
Dc	15,48	68,09	83,58	221,44	33,72	27,95	119,39	413,62	39,93	71,22	0,80	0,46
Da	15,56	68,13	83,69	219,04	33,74	31,96	119,56	410,24	45,66	71,36	0,80	0,45

Примітка: Kc, Dc – це дані на основі усередненої діаграми; Ka, Da – середні арифметичні дані на основі отриманих результатів розрахунків.

За енергетичними показниками тріщиностійкості (робота і питома енергія) і силовими показниками (критичні коефіцієнти інтенсивності напружень) перевагу має цементобетон із вмістом комплексної хімічної добавки. Це, вочевидь, пов'язано із особливостями впливу комплексної хімічної добавки на мікро – і макропоказники цементобетону.

3.3.7 Визначення залежності модуля пружності цементобетону від різного часу дії навантаження та температури

Отримано результати експериментальних досліджень дозволили описати функцію модуля пружності цементобетону, який залежить від різного часу дії навантаження та температури за залежністю:

$$E(t) = E_{MT} \cdot \left[1 + \frac{t \cdot e^{p \cdot (T_1 - Q)}}{\eta} \right]^{-\lambda} \quad (3.15)$$

де E_{MT} — модуль пружності миттєвий МПа (приймається динамічний модуль за 3.4);

t — час;

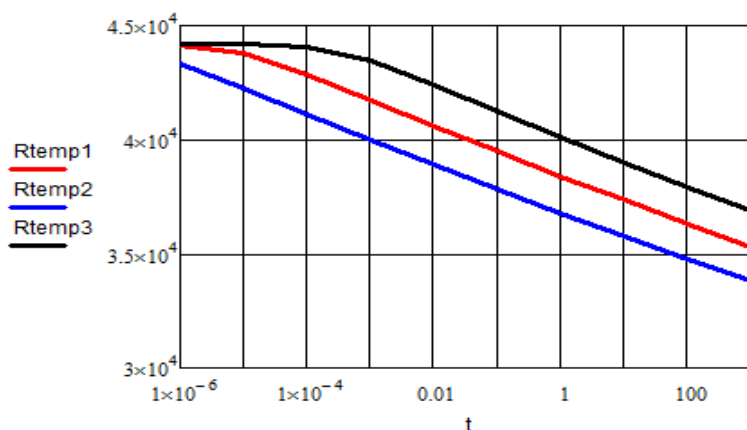
p, λ, η — параметри функції ($\eta = 90,8 \cdot 10^{-7}$; $\lambda = 0,012$);

T_1 — приведена температура, °C;

Q — фактична температура.

Результати отриманої функції модуля пружності цементобетону (рис. 3.30) підтверджуються дослідженнями відомих вчених, а саме: Гамеляком І.П., Солодким С.Й., Черніговим В.А., Грушком І.М., ними доведено, що модуль пружності цементобетону змінюється від часу дії навантаження, а Ульсоном В., Жефруа Г., Некрасовим К.Д., Маслиниковою М.Г., що при нагріванні цементобетон до температури плюс 60 °C модуль пружності зменшується, а при зниженні його до 0 °C він зростає 1,3 рази. Це свідчить про те, що врахування цієї функції (3.15) в залежність (2.39) дозволить більш

точно оцінювати довговічність цементобетонного покриття, а саме строк його служби з урахуванням вище зазначених факторів.



- 1 – модуль пружності при $T=20^{\circ}\text{C}$;
 2 – модуль пружності при $T=50^{\circ}\text{C}$;
 3 – модуль пружності при $T=0^{\circ}\text{C}$.

Рисунок 3.29 — Залежність модуля пружності цементобетону від різного часу дії навантаження

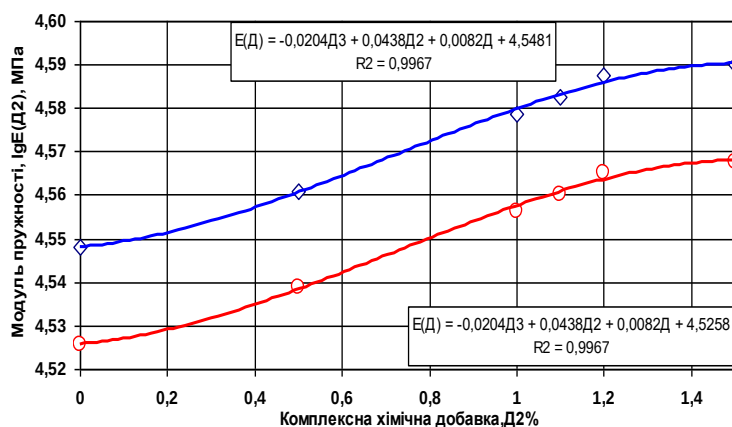


Рисунок 3.30 — Залежність модуля пружності цементобетону від кількості хімічної добавки та температури

◇ Модуль пружності Ц/Б при $T=20^{\circ}\text{C}$ ○ Модуль пружності Ц/Б при $T=50^{\circ}\text{C}$

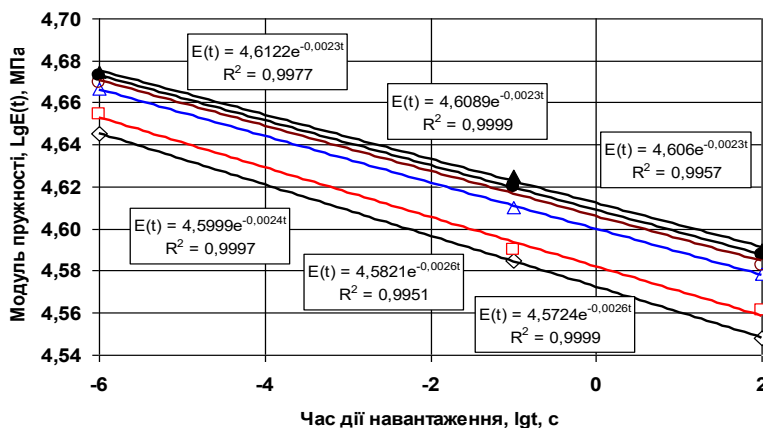


Рисунок 3.31 — Залежність функції модуля пружності цементобетону в залежності від часу дії навантаження

◇ без комплексної добавки, %" □ Комплексна добавка -Д2=0,5%
 △ Комплексна добавка -Д2=1,0% ○ Комплексна добавка -Д2=1,1%
 ● Комплексна добавка -Д2=1,2% ▲ Комплексна добавка -Д2=1,5%

3.3.8 Визначення параметрів функції довговічності цементобетонних зразків при постійному росту навантаження

Результати впливу комплексної хімічної добавки на показник втоми дорожнього цементобетону у порівнянні із контрольним складом (без хімічної добавки) наведено в таблиці 3.9.

Таблиця 3.9 — Результати співставлення експериментальних та теоретичних даних при визначенні міцності цементобетонних зразків на розтяг при згині з постійною швидкістю навантаження

Матеріал	Кількість добавки %	Швидкість наростання навантаження, $V\sigma$, МПа/с	Параметри функції довговічності		
			Втома $m=1/b\tau$	$b\tau$	$\lg B\tau$, с·МПа
Цементобетонні зразки розміром 4x4x16 см	0	0,0091	0,063	15,87	12,92
	0,1	0,0093	0,059	16,95	14,29
	0,5	0,0093	0,057	17,54	15,11
	0,6	0,0094	0,056	17,97	16,41
	1,1	0,0095	0,055	18,17	17,49
	Цементобетонні зразки з усадочними тріщинами				
	0,1	0,0091	0,068	14,77	11,04

3.3.9 Перевірка адекватності теоретичних рішень

Вирішення задачі із забезпечення або прогнозування довговічності та прогнозування його зміни в часі, може бути досягнуто при перевірці теоретичних рішень результатами експериментальних досліджень. Надійне застосування отриманих теоретичних рішень можливе лише у випадку однакових результатів, що отримані як за аналітичними рішеннями так і експериментальним шляхом.

З урахуванням отриманих в роботі теоретичних рішень та експериментальних досліджень, проведено перевірку адекватності теоретичних рішень, результати якої наведено в таблиці 3.10.

Таблиця 3.10 — Результати співставлення експериментальних та теоретичних даних при визначенні міцності цементобетонних зразків на розтяг при згині з постійною швидкістю навантаження

Матеріал	Кількість добавки%	Швидкість наростання навантаження, V_{σ} , МПа/с	Параметри функції довговічності			Напруження на розтяг при згині до руйнування σ_{np} , МПа		
			$V_{тома}$ $m=1/b_{\tau}$	b_{τ}	$lg B_{\tau}$, с·МПа	за теор.	за експ.	$\delta, \%$
Цементобетонні зразки розміром 4х4х16 см	0	0,0091	0,063	15,87	12,92	5,22	4,99	4,38
	0,1	0,0093	0,059	16,95	14,29	5,66	5,60	1,03
	0,5	0,0093	0,057	17,54	15,11	5,94	5,90	0,56
	0,6	0,0094	0,056	17,97	16,41	6,69	6,65	0,66
	1,1	0,0095	0,055	18,17	17,49	7,47	7,23	3,25
	Цементобетонні зразки з усадочними тріщинами							
	0,1	0,0091	0,068	14,77	11,04	5,25	5,68	7,62

Теоретичні показники напружень, що витримують зразки досліджуваних цементобетон на розтяг при згині до руйнування, встановлювали за залежністю (3.16), використовуючи дані, що наведені в таблиці 3.9:

$$\sigma_{np} = [V_{\sigma} \cdot B_{\tau} \cdot (1/b_{\tau} + 1)^{b_{\tau}}]^{\frac{1}{b_{\tau}+1}}, \quad (3.16)$$

де V_{σ} — швидкість навантаження;

B_{τ} та b_{τ} — параметри функції довговічності згідно таблиці 3.9.

Отримані результати свідчать (табл. 3.9), що теоретичні розрахунки задовільно узгоджуються з експериментальними даними. Розбіжність знаходиться для визначення міцності зразків на розтяг при згині, при постійній швидкості навантаження до руйнування в межах від 0,56 % до 7,62 %, при рівні довірчої вірогідності 0,95.

Це вказує на можливість практичного застосування подібних залежностей, які отримані та наведені у дисертаційній роботі з метою забезпечення або прогнозування необхідної довговічності цементобетонного покриття на автомобільних дорогах від спільного впливу усадки цементобетону, зміни температури та дії пневматичних коліс транспортних засобів.

3.4 Числове моделювання впливу розташування транспортного навантаження на цементобетонне покриття автомобільних доріг

Враховуючи те, що на цементобетонне покриття автомобільної дороги діє складне просторове навантаження, тому доцільно використати числовий метод визначення напружено-деформованого стану покриття, що базується на розв'язанні рівнянь теорії пружності — методу скінченних елементів як найбільш універсального і ефективного. Його особливістю є безпосередній перехід від континуального об'єкту до дискретного аналізу шляхом ділення області об'єкту, який досліджується на ряд під-областей та апроксимації полів переміщень, зусиль, напружень, наприклад, з використанням інженерно-розрахункового комплексу ANSYS.

Тому розглянемо чотиришарову конструкцію жорсткого дорожнього одягу, що складається з цементобетонної плити, трьох шарів, які влаштовані на ґрунтовій основі (табл. 3.11) [183].

Розмір плит вздовж напрямку руху транспорту складає 5 м та в поперечному напрямку 3 м. Між плитами влаштовані шви розширення, шви стиснення та повздовжні шви (рис. 3.32). Прийmemo припущення, що шви влаштовані на всю товщину плити та не укріплені штирями. Товщини та механічні властивості шарів основи та цементобетонної плити наведено в таблиці 3.11. В чисельних розрахунках товщина бетонної плити h_1 варіювалася від 18 см до 26 см з кроком 2 см [183].

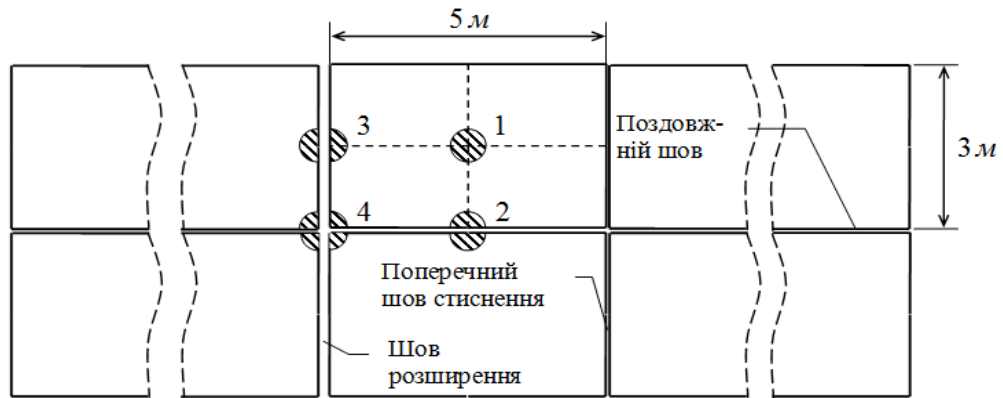


Рисунок 3.32 — Геометрична схема цементобетонного покриття

Таблиця 3.11 — Механічні властивості та товщини шарів конструкції жорсткого дорожнього одягу

№	шар	h_i , см	Модуль пружності (Мпа)	Коефіцієнт Пуасона	Щільність кг/м^3
1	Важкий бетон класу В35П1F200W8	18 — 26	30000	0,18	2350
2	Щебенево-піщана суміш C7	17,5	400	0,3	2000
3	Щебенево-піщана суміш C5	15	320	0,3	2000
4	Пісок середньої крупності	10	120	0,28	2000
5	Існуюче земляне полотно (супісок пилуватий)	80	48	0,3	2000

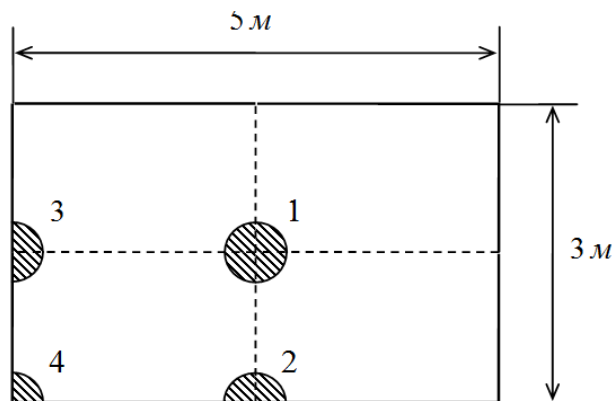


Рисунок 3.33 — Варіанти розташування транспортного навантаження на цементобетонній плиті

Виділимо для розгляду одну плиту (рис. 3.33).

Вважаємо, що транспортне навантаження на конструкцію – це тиск p , що передається від гумового колеса транспортного засобу на круглий відбиток діаметру D . В розрахунках приймалося що $p = 1$ МПа, $D = 34,5$ см.

Крім транспортного навантаження на конструкцію діє гравітаційне навантаження від її власної ваги в вертикальному напрямку (вздовж осі Oz рис. 3.35.).

Розглянемо чотири варіанти розташування транспортного навантаження (рис. 3):

Варіант №1 – відбиток колеса знаходиться в центрі бетонної плити;

Варіант №2 – відбиток колеса знаходиться посередині повздовжнього шва;

Варіант №3 – відбиток колеса знаходиться посередині поперечного шва;

Варіант №4 – відбиток колеса знаходиться в куті плити на перетині повздовжнього та поперечного швів.

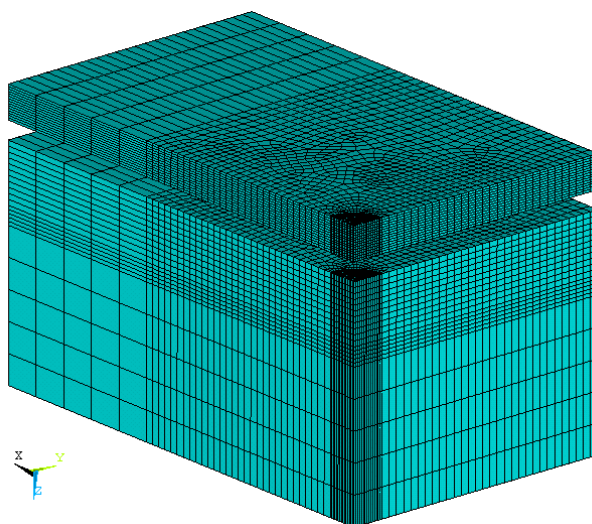
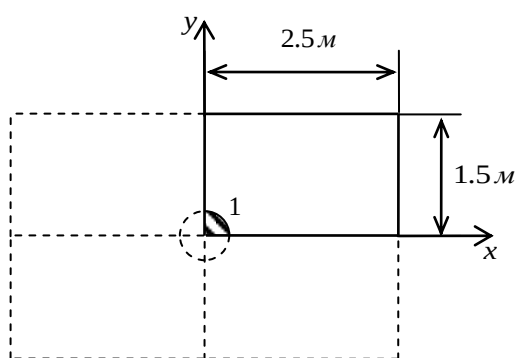


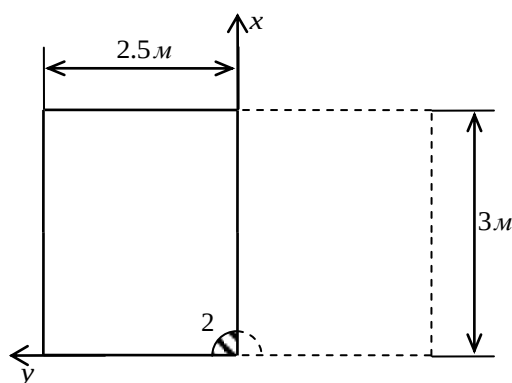
Рисунок 3.34 – Скінченоелементна модель виділеного фрагменту конструкції жорсткого дорожнього одягу

Розглянемо скінчено-елементну модель даної конструкції. Осі Ox та Oy розташовані в горизонтальній площині (верхня грань бетонної плити), початок координат знаходиться в центрі кругового відбитку колеса, вісь Oz направлена вертикально вниз. Між плитою та основою влаштовано контакт з коефіцієнтом тертя 0,5.

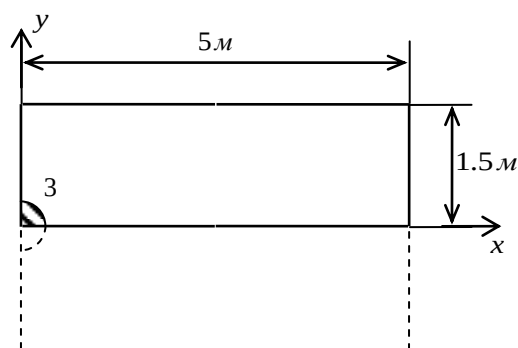
На найнижчу грань багатшарової основи що знаходиться в площині $z = \sum h_i$ накладено умову заборони переміщень. На вертикальні грані багатшарової основи накладено умові заборони преміщень у перпендикулярному до них напрямку. На найвищу горизонтальну грань основи та на нижню горизонтальну грань плити накладено умови контакту. Всі інші грані цементобетонної плити вільні від обмежень.



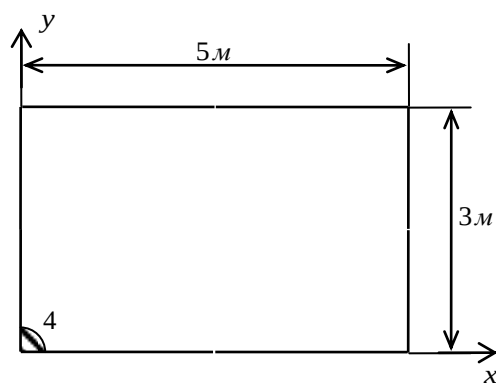
а



б



в



г

Рисунок 3.35 – Розрахункові схеми конструкції для різних варіантів транспортного навантаження

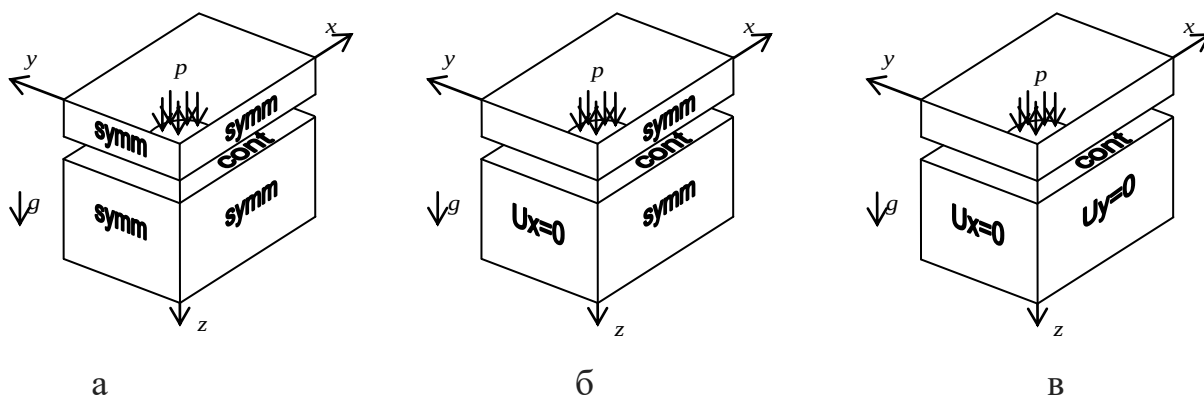


Рисунок 3.36 – Варіанти граничних умов

Оскільки для варіанту транспортного навантаження №1 має місце повздовжня та поперечна симетрії, то є можливість розгляду чверті конструкції (рис. 3.36 а), яку отримуємо в результаті відтинання частини від цілої конструкції площинами симетрії $x=0$ та $y=0$ з накладанням додаткових граничних умов симетрії на вказані площини симетрії (рис. 3.36 а).

Для варіанту транспортного навантаження №2 має місце поперечна симетрія, тому можна розглянути половину конструкції (рис. 3.36 б), яку отримаємо в результаті відтинання від цілої конструкції половини площиною симетрії з накладанням додаткової граничної умови симетрії на вказану площину симетрії (рис. 3.36 б).

Варіант транспортного навантаження № 3 має повздовжню симетрію, тому розглядається половина конструкції (рис. 3.36 в), яку отримаємо відтинанням від цілої конструкції половини площиною симетрії з накладанням додаткової граничної умови симетрії на вказану площину (рис. 3.36 б).

Варіант транспортного навантаження № 4 не має симетрії, тому розглядається повна конструкція (рис. 3.36 г). Граничні умови для цього варіанту зображені на рис. 3.36 в.

Слід зауважити, що геометрична модель конструкції є параметричною, тобто такою, що будується за певним алгоритмом, в якому приймається, що вісь Ox направлена вздовж найбільшого розміру плити або частини плити, що розглядається. Отже, напрямки Ox для варіантів транспортного

навантаження №1, 3, 4 та варіанту № 2 перпендикулярні. Результати числового моделювання наведені наведені в додатку Г .

В результаті числового моделювання отримано залежність максимальних значення складових переміщень вузлів скінченоелементної моделі конструкції в залежності від товщини для різних варіантів рис. 3.37 та залежність розтягуючих напружень вузлів скінченоелементної моделі конструкції в залежності від товщини для різних варіантів рис. 3.38.

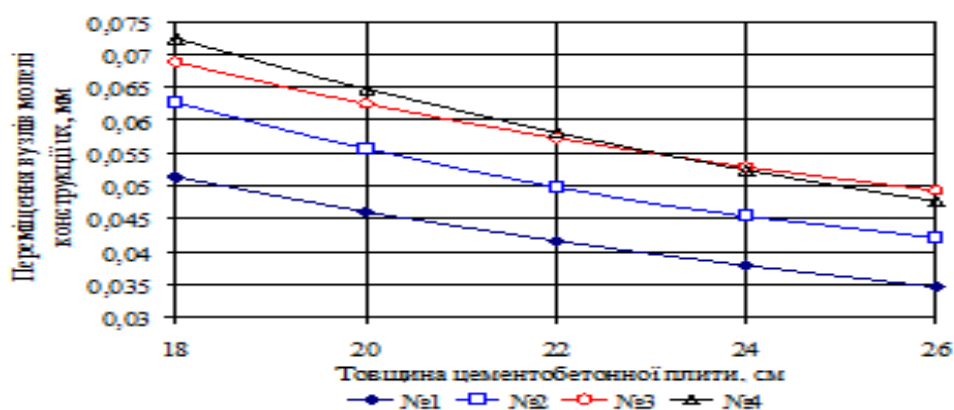


Рисунок 3.37 — Залежність максимальних значення складових переміщень вузлів скінченоелементної моделі конструкції в залежності від товщини для різних варіантів

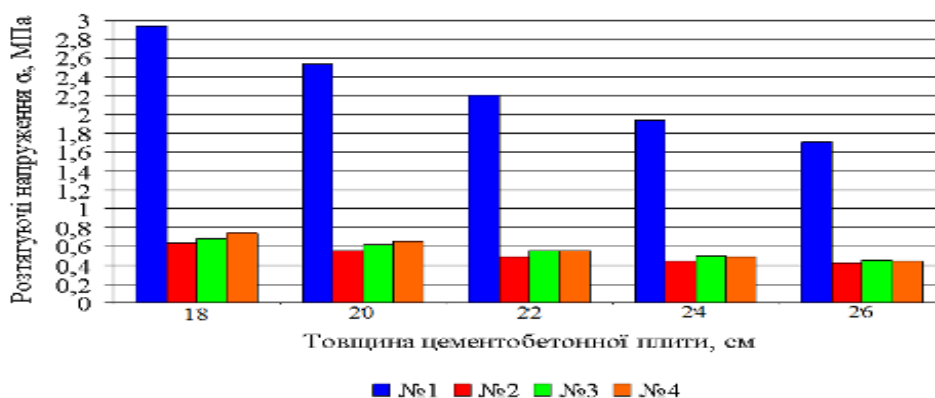


Рисунок 3.38 — Залежність розтягуючих напружень вузлів скінченоелементної моделі конструкції в залежності від товщини для різних варіантів

Згідно рис. 3.38 найбільше значення розтягуючого напруження спостерігається відбиток колеса знаходиться в центрі цементобетонної плити, тобто варіант 1.

На основі результатів числового моделювання отримано аналітичну залежність та номограму для визначення розтягуючих напружень (додаток Г) $\sigma_{cy} = \sigma_{pt}$ при згині, що виникають в цементобетонному покритті автомобільних доріг від дії навантаження [183]:

$$\sigma_{cy} = \frac{p}{p_0} \cdot (a_{cy} \cdot E + 2,2804) \cdot K_M \cdot K_{умв} \cdot K_{шт} \cdot \ln\left(\frac{h \cdot K_t}{D}\right) - (b_{cy} \cdot E + 1,0563), \quad (3.17)$$

де p - розрахунковий тиск, що приймається згідно з табл. Б ДБН В.2.3-4., МПа;

E – модуль пружності цементобетону, МПа;

h – цементобетонної плити, см; D – діаметр кола, рівновеликого за площею відбитку колеса, см;

a_{cy}, b_{cy}, p_0 – параметри рівняння ($a_{cy}=0,00003$; $b_{cy}=0,000003$; $p_0=1$ МПа).

K_M – коефіцієнт, що враховує вплив місця розташування навантаження: для неармованих покриттів $K_M = 1,5$; $K_M = 1,5$; для покриттів з крайовим армуванням або майданчиків з розташуванням смуг накату не ближче ніж 0,8 м зовнішнього поздовжнього краю покриття - $K_M = 1,0$; $K_M = 1,0$ для поздовжнього напрямку і $K_M = 1,5$ для поперечного;

$K_{умв}$ – коефіцієнт, що враховує умови роботи, рівний 0,6;

$K_{шт}$ – коефіцієнт, що враховує вплив штирьових з'єднань на умови контакту плит з основою: при наявності поперечних швах штирів $K_{шт} = 1$; $K_{шт} = 1$, при відсутності штирів $K_{шт} = 1,05$; $K_{шт} = 1,05$;

Оцінку міцності цементобетонного покриття автомобільної дороги пропонується оцінювати з урахуванням отриманої аналітичної залежності

(3.17), яка буде використана для визначення коефіцієнта міцності $K_{мц}$ в залежності від категорій. З урахуванням [172], який полягає у порівнянні розрахункової міцності цементобетону на розтяг при згині з максимальним напруженням, що виникає в цементобетонній плиті на пружній основі від дії навантаження і перепаду температур по товщині плити .

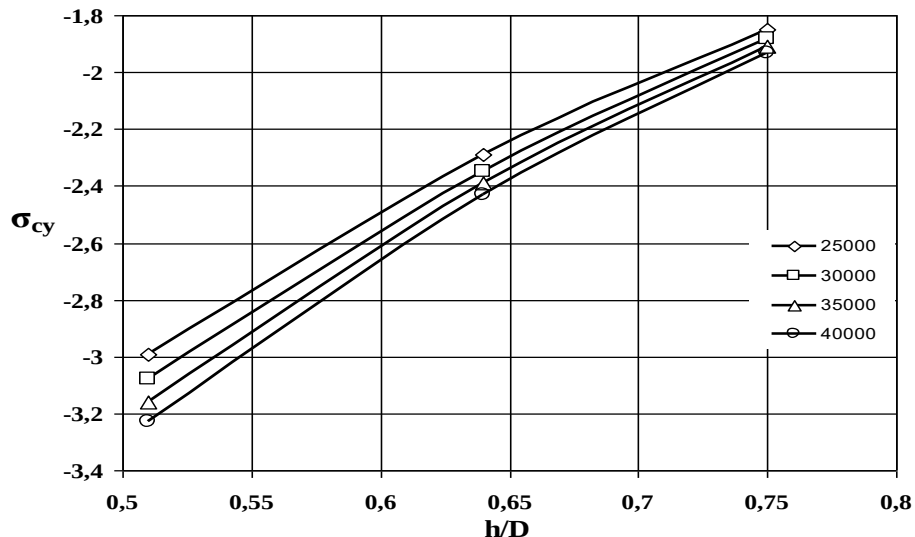


Рисунок 3.39 — Номограма для визначення розтягуючих напружень $\sigma_{су}$ при згині, що виникають в цементобетонному покритті автомобільних доріг від дії навантаження

3.5 Висноки по розділу

На основі проведених експериментальних досліджень цементобетону встановлено: розрахункові характеристики цементобетону з використанням комплексних хімічних добавок, а саме модуль пружності з урахуванням різного часу дії навантаження і температури, параметри функції довговічності; лабораторні та стендові дослідження впливу комплексної хімічної добавки на тріщиностійкість цементобетону; закономірності дії комплексної хімічної добавки на будівельно-технологічні та фізико-механічні властивості цементобетону; при моделюванні максимальних розтягуючих напружень в цементобетонному покритті автомобільних доріг від дії пневматичних коліс транспортного засобу.

При експериментальному моделюванні отримано регресійну залежність прогнозування оптимального складу цементобетону в залежності від різної кількості комплексної хімічної добавки та витрати цементу, що дозволяє направлено регулювати властивості бетону за показниками: водоцементне співвідношення, осадка конуса, міцності при стиску, модуля пружності, міцності на розтяг при згині.

Експериментально визначено розрахункові параметри, а саме: міцність на розтяг при згині, статичний та динамічний модуль пружності при різній температурі; параметри функції довговічності. Це необхідно для здійснення розрахунків довговічності цементобетонного покриття при проектуванні.

При витраті цементу 350 кг/м^3 і вмісті 1,1 % комплексної хімічної добавки від маси цементу отриманий дорожній високоміцний цементобетон B50 B_{btb}5,2P1F200. Бетонна суміш з комплексними добавками Д1, Д2, Д3 характеризується збереженням рухливості в часі не менше 2 годин і вмістом залученого повітря 4% — 6% для забезпечення необхідної морозостійкості. За результатами випробування на стиск зразків кубів з різними комплексними добавками видно, що зразки з комплексною добавкою Д3 на першу добу тверднення мають більшу ранню міцність: на 12 % в порівнянні з добавкою Д1 і на 20 % в порівнянні з добавкою Д2. Надалі значення міцності на стиск для Д1 і Д2 досить близькі, а для Д3 на 4 % більше, ніж для Д1 і Д2. За результатами випробування на стиск призм, зразки з комплексною добавкою Д3, Д1 мають близькі значення міцності: 58,21 МПа, 56,06 МПа, відповідно, а з добавкою Д2 — 50,86 МПа. Результати випробування зразків-циліндрів на розтягування при розколюванні показують, що найбільше значення мають зразки з добавкою Д3 — 4,28 МПа і з добавкою Д2 — 4,22 МПа. За результатами випробування на розтяг при згині, найбільшу міцність мають зразки з комплексною добавкою Д3 — 6,53 МПа і на 9,7 % і 8,3 %, відповідно, менше зразки з добавками Д1 і Д2.

Результатами проведених експериментальних досліджень доведено, що за рахунок застосування комплексної хімічної добавки дозволяє направлено

впливати на технологічні властивості цементобетонної суміші та структуру цементобетону, що підтверджується збільшенням міцності на 25 – 30 % (при вмісті повітря в цементобетонній суміші 5 – 6 %) у порівнянні із контрольним складом, підвищення морозостійкості цементобетону на марку, збільшення водонепроникливості в 3 рази, зменшення стирання на 40 % у порівнянні із контрольним складом.

При числовому моделюванні вперше отримано аналітичну залежність для визначення розтягуючих напружень при згині, що виникають в цементобетонному покритті автомобільних доріг від дії навантаження з урахуванням різних розрахункових параметрів, а саме: модуля пружності (E), товщини плити (h), розрахункового тиску (p), діаметру кола, рівновеликого за площею відбитку колеса (D), що дозволяє уточнити загальний вираз умови міцності при розрахунку цементобетонного покриття.

Удосконалено умову граничного стану цементобетонного покриття за міцністю на розтяг при згині за рахунок статичного та динамічного модуля пружності та коефіцієнта морозостійкості. Це дає можливість удосконалити і підвищити точність, достовірність розрахунку та забезпечити довговічність покриття автомобільних доріг.

В результаті виконаного числового моделювання напружено–деформованого стану цементобетонного покриття отримано номограму для визначення розтягуючих напружень σ_{cy} при згині, що виникають у цементобетонному покритті автомобільних доріг від дії навантаження. Це дозволить проєктувати підвищеної довговічності цементобетонного покриття із заданими розрахунковими параметрами.

Основні результати досліджень третього розділу висвітлено в роботах автора [176-195].

РОЗДІЛ 4

ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ТА МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ЦЕМЕНТОБЕТОННОГО ПОКРИТТЯ НА АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРОГАХ ПІДВИЩЕНОЇ ДОВГОВІЧНОСТІ

Загальні положення

Багаторічні спостереження за експлуатацією цементобетонних покриттів автомобільних доріг, а також аналіз зарубіжного досвіду дозволяє об'єктивно оцінити недоліки покриттів даного типу, головними з яких є тріщиноутворення в результаті усадки, коливання температури добової та річної, перемінного заморожування-відтавання води в порах і ушкоджених місцях, динамічного навантаження від коліс транспортних засобів, лушення, руйнування кромek деформаційних швів цементобетонного покриття та його здіблення. Утворення тріщин в цементобетонному покритті порушують цілісність та монолітність дорожньої конструкції, розділяючи її на окремі, не пов'язані між собою блоки, кількість і протяжність утворених тріщин, що утворилися на покритті, майже не впливають на рух автомобілів до тих пір, поки не утворилися вибоїни та викришування, що призводить до погіршення рівності покриття, зниження рівня безпеки руху та створення аварійно-небезпечних ситуацій [97, 103, 107]. Як наслідок, збільшуються витрати на утримання та ремонт цементобетонного покриття автомобільних доріг, які зазнають передчасних руйнувань [3 — 18].

При вирішенні проблеми підвищення довговічності цементобетону враховують взаємозв'язок властивостей сировинних матеріалів, складу цементобетонної суміші, структури і властивостей цементобетону, технологічних чинників, експлуатаційних і природньо-кліматичних факторів [26].

Тому результати наукових досліджень є вирішення актуального питання підвищення довговічності цементобетонного покриття, яка вирішується практичними заходами.

Аналіз результатів досліджень та існуючих способів підвищення довговічності цементобетонного покриття автомобільних доріг дозволяє виділити найбільш ефективні заходи, які впливають на довговічність цементобетонного покриття можна розділити на три основні групи [26,182]:

— рецептурно-структурні — з направленою регулювання властивостей цементобетону, який передбачає застосування підходів що підвищують довговічність покриття з позиції тріщиностійкості;

— конструктивні — з направлення регулювання характеристик цементобетонного покриття пов'язані з попереднім конструюванням дорожнього одягу з цементобетонними шарами на автомобільних дорогах з наступним виконанням розрахунків для конкретних вихідних умов за чинними нормативними документами;

— технологічні — способи з регулювання характеристик цементобетонного покриття направлені на підвищення вимог до технологічних операцій з виготовлення, транспортування, укладання та ущільнення цементобетонного сумішей при будівництві цементобетонних покриттів.

4.1 Рецептурно – структурні заходи підвищення довговічності цементобетонного покриття автомобільних доріг

Вимоги до сировинних матеріалів цементобетону для покриття автомобільних доріг повинні відповідати [166].

Вимоги до комплексних хімічних добавок

Для одержання цементних бетонів для покриття автомобільних доріг з підвищеною міцністю, морозостійкістю, водонепроникливістю, корозійною стійкістю найбільш ефективно застосовувати не окрему хімічну добавку, а

спеціально підібраний комплекс добавок поліфункціональної дії в залежності від призначення цементобетону і вимог до нього [182, 183, 187].

До складу комплексної хімічної добавки повинен входити ефективний суперпластифікатор, а також можуть входити добавки, які впливають на кінетику твердіння, повітрявтягуючі добавки (аеранти) і тонкодисперсні мінеральні наповнювачі [182, 183, 187]. Правильно поєднуючи типи і кількісні співвідношення добавок можна направлено регулювати структуру та фізико-механічні властивості цементного каменю і цементобетону [182, 183].

Структура, в'язкість хімічної добавки і правильний підбір склад цементобетонної суміші дають змогу розподілити повітря в розчинній частині цементобетонної суміші і зводить до мінімуму розподіл повітря біля крупного заповнювача, тобто зменшується структура дефектів [178, 182, 183]. Зменшення структури дефектів призводить до збільшення міцності на розтяг при згині, морозостійкості і водонепроникливості, зменшення капілярної пористості $\leq 1,5 \%$. [183, 199]. Це дає можливість зменшити кількість повітря при застосуванні повітрявтягуючих добавок до 4,0 – 4,5 % або газоутворюючих від 2,8 % до 3,5 % при морозостійкості F300 [183, 199].

Отримання дорожніх цементобетонів класів В40 і вище забезпечується при застосуванні вітчизняних матеріалів, за рахунок зниження В/Ц до величини 0,28 — 0,35 і використанні комплексних хімічних добавок (повітрявтягуючих і пластифікуючих) [182, 183, 187].

Для приготування цементобетонних сумішей слід використовувати хімічні добавки згідно з ДСТУ Б В.2.7-43, ДСТУ-Н Б В.2.7-175, ДСТУ Б В.2.7-171, та мінеральні добавки згідно з ДСТУ Б В.2.7-128. Оптимальний вміст хімічних добавок повинен бути визначений при підборі складу цементобетонної суміші з урахуванням властивостей конкретних матеріалів і прийнятої технології проведення робіт та забезпечення необхідних властивостей суміші на місці бетонування. Рекомендується використовувати добавки типу «ШАГ», що є сумішшю (комплексами) органічних та

неорганічних речовин [154]. Характеристика таких добавок наведена в таблиці 4.2.

Основні фізико-технічні показники та характеристики наведено в таблиці 4.1,4.2.

Таблиця 4.1 — Основні фізико-технічні показники та характеристики хімічних добавок [154]

№ ч/ч	Назва показника ефективності добавки	Значення показника ефективності дії добавки	
		ШАГ ПА SP-1М	ШАГ ПА SR-3М
1	2	3	4
1	Пластифікуючий ефект:		
1.1	збільшення рухомості:		
	- бетонної суміші	від P1 до P5	від P1 до P5
	- розчинової суміші	від П4 до П14	від П4 до П14
1.2	Збереженість рухомості бетонної або розчинової суміші, хв., не менше	30	30
1.3	Міцність на стиск бетону або розчину у віці 28 діб	міцність основного складу ≥ 90 % міцності контрольного	міцність основного складу ≥ 90 % міцності контрольного
1.4	Вміст повітря в бетонній /розчинової суміші	Вміст повітря в основній суміші не більше ніж на 2 % (за об'ємом) перевищує цей показник у контрольній суміші	Вміст повітря в основній суміші не більше ніж на 2 % (за об'ємом) перевищує цей показник у контрольній суміші
2.	Водоредукуючий ефект:		
2.1	зниження витрати води в основній бетонній або розчинової суміші у порівнянні з контрольною сумішшю, %	понад 30	понад 25
2.2	Міцність на стиск бетону або розчину основного складу		
	- за одну добу:	більше або дорівнює 140 % контрольного складу	більше або дорівнює 140 % контрольного складу
	- за 3 доби	більше або дорівнює 127 % контрольного складу	більше або дорівнює 120 % контрольного складу
	- за 28 діб	більше або дорівнює 115 % контрольного складу	більше або дорівнює 115 % контрольного складу
2.3	Підвищення марки бетону за водонепроникністю основного складу у порівнянні з контрольним складом	На 2 ступеня і більше	На 2 ступеня і більше
3	Гідрофобізуючий ефект	несуттєвий	-
4	Водоутримувальний (стабілізуючий) ефект		
4.1	Відділення води або цементного молока	Основна суміш менше або дорівнює 50 % контр. суміші	Основна суміш менше або дорівнює 50 % контр. суміші

Кінець таблиці 4.1.

4.2	Розчинівідділення, %, не більше	Основна суміш менше або дорівнює 50 % контр. суміші	Основна суміш менше або дорівнює 50 % контр. суміші
5	Прискорення тверднення: міцність на стиск бетону/розчину	За 1 добу при 20 °С: міцність основного складу вище або дорівнює 125 % міцності контрольного складу. За 28 діб: міцність основного складу вище або дорівнює 90 % міцності контрольного складу.	За 1 добу при 20 °С: міцність основного складу вище або дорівнює 110 % міцності контрольного складу. За 28 діб: міцність основного складу вище або дорівнює 90 % міцності контрольного складу.

Таблиця 4.2 — Характеристика хімічних добавок [154]

№ ч/ч	Назва показника	Значення показника для добавки типу	
		ШАГ ПА SP-1М	ШАГ ПА SR-3М
1	2	3	4
1	Однорідність	однорідна рідина без сторонніх включень, допустимий осад	однорідна рідина без сторонніх включень, допустимий осад
2	Колір	від світло-коричневого до темно-коричневого	від світло-коричневого до темно-коричневого
3	Запах	слабо-виражений (поліакрилата)	слабо-виражений (поліакрилата)
4	Ефективний компонент	поліакрилат	поліакрилат
5	Відносна густина	1,09±0,05	1,1±0,05
6	Вміст сухої речовини, % за масою	32,0±0,5	27,0±0,5
7	Водневий показник, рН	7±1,0	7±1,0
8	Розчинний у воді хлорид (Cl ⁻), % за масою	не вище 0,1	не вище 0,1
9	Вміст лугу (Na ₂ O еквівалент), % за масою	не вище 2,0	не вище 2,0

Для виготовлення хімічних добавок слід використовувати сировинні матеріали, які наведені у таблиці 4.3 за наявності документа про якість і санітарно-гігієнічного висновку [154].

Хімічні добавки при застосуванні з дотриманням усіх вимог щодо використання не повинні спричиняти до утворення висолів на поверхні бетон у [153].

Добавки при застосуванні не повинні спричиняти корозійної дії на арматуру (попередньо напружену та ненапружену) залізобетону та цементобетон за умови дотримання всіх вимог щодо їх використання.

При виборі хімічної добавки слід обов'язково перевіряти її на сумісність з портландцементом .

Таблиця 4.3 — Сировинний склад хімічних добавок [154]

Назва матеріалу	Показник матеріалу
1	2
DYNAMON SR3 (SR345)	Водний розчин акрилових полімерів 30% концентрації, не містить формальдегідів
DYNAMON SR2	Водний розчин акрилових полімерів 24,5% концентрації, не містить формальдегідів
MAPETARD	17,4 % водний розчин модифікованих фосфатів
DYNAMON EASY11	Водний розчин акрилових полімерів 15% концентрації
MAPEPLAST N10	Лігносульфонат
MAPEAIR ZERO	Піногасник – добавка на основі модифікованих полісилоксанів
Mapect CF-L	Прискорювач твердіння, протиморозна добавка, не містить хлоридів
DYNAMON SP-1 (DYNAMON NRG 1010, DYNAMON SP3)	Водний розчин акрилових полімерів 30% концентрації, не містить формальдегідів
IDROCRETE DM	Гідрофобізатор, водовідштовхувальна добавка згідно з [22]

Вміст шкідливих речовин (іонів сульфатів і тіосульфатів) в добавках, які можуть негативно впливати на якість і довговічність будівельних розчинів, цементобетонів і арматури, не повинен перевищувати 4 % .

Вміст шкідливих речовин (полісахаридів, сірки) в лігносульфонатах не повинен перевищувати 25 % від нормованих значень відповідно до документів про якість постачальників сировинних матеріалів–технічних лігносульфонатів .

Вміст в хімічних добавках іонів хлору (Cl^-) не повинен перевищувати 350 мг/л у перерахунку на воду для бетонів відповідно до ДСТУ Б В.2.7-273.

Хімічні добавки не повинні містити формальдегід .

Ефективність застосування добавок повинна відповідати критеріями ефективності, наведеним у 4.1.3 ДСТУ Б В.2.7-171 та визначатись згідно з методиками ДСТУ Б В.2.7-69 і ДСТУ Б В.2.7-171 .

Добавки нетоксичні і не утворюють токсичних сполук, при нормальних температурах не виділяють шкідливих продуктів, небезпечних для організму людини. Згідно з ГОСТ 12.1.005 добавки відносяться до речовин IV класу небезпеки (речовини малонебезпечні)

В результаті проведених досліджень (розділ 3), встановлено що застосування розробленої комплексної хімічної добавки поліфункціональної дії ШАГ направлено впливає на процеси гідрато- і структуроутворення цементного каменю і цементобетону, що обумовлює збереження первинно сформованої структури, покращує технологічні властивості цементобетонної суміші, сприяє зменшенню процесів тріщиноутворення і підвищення довговічності дорожнього цементобетону.

Оцінювання відповідності компонентів цементобетонної суміші заданим вимогам

Дозування компонентів цементобетонної суміші повинно виконуватись відповідно до затверджених інструкцій, розміщених на видному місці біля змішувального обладнання, в яких докладно подано дані щодо виду і кількості кожного компонента згідно ДСТУ Б В.2.7-176.

Відхили у дозуванні компонентів цементобетонної суміші, що допускаються, не повинні перевищувати меж, наведених у таблиці 4.4 для будь-яких кількостей бетонної суміші від 1 м³ і більше згідно ДСТУ Б В.2.7-176.

Таблиця 4.4 — Допустимі відхили (похибка) при дозуванні компонентів цементобетонної суміші

Компоненти бетонної суміші	Допустимий відхил від необхідної кількості, мас. %
Цемент	±1
Вода	
Робочий розчин рідкої хімічної добавки	
Заповнювач	±2
Примітка. Допустимий відхил – це різниця між заданим і вимірним значеннями.	

Цементи, заповнювачі, сухі порошкоподібні мінеральні добавки

необхідно дозувати за масою. Допускається використання інших методів за умов досягнення допустимих відхилів, що підтверджується документально.

Воду замішування, робочий розчин рідкої хімічної добавки можна дозувати як за масою, так і за об'ємом.

Вимоги до суміші цементнобетонної і цементобетону заданої якості, згідно ДСТУ Б В.2.7-176.

Основні вимоги:

а) відповідність вимогам ДБН В.2.3-4, ГБН В.2.3-37641918-557, ДСТУ Б В.2.7-43;

б) клас міцності на згин, клас міцності на стиск;

в) клас впливу середовища експлуатації;

г) максимальний розмір зерен заповнювача;

д) клас вмісту хлоридів;

е) морозостійкість в агресивному середовищі;

є) вимоги до температури бетонної суміші

ж) наростання міцності бетону;

з) опір водопроникненню;

и) опір стиранню;

і) міцність при розколюванні;

Вимоги до суміші цементнобетонної і цементобетону заданого складу, згідно ДСТУ Б В.2.7-176.

Основні вимоги:

а) відповідність вимогам ДБН В.2.3-4, ГБН В.2.3-37641918-557, ДСТУ Б В.2.7-43;

б) вміст цементу;

в) вид, марка цементу і клас міцності;

г) водоцементне відношення або консистенція (клас або задане значення).

д) інші технічні вимоги.

Дії у випадку невідповідності продукції

У випадку невідповідності продукції виробник повинен виконати дії, згідно ДСТУ Б В.2.7-176:

- перевірити результати випробувань і за виявлення помилок вжити заходів для їх усунення;
- якщо невідповідність буде підтверджено в результаті повторних випробувань, провести коригувальні дії, включаючи перегляд відповідних методів управління виробництвом;
- якщо підтверджена невідповідність вимогам, що не була очевидною на момент поставки замовнику, необхідно попередити про це замовника і споживача, щоб уникнути можливих збитків;
- зареєструвати дії за зазначеними вище пунктами.

Рекомендації з підвищення якості гранулометричного складу цементобетонної суміші

Підвищення якості гранулометричного складу цементобетонної суміші проводиться згідно ДСТУ Б В.2.7-176.

Кожний заміс цементобетону заданого складу необхідно оцінювати на відповідність щодо вмісту цементу, максимального розміру зерен заповнювачів, водоцементного відношення, кількості добавок. Кількість цементу, хімічних і мінеральних добавок, розміри зерен заповнювача, зареєстровані у виробничій документації або у роздруківці з реєстратора числа замісів, повинні бути у межах допустимих відхилів, а відхил водоцементного відношення повинен бути у межах $\pm 0,04$ від зазначеного показника. Щодо готового складу цементобетону виробника у відповідному реєстрі виробника мають наводитись допустимі межі відхилів.

При оцінюванні відповідності складу цементобетону за допомогою аналізу проб свіжовиготовленої цементобетонної суміші методи перевіряння й інтервали значень відповідності мають бути погоджені між споживачем і виробником завчасно з урахуванням наведених вище інтервалів і значень

точності методів випробувань.

Стосовно марки цементу і класу міцності, типів заповнювачів, типу хімічної чи мінеральної добавки, якщо такі використовуються, джерел компонентів цементобетону відповідність необхідно оцінювати шляхом порівняння виробничих записів і документів на поставку компонентів цементобетону з визначеними вимогами. Технічні вимоги до властивостей або складу цементобетонної суміші і цементобетону, які надаються виробникові замовником як завдання, мають гарантовано містити повний комплект вимог, що відповідають положенням цього стандарту, виконання яких забезпечує можливість транспортування, подавання, укладання, ущільнення, витримування, подальше оброблення, а також, за необхідності, мають включати спеціальні вимоги.

Технічні вимоги розробляються і надаються:

- стосовно суміші цементобетонної і цементобетону заданої якості ;
- стосовно суміші цементобетонної і цементобетону заданого складу.

Основою для визначення складу цементобетонної суміші і цементобетону повинні бути результати попередніх випробувань або результати довгострокового досвіду роботи з аналогічним цементобетоном з урахуванням вимог до компонентів і складів цементобетонної суміші і цементобетону.

Відповідальність замовника і виробника:

а) щодо повноти комплексу вимог, доведених виробникові, виконання яких забезпечує одержання цементобетонної суміші і цементобетону з необхідними властивостями, несе замовник;

- щодо виготовлення суміші цементобетонної і цементобетону з цими властивостями несе виробник;

б) щодо цементобетонної суміші і цементобетону заданого складу, то:

- стосовно відповідності вимог до них основним положенням цієї методики, можливості досягнення передбачених властивостей суміші цементобетонної і цементобетону при заданому складі відповідальність несе

замовник;

- стосовно виготовлення цементобетонної суміші із заданим складом відповідальність несе виробник;

в) щодо властивостей суміші цементобетонної готового складу виробника і технічних характеристик бетону з такої суміші відповідальність несе виробник.

Виробник повинен накопичувати і поновлювати базу даних щодо складів і властивостей цементобетонних сумішей і цементобетонів.

У разі застосування нового складу цементобетонної суміші необхідно виконувати попередні випробування для отримання цементобетону із заданими властивостями. Проектування цементобетону необхідно поновлювати, якщо є зміни стосовно компонентів суміші.

Вимоги до цементобетонної суміші та цементобетону для покриття автомобільних доріг

Цементобетонна суміш повинна мати підібраний зерновий склад, достатню легкоукладальність, які забезпечують одержання рівної і замкненої поверхні покриття при заданій рухомості [166]. Суміш не повинна розшаровуватись під час транспортування і при розподіленні по основі [166].

Рухомість цементобетонної суміші залежить від обраного устаткування для її приготування, комплекту бетоноукладального обладнання та обраної технології транспортування, укладання і ущільнення [166]. Марка за рухомістю цементобетонної суміші повинна відповідати вимогам ДСТУ Б В.2.7-96 та таблиці 4.5. При використанні віброущільнення, цементобетонні суміші повинні мати рухомість на місці укладання (ОК) від 1 см до 4 см. [166].

Для забезпечення необхідної морозостійкості цементобетону для покриття автомобільних доріг необхідно, щоб водоцементне відношення становило менше 0,5 і вміст залученого повітря в межах 5 — 6 % [173].

Цементобетони для покриття автомобільних доріг в залежності від категорії та дорожньо – кліматичного районування, повинні відповідати вимогам до фізико-механічних властивостей згідно [166,173].

Таблиця 4.5 — Легкоукладальність бетонних сумішей [173].

Машини і обладнання для ущільнення бетонної суміші в покритті (основі)	Легкоукладальність
	Рухомість, см
Бетоноукладач зі стаціонарною опалубкою	Від 1 до 3 включно
Бетоноукладач з ковзною опалубкою при швидкості руху, м/хв:	
- до 2,0;	Від 1 до 3 включно
- понад 2,0 до 2,5 включно;	Від 2 до 4 включно
- понад 2,5 до 3,0 включно	Від 3 до 5 включно
Вібратор та віброрейки	Від 3 до 5 включно

Для підвищення довговічності цементобетонного покриття автомобільних доріг доцільно застосувати ефективні комплекси суперпластифікаторів з повітрявтягуючими та/або газовиділяючими добавками з водоредукуючим ефектом більше 25 %, збереження дотриманості властивостей цементобетонної суміші не менше ніж 120 хвилин при збереженні кількості залученого повітря згідно з [176, 177, 184, 187].

Вимоги до цементобетону покриття автомобільних доріг для конкретного об'єкту встановлюються проектом відповідно до вимог ДБН В 2.3-4, ДСТУ БВ.2.7-43, а також згідно з ДСТУ Б В.2.7-176 в залежності від призначення та умов роботи. Морозостійкість цементобетону покриття автомобільних доріг повинна бути не менше марки F 200 або XF4 відповідно до європейських норм EN 197-1:2000, водонепроникливості $W \geq 8$ [166]. Марка по показнику стирання цементобетону для покриття автомобільних доріг повинна бути не більше 0,7 [166]. В табл.4.6 наведено використання цементобетонів із вмістом комплексних хімічних добавок в залежності від кількості хімічної добавки, категорії автомобільної дороги.

Таблиця 4.6 — Використання цементобетонних сумішей та цементобетону для покриття автомобільних доріг в залежності від категорії дороги і витрати комплексної хімічної добавки [154]

Найменування сировинних матеріалів	Категорія дороги (клас цементобетону)		
	I а,б B50B _{bth} 5,2P1F200 W10	II B40B _{bth} 4,8P1F200 W10	III B35B _{bth} 4,4P1F200 W8
Цемент, кг/м ³	350	350	340
Найменування цементу	ПЦІ ПЦ 550 – ДО – Н ПЦ 500 – ДО – Н	ПЦ 500 – ДО – Н ПЦ 400 – ДО – Н	ПЦ 400 – ДО – Н ПЦ II/A – III
Щебінь, фр.5-10, кг/м ³	347	347	347
Щебінь, фр.10-20, кг/м ³	806	806	806
Пісок, кг/м ³	750	750	760
Хімічна добавка	1,1	1,0	1,0
Вода	133	137	145
В/Ц	0,39	0,4	0,45
Рухомість суміші	P1	P1	P1

Проектування складу високоміцного цементобетону для покриття автомобільних доріг

Проектування складу високоміцного цементобетону для покриття автомобільних доріг виконується у відповідності із [175,184,185].

При підборі складу високоміцного цементобетону при однаковій марці цементу М500 вирішальне значення має марка цементу на розтяг при згині R_u^u ($R_u^u \geq 6,0$ МПа).

При проектуванні складу цементобетону потрібно враховувати, що високоміцні дорожні цементобетони можуть бути одержані за рахунок підвищення міцності цементного каменя .

Для отримання високоміцного дорожнього цементобетону необхідно [26 — 28, 196, 197]:

— здійснити підбір оптимального складу цементобетонної суміші;

— застосування високоактивних (на розтяг при згині $R_u^u \geq 6,0$ МПа) цементів;

— шляхом підбору і ефективності хімічної добавки досягати зменшення водоцементного співвідношення;

— шляхом підбору і ефективності хімічної добавки досягати зменшення капілярної пористості до 1,5 %.

Методика проектування складу високоміцних дорожніх цементобетонів, що застосовується в дослідженнях дозволяє отримати цементобетони із міцністю, яка в 1,5 — 2 рази більше активності цементу [26 — 28, 196, 197]. Згідно даної методики, витрата крупного заповнювача визначається із розрахунку утворення неперервно жорсткого каркасу із оптимальним розміщенням зерен щебня, що дозволяє збільшити міцність цементобетону на 15 — 20 % .

Основні відмінності від традиційної методики проектування складу цементобетону полягають:

1. При визначенні кількості води після визначення кількості щебеню, нами запропоновано застосовувати формулу А.А. Саканделідзе [175]:

$$B = \frac{K_{н.г.} \cdot Ц \cdot H_{г.} + B_n \cdot \gamma^n (V_p - Ц / \gamma^u) + B_{щ.}}{1 + 0,001 B_{п.} \cdot \gamma^n}, \quad (4.1)$$

де: $Ц$ — кількість цементу, кг;

$H_{г.}$ — нормальна густота цементного тіста;

B_n — водопотреба піску, л (визначаються по методу Баженова при складі цементно-піщаного розчину $Ц:П = 1:1$);

γ^n — дійсна щільність піску, кг/м³;

$K_{н.г.}$ — експериментальний коефіцієнт.

Потреба води на змочування поверхні зерен щебеню визначається як:

$$B_{щ.} = 0,008 \cdot Ш_{5-10} + 0,005 \cdot Ш_{10-20} + 0,003 \cdot Ш_{20-40}, \quad (4.2)$$

де: $Щ_{5-10}$, $Щ_{10-20}$, $Щ_{20-40}$ — вагова витрата щебеню відповідно фр. 5-10 мм, фр. 10-20 мм, фр. 20-40 мм на 1 м^3 віброущільненого бетону, кг

2. При застосуванні хімічної добавки вміст води [176-195]:

$$B = \frac{K_{н.г.} \cdot k_{\delta}^2 \cdot Ц \cdot H_{г} + B_{н} \cdot \gamma^n (V_p^1 - Ц / \gamma^n) + B_{ц}}{1 + 0,001 B_{п} \cdot \gamma^n}, \quad (4.3)$$

де: $k_{\delta} = \frac{H_{г}^1}{H_{г}}$ — коефіцієнт ефективності застосування комплексної хімічної добавки;

$H_{г}^1$ — нормальна густота цементного тіста із застосуванням хімічної добавки;

$H_{г}$ — нормальна густота цементного тіста.

3. Запропоновано обчислювати кількість води за аналітичною залежністю :

$$B = B_{\delta} + \frac{B_{\delta}}{\gamma_{\delta}} - B_{ц}, \quad (4.4)$$

де: γ_{δ} — щільність хімічної добавки, кг/м^3 ;

$B_{ц}$ — потреба води на змочування поверхні зерен щебеню, визначається по формулі;

B_{δ} — вміст хімічної добавки у рідкому стані, л;

B — вміст води, л.

4.2 Конструктивні заходи підвищення довговічності цементобетонного покриття автомобільних доріг

Суть методики полягає в послідовності алгоритму оцінювання довговічності цементобетонного покриття на автомобільних дорогах з урахуванням спільного впливу усадки цементобетону, зміни температури та дії пневматичних коліс транспортних засобів, що дозволяє проектувати

цементобетонне покриття підвищеної довговічності із заданим строком служби.

Розрахунок довговічності цементобетонного покриття з використанням комплексних хімічних добавок на автомобільних дорогах в залежності від категорії дороги, з урахуванням спільного впливу зміни температури, усадки та дії пневматичних коліс транспортних засобів базується на аналітичних рішеннях, які отримані в другому розділі (2.9, 2.20, 2.21, 2.40, 2.50, 2.51).

Розрахунок цементобетонного покриття на автомобільних дорогах згідно рисунку 2.1 слід виконувати у такій послідовності:

1. Встановлюємо вихідні дані цементобетонного покриття, що проектується згідно проекту, та експериментально визначаємо розрахункові характеристики та термомеханічні параметри цементобетону. Призначається матеріал для шарів основи, а також категорія автомобільної дороги та інтенсивність.

2. Призначаємо клас цементобетонного покриття з використанням комплексних добавок та (або) базальтової фібри, і експериментально встановлюємо його розрахункові та термомеханічні характеристики (модуль пружності, який залежить від часу дії навантаження та температури, міцність на розтяг при згині, клас бетону, функцію температурно-часового зміщення, параметри функції довговічності).

3. Призначаємо крок (Δh) збільшення товщини в цементобетонному покритті.

4. Призначаємо крок (Δd_i) та (або) (Δf_i) та (або) в комплексі збільшення кількості комплексної добавки (D_1 , D_2 , D_3) та (або) базальтової фібри та (або) в комплексі в бетон.

5. Призначаємо крок (Δp_i) збільшення розрахункового питомого тиску пневматичного колеса на цементобетонне покриття в залежності від категорії автомобільної дороги.

6. Згідно аналітичних залежностей, отриманих у розділі 2, визначаємо розтягуюче напруження від дії пневматичних коліс транспортного засобу, що

виникають в цементобетонному покритті на автомобільній дорозі, при мінімальній товщині покриття та мінімальній кількості комплексної добавки та базальтової фібри.

7. Згідно аналітичних залежностей, отриманих у розділі 2, визначаємо температурних напружень в цементобетонному покритті від спільного впливу річних і добових температур при мінімальній товщині покриття та мінімальній кількості комплексної добавки та базальтової фібри.

8. Згідно аналітичних залежностей, отриманих у розділі 2, напружень, які виникають від усадки в цементобетонному покритті при тужавінні на різній глибині і в будь-який момент часу догляду за цим шаром, при мінімальній товщині покриття та мінімальній кількості комплексної добавки та базальтової фібри.

9. На основі встановлених розтягуючих напружень від дії пневматичних коліс транспортних засобів та параметрів функції довговічності визначаємо міру пошкодження $M_{Tp}(t)$ цементобетонного покриття на автомобільній дорозі.

10. На основі встановлених температурних напружень та параметрів функції довговічності, визначаємо міру пошкодження M_{Tem} цементобетонного покриття на автомобільній дорозі.

11. На основі встановлених напружень від усадки в цементобетоні та параметрів функції довговічності, визначаємо міру пошкодження $M_{усад}(t, y, W)$ цементобетонного покриття на автомобільній дорозі.

12. На основі визначення сумарної міри пошкодження від спільної дії усадки бетону, зміни добових і річних температур та дії пневматичних коліс транспорту, визначаємо розрахунковий $T_{роз}$ строк служби цементобетонного покриття на автомобільній дорозі відповідної технічної категорії.

13. Якщо виконується нерівність $M_{п}(t, T(y, t), W) < [M_{уб}]$, $T_{роз} > [T_H]$, то можна вважати, що запроектована конструкція цементобетонного покриття на автомобільній дорозі відповідної технічної категорії відповідає заданому

строку служби. Якщо в разі не виконання умови, $M_{II}(t, T(y, t), W) > [M_{цб}]$, $T_{PO3} < [T_H]$, то потрібно збільшити товщину покриття та / або кількість комплексної хімічної добавки та / або базальтову фібру і провести відповідні розрахунки починаючи з пункту 3 та 4.

14. Також, при невиконанні умови забезпечення строку служби покриття на автомобільній дорозі відповідної технічної категорії (п. 10) можливе призначення іншого класу цементобетону. Необхідно знову встановити його розрахункові характеристики та параметри довговічності і провести послідовно аналогічні розрахунки починаючи з п. 2.

15. При забезпеченні умови строку служби для даного цементобетонного покриття, підбирають ще 2 — 3 склади цементобетону, що найкраще зарекомендували себе для о автомобільної дороги і виконують відповідні розрахунки (починаючи з п. 2) для забезпечення умови п. 9.

13. Таким чином, запроектувавши декілька варіантів конструкцій цементобетонного покриття на автомобільній дорозі, визначають більш оптимальний із розрахованих з урахуванням техніко-економічного обґрунтування.

В таблиці 4.7 наведено розрахункові параметри довговічності цементобетону в залежності від категорії автомобільної дороги

Таблиця 4.7 — Розрахункові параметри довговічності цементобетону дорожнього покриття

Призначення шару	Категорія дороги	Тип дорожнього одягу	Клас бетону за міцністю на розтяг при згині $B_{\text{кр}}$	Параметри функції довговічності		
				$\lg B_{\text{кр}}, c \cdot \text{МПа}$	$b_{\text{кр}}$	$m = 1/b_{\text{кр}}$
Монолітне одношарове та (або) верхній шар двохшарового покриття	I-a	Капітальний	6,4/80	41,67	27,89	0,036
			6,0/75	31,66	24,19	0,041
			5,6/70	21,76	21,03	0,048
			5,2/65	18,76	19,54	0,051
	I-b		4,8/60	18,13	18,86	0,053
			4,4/55	17,49	18,18	0,055
	II		4,0/50	16,414	17,97	0,056
	III		3,6/45	15,109	17,54	0,057
	IV		3,2/40	12,920	15,87	0,063

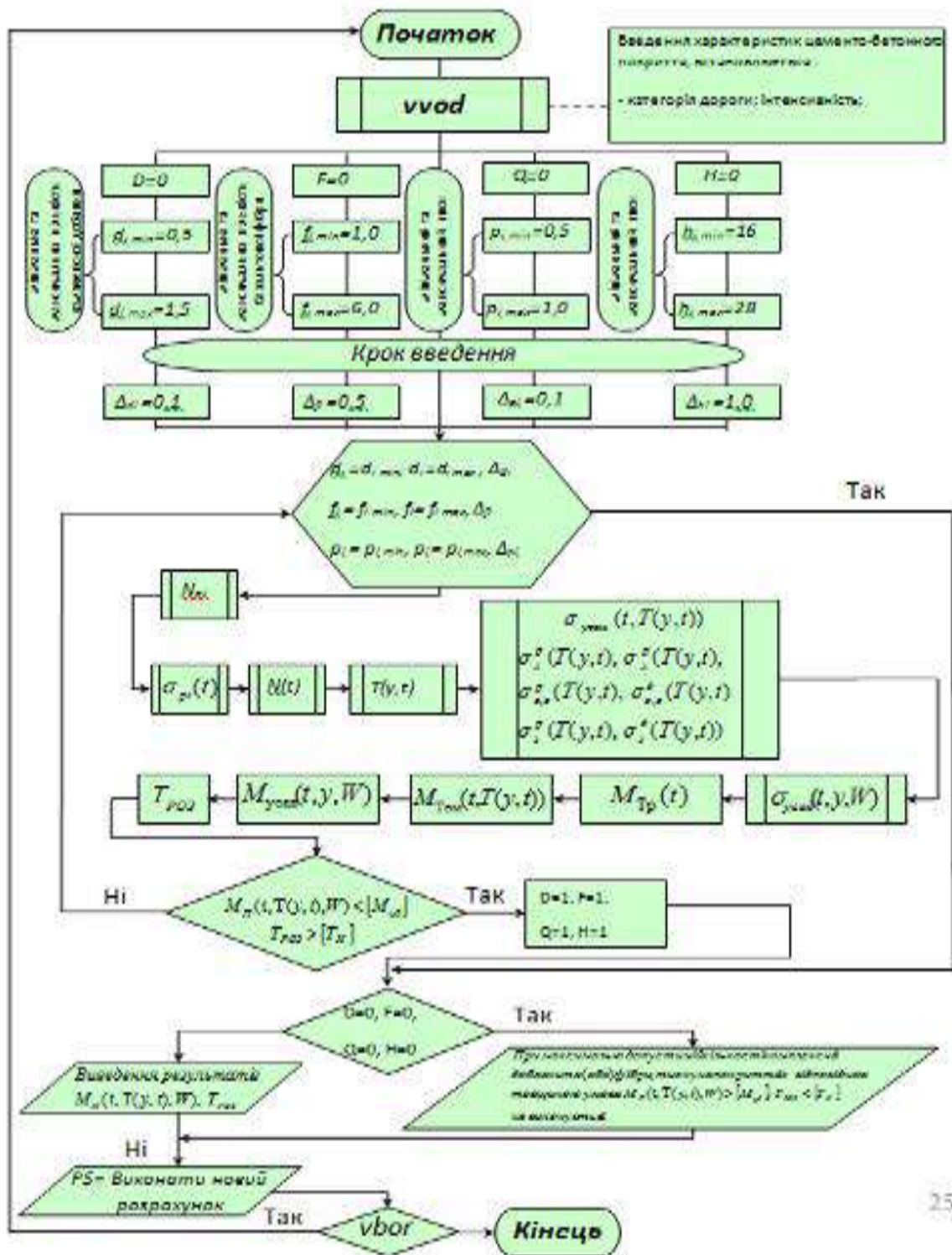


Рисунок 4.1 — Алгоритм розрахунку оцінки довговічності цементобетонного покриття автомобільних дорогах від спільної дії усадки цементобетону, зміни температури та пневматичних коліс транспортних засобів.

В таблиці 4.8 наведено конструкції дорожнього одягу в залежності від категорії автомобільної дороги та рекомендованими складами цементобетону із запропонованими комплексними хімічними добавками на основі результатів проведених досліджень в розділі 3.

Таблиця 4.8 — Рекомендовані конструкції жорсткого дорожнього одягу із комплексними хімічними добавками

Конструкція жорсткого дорожнього одягу	Категорія дороги (клас цементобетону)		
	I а,б B50 B _{btb} 5,2P1F200 W10	II B40 B _{btb} 4,8P1F200 W10	III B35 B _{btb} 4,4P1F200 W8
Цементобетон, см	22-26	20-22	18-20
Асфальтобетон, см	20-30	25	15
Цементобетон, см	24-30	22-26	20-24
Щебенево-піщана суміш укріплена цементом, см	20	18	16
Цементобетон, см	20-24	20-24	18-22
Пісний бетон В 7,5 см	18-20	15-18	10-15

Примітка. Між покриттям та основою із щебенево-піщаної суміші укріпленою цементом, пісного бетону влаштовується розділяючий прошарок із геотекстилю або поліетиленової плівки.

4.3 Технологічні заходи підвищення довговічності цементобетонного покриття автомобільних доріг

Приготування цементобетонної суміші для будівництва автомобільних доріг відбувається як в на заводах стаціонарного так і мобільного типу переважно притрасових або прирейкових. Відстань транспортування не повинна перевищувати 25 км [82, 151]. Для перемішування компонентів малорухливих цементобетонних сумішей застосовують змішувачі примусової дії, час перемішування 5 хвилин.

Цементобетонні суміші марки Р1 (за легкоукладальністю) транспортують на об'єкт будівництва — автосамоскидами.

Для малорухливих цементобетонних сумішей обмежений час транспортування від заводу до місця влаштування покриття. Час транспортування таких сумішей в автосамоскидах не повинно перевищувати 30 хвилин при температурі повітря 20 — 30 °С та 60 хвилин при температурі повітря менше 20 °С [189].

Температура цементобетонної суміші у момент її виходу з бетонозмішувальної установки не повинна перевищувати + 20 °С [189].

При температурі навколишнього середовища осідання конуса (О.К.) на заводі повинно бути в межах: $T \leq +15$ °С, О.К. = 3,5 ... 4,0 см; $T = +15 \dots +20$ °С, О.К. = 4,0 ... 4,5 см; $T = +20 \dots +25$ °С, О.К. = 4,5 ... 5,0 см; $T = +25 \dots +30$ °С, О.К. = 5,0 ... 6,0 см [189]. При температурі навколишнього середовища вище +30 °С не рекомендується виконувати бетонування або необхідно застосовувати спеціальні заходи для пониження температури складових бетонної суміші [189].

При температурі навколишнього середовища вище +20 °С не рекомендується застосовувати цемент першої групи ефективності, щоб уникнути погіршення технологічних і фізико-механічних властивостей цементобетонної суміші і цементобетону (тріщини усадки, температурні тріщини; зменшення міцності через надмірний розігрів бетону) [189].

Критерій оцінки рухомості цементобетонної суміші в залежності від часу транспортування

Однією із важливих характеристик цементобетонної суміші для покриття автомобільних доріг є збереження дотриманості її властивостей із часом транспортування і технологічних перерв. Цементобетонна суміш для покриття автомобільних доріг повинна забезпечити потрібну легкоукладальність (рухомість), необхідну кількість залученого повітря не тільки на заводі при виготовленні, але і на місці влаштування покриття [88].

Застосування бетоноукладачів із ковзкими формами потребує, щоб цементобетонна суміш забезпечила стійкість кромок свіжовлаштованого цементобетону від недопустимих пластичних деформацій після виходу із опалубки.

При підвищенні температури стрімко зменшується осідання конусу з часом. Це призводить до погіршення легкоукладальності суміші, зменшення продуктивності бетоноукладальника, а іноді взагалі до відбракування суміші.

Тому необхідно строго контролювати рухомість цементобетонної суміші, вміст залученого повітря та температуру на заводі та на місці влаштування [189].

Як відомо [173] для будівництва цементобетонних покриттів автомобільних доріг переважно використовують малорухливі цементобетонні суміші із рухомістю – P_1 (1 — 4 см).

З метою забезпечення однорідності цементобетонної суміші запропоновано застосування коефіцієнту рухомості суміші K_{pt} , що є відношенням фактичної рухомості суміші (P_t) в залежності від часу транспортування до нормативного значення рухомості суміші (P_n). У разі невідповідності умови (4.1) $K_{pt} < 0,5$ не буде забезпечена однорідність цементобетонної суміші, що призведе до зменшення довговічності цементобетону, а також погіршеться ущільнення цементобетонної суміші та якість поверхні покриття автомобільної дороги. Тому потрібно корегувати склад цементобетонної суміші за рахунок вмісту портландцементу та комплексної хімічної добавки.

$$K_{pt} = \frac{P_t}{P_n} \geq 0,5, \quad (4.5)$$

де P_t — фактична рухомість цементобетонної суміші в залежності від часу транспортування, см

P_n — нормативне значення рухомості цементобетонної суміші згідно ДСТУ, см

Критерій оцінки вмісту залученого повітря в цементобетонній суміші в залежності від часу транспортування

Згідно вимог [166,173] для забезпечення морозостійкості цементобетону для покриття автомобільних доріг вміст залученого повітря повинен бути в межах 5 — 7 %. Проте аналізуючи результати досліджень [1,2,45,75, 86-88] вміст залученого повітря достатньо на рівні 5 — 6 % для підвищення морозостійкості і не знижуючи при цьому міцність на розтяг при згині цементобетону.

З метою забезпечення однорідності цементобетонної суміші передбачено використання коефіцієнту вмісту залученого повітря суміші K_{vt} , що є відношенням фактичного вмісту повітря в суміші (V) в залежності від часу транспортування до нормативного значення (V_n).

$$K_{vt} = \frac{V}{V_n}, \quad (4.6)$$

де V — фактичний вміст залученого повітря в цементобетонній суміші, %;

V_n — нормативний вміст залученого повітря в цементобетонній суміші, %.

$$1 \geq K_{vt} \geq 0,67, \quad (4.7)$$

При $K_{vt} \leq 0,67$ не буде забезпечена однорідність цементобетонної суміші і морозостійкість цементобетону для покриття автомобільних доріг. У такому випадку необхідно корегувати склад цементобетону: вміст хімічної добавки і піску.

Визначення гранулометричного складу цементобетонних дорожніх сумішей

Зерновий склад цементобетонної суміші необхідно перевіряти з урахуванням часу її транспортування у зв'язку з тим, що із збільшенням часу транспортування суміш в кузові автомобіля починає розшаровуватись, це призводить до так званих процесів сегрегації, що в свою чергу спричиняє підвищене стирання поверхні і пошкодження покриття автомобільних доріг.

Основною умовою визначення гранулометричного складу цементобетонних дорожніх сумішей є можливість відображення фактичного складу цементобетону.

Запропонований метод аналізу гранулометричного складу цементобетонних дорожніх сумішей складається з наступних операцій [174,194]:

- визначення кількості крупного заповнювача;
- визначення кількості дрібного заповнювача (піску).

Метод передбачає відділення від цементобетонної суміші крупного заповнювача та дрібного заповнювача, та розкладання на складові частини (фракції) в зазначеній послідовності (ситовий метод).

Визначення гранулометричного складу цементобетонних дорожніх сумішей дозволяє забезпечити відносну точність до 10%.

При невідповідності цементобетонної суміші було проведено роботу з коригування складу та технології виготовлення цементобетонної суміші, яка включала в себе виконання таких дій: проведення повторних випробувань складу суміші; реєстрація невідповідності складу суміші; коригування суміші бетонної із заданим складом; коригування суміші бетонної із заданою якістю; перевірка і коригування технологічних параметрів виробництва цементобетонної суміші; проведення повторних випробувань складу суміші.

Проби цементобетонної суміші для випробування при операційному контролі слід відбирати:

- на місці приготування цементобетонної суміші при навантажуванні у транспортну ємкість;

- на місці укладання цементобетонної суміші.

Проба цементобетонної суміші повинна найбільш точно відображати склад цементобетону в даній частині конструкції. Для цього відбирається по 2 проби в трьох різних точках на одну захватку.

В залежності від максимальної крупності заповнювачів цементобетону, розмірів конструктивного елементу та інших чинників маса кожної точкової проби може змінюватися від 5 кг до 10 кг. 3 точкових проб утворюють об'єднану пробу, яка характеризує партію, що контролюється.

Маса об'єднаної проби при операційному контролі цементобетонної суміші повинна бути не менше зазначеної в таблиці 1.

При відборі проб можливо застосування суміші після контролю рухомості бетонної суміші. Випробування цементобетонної суміші повинне починатись не пізніше ніж через 2 години після відбирання проби.

З об'єднаної проби цементобетонної суміші відбирається дві досліджувані проби кожна об'ємом: 1 дм^3 – для цементобетонної суміші із найбільшим розміром зерен до 20 мм; 3 дм^3 – для цементобетонної суміші із найбільшим розміром зерен до 80 мм.

Цементобетонну суміш зважують в мірному металевому циліндрі, потім висипають у фарфорову чашку (можливе застосування металевої чаші), заливають невеликою кількістю води (8 – 10%) від маси суміші і розтирають товкачиком з гумовим наконечником протягом від 2 хв до 3 хв.

Відділяють заповнювачі від цементного в'язучого за рахунок промивання цементобетонної суміші водою.

Воду з завислими в ній частками зливають крізь сито з сіткою № 0071, яке установлене над посудиною місткістю від 6 л до 10 л. Частки, які залишились в чашці, знову заливають чистою водою, розтирають і воду знову зливають.

Промивання і розтирання мінерального матеріалу безпосередньо на ситі з сіткою № 0071 не допускаються.

Послідовне розтирання часток і зливання каламутної води продовжують до тих пір, поки вода не буде прозорою. Після закінчення промивання частки мінерального матеріалу більше 0,071 мм, які залишилися на ситі, переносять у фарфорову чашку. Воду, що залишилась у чашці, обережно зливають, після чого чашку ставлять у сушильну шафу для висушування мінерального матеріалу (крупного і дрібного заповнювача) до постійної маси за температури $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$. Маса вважається постійною, коли різниця між двома послідовними зважуваннями з інтервалом 1 год не буде перевищувати 0,1 % від маси наважки.

При проведенні випробування можливе застосування експрес – висушування заповнювачів. Після злиття води, із чашки, її ставлять у сушильну шафу для висушування мінерального матеріалу (крупного і дрібного заповнювача) до постійної маси за температури $(145 \pm 5) ^\circ\text{C}$. Маса вважається постійною, коли різниця між двома послідовними зважуваннями з інтервалом 1 год не буде перевищувати 0,1 % від маси наважки [174,194]

Після проведення висушування виконується визначення складових заповнювачів для визначення відповідності запроектованому складу з урахуванням допустимих відхилень згідно з [174,194].

Висушені проби мінерального матеріалу об'єднують та проводять просіювання ручним або механічним способами через набір сит згідно з [174,194]. За результатами просіювання визначають частковий залишок на кожному ситі a_i , за формулою:

$$a_i = \frac{m_i}{m} 100, \%, \quad (4.8)$$

де m_i – маса залишку на даному ситі, г;

m – маса проби, г.

Визначають повні залишки на кожному ситі у відсотках від маси проби, що дорівнюють сумі часткових залишків на даному ситі і всіх ситах з великими розмірами отворів.

Перед закінченням просівання для перевірки кожне сито вручну інтенсивно струшують протягом (60 ± 5) с над листом паперу. Просівання вважають закінченим за таких умов:

- якщо на папері не буде часток, які пройшли крізь сито з отворами розміром 2,5 мм та більше;
- якщо маса часток, які пройшли крізь сито з отворами розміром 1,25 мм та 0,63 мм не перевищують 0,05 г, а які пройшли крізь сито з отворами розміром 0,071 мм – 0,02 г.

Частки, що пройшли крізь сито, додаються до часток, що пройшли крізь сита з меншим розміром отворів. Залишок на кожному ситі зважують і визначають частинні залишки на ситах у відсотках відносно до маси наважки, що просівалась, округлені до першого десяткового знаку.

Вміст зерен розміром менше ніж 0,071 мм у відсотках визначають як різницю між 100 % та повними залишками на ситі 0,071 мм.

За результат випробування приймають середнє арифметичне двох паралельних випробувань.

Розбіжність між результатами паралельних випробувань на одному ситі не повинна перевищувати 2 % від загальної маси наважки. Масова доля втрат матеріалу при розсіві не повинна перевищувати 2 % від взятої наважки.

Місце відбирання проб для виготовлення зразків необхідно вибирати так, щоб виключити вплив на склад і властивості цементобетонної суміші місця відбирання проб і умов доставки [1].

Зерновий склад піску визначають згідно з [174,194], який повинен відповідати вимогам та рисунку 1[174,194]. Вміст зерен розміром від 5,0 мм до 10,0 мм у всіх видах пісків може становити до 5 % за масою, зерен більше 10 мм до 0,5 % за масою.

Зерновий склад щебеню та щебеню із гравію характеризується:

- найбільшим (D) та найменшим (d) номінальними розмірами зерен фракцій або сумішей фракцій, мм;

- величиною повних залишків на контрольних ситах.

Вміст окремих фракцій у крупному заповнювачі в складі цементобетону повинен відповідати зазначеному у таблиці 2, згідно з [174,194].

4.4 Практичне впровадження наукових досліджень

Автором отримано теоретичні та експериментальні дослідження, які знайшли своє практичне застосування, а саме: отримано алгоритм для виконання розрахунку довговічності цементобетонного покриття автомобільних доріг; розробці типових конструкцій підвищеної довговічності; розробці нормативних документів; розробці комплексної хімічної добавки для покращення властивостей цементобетонних сумішей і бетонів, розробці оптимальних складів цементобетонних сумішей підвищеної тріщиностійкості і довговічності; проектуванні цементобетонного покриття автомобільних доріг підвищеної довговічності.

Результати роботи використані при розробці нормативних документів: М 42.1-37641918-780:2020 Методика оцінки довговічності цементобетонного дорожнього покриття з урахуванням спільного впливу змін температури та дії транспорту; М 42.1-37641918-772:2018 Методика визначення гранулометричного складу цементобетонних дорожніх сумішей; ТУ У В.2.7-20.5-38564866-001:2017 Добавки для бетонів та будівельних розчинів комплексні «ШАГ», шести свідоцтв авторського права на твір; в навчальному процесі Національного транспортного університету.

Апробація результатів дисертаційних досліджень здійснена при влаштуванні покриття аеродрому в Міжнародному аеропорті «Херсон»; при проведенні капітального ремонту взлітно – посадкової смуги в Міжнародному аеропорті «Запоріжжя»; при влаштуванні монолітного огороження парпетного типу «Нью-Джерсі» на автомобільній дорозі М-05

Київ-Одеса км 17+740 – км 87+000”); при виготовленні високоміцних дорожніх бетонів БСГ В40Р4F200W8, БСГ В40Р4F300W8 та виробництві дорожніх плит ПДС (0,16×2,0×3,0) на ТОВ «Бетон Комплекс». Все вище наведене підтверджується довідками впровадженнями (додаток Ж).

При практичному впровадженні було виконано економічну ефективність застосування комплексної добавки у порівнянні із контрольним складом наведено в (додаток Ж). Економічна ефективність застосування комплексної хімічної добавки становить 61,15 грн/м³ цементобетону у порівнянні із хімічною добавкою аналогом зарубіжного виробника.

4.5 Висновки по розділу

1. Розроблені практичні заходи, а саме: — рецептурно-структурні з направленою регулювання характеристик цементобетону передбачають застосування підходів, що підвищують міцність та довговічність цементобетонного покриття..

Конструктивні заходи з направленою регулювання характеристик цементобетонного покриття пов'язані з попереднім конструюванням жорсткого одягу з цементобетонним покриттям на автомобільних дорогах та з наступним виконанням розрахунків для конкретних вихідних умов за чинними нормативними документами.

2. Розроблено методику та алгоритм оцінювання довговічності цементобетонного покриття на автомобільних дорогах з урахуванням спільного впливу усадки цементобетону, зміни температури та дії пневматичних коліс транспортних засобів, що дозволяє проектувати цементобетонне покриття підвищеної довговічності із заданим строком служби.

3. Технологічні способи з регулювання характеристик цементобетонного покриття направлені на підвищені вимоги до технологічних операцій з виготовлення, транспортування, укладання та

догляду цементобетонних сумішей при будівництві цементобетонного покриття.

4. Розроблені і впроваджені практичні розробки по підвищенню довговічності цементобетонного покриття. Отримані рекомендації по проектуванню зернового складу цементобетону підвищеної довговічності. Установлено лабораторні показники і практичні рекомендації та методику розрахунку щодо підвищення довговічності цементобетонного покриття автомобільних доріг.

5. Результати дисертаційних досліджень знайшли застосування при розробці 5 нормативних документів для проектування, будівництва, реконструкції, ремонту та експлуатації цементобетонного покриття автомобільних доріг України, 6 авторських свідоцтв на твір. Дані дослідження знайшли своє практичне впровадження в навчальному процесі НТУ на факультеті транспортного будівництва при читанні лекцій, проведенні практичних занять, виробничих практиках та написанні дипломних проектів та магістерських робіт. Основні результати досліджень другого розділу висвітлені в роботах автора [76 — 82].

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота присвячена вирішанню важливої науково-практичної задачі, що полягає в удосконаленні методу оцінки довговічності цементобетонного покриття автомобільних доріг. Це дозволило отримати нові наукові результати для більш точного прогнозування довговічності цементобетонного покриття з використанням комплексних хімічних добавок та забезпечити отримання більш економічно ефективних рішень при проектуванні, будівництві, експлуатації автомобільних доріг.

1. Детальним аналізом умов роботи цементобетонного покриття на автомобільних дорогах встановлено, що покриття перебуває у складних умовах експлуатації, що з часом призводить до руйнувань покриття від спільного впливу усадки цементобетону, зміни температури та дії пневматичних коліс транспортних засобів. Установлено, що існуючі методи та критерії оцінки довговічності цементобетонного покриття носять розрізнений характер, так як при оцінюванні не в повній мірі враховують спільну дію усадки цементобетону, зміну напружень від сезонних річних і добових температур та дії пневматичних коліс транспортних засобів.

2. Розроблено основну розрахункову схему роботи цементобетонного покриття автомобільних доріг з різними видами основ шарів дорожнього одягу, що враховують особливості властивостей покриття, а також аналітичну залежність та встановлено критерій граничного стану для оцінки довговічності за тріщиностійкістю цементобетонного покриття автомобільних доріг. Удосконалено метод оцінки довговічності цементобетонного покриття на автомобільних дорогах з урахуванням спільного впливу усадки цементобетону, зміни температури та дії пневматичних коліс транспортних засобів, що дозволяє проектувати цементобетонне покриття підвищеної довговічності із заданим строком служби.

3. На основі проведених експериментальних досліджень цементобетону встановлено: розрахункові характеристики цементобетону з використанням комплексних хімічних добавок, а саме модуль пружності з урахуванням різного часу дії навантаження і температури, параметри функції довговічності; лабораторні та стендові дослідження впливу комплексної хімічної добавки на тріщиностійкість цементобетону; закономірності дії комплексної хімічної добавки на будівельно-технологічні та фізико-механічні властивості цементобетону; при моделюванні максимальних розтягуючих напружень в цементобетонному покритті автомобільних доріг від дії пневматичних коліс транспортного засобу.

4. За результатами числового аналізу було встановлено, що цементобетонне покриття (товщиною 22 см) автомобільної дороги з використанням комплексної хімічної добавки має більшу довговічність в 1,2 — 1,6 рази ніж цементобетонне покриття без хімічної добавки.

5. Розроблено рекомендації та методику розрахунку, яка дозволяє проектувати цементобетонне покриття на автомобільних дорогах підвищеної довговічності за рахунок використання комплексних хімічних добавок з урахуванням спільного впливу усадки цементобетону, зміни температури та дії пневматичних коліс транспортних засобів.

6. На підставі техніко-економічного обґрунтування підтверджена економічна ефективність впровадження результатів наукових досліджень за рахунок використання комплексної хімічної добавки в кількості 1,1 % від маси цементу, що дозволяє досягти питомого економічного ефекту — 61,15 грн/м³ цементобетону у порівнянні із хімічною добавкою аналогом зарубіжного виробника.

7. Результати дисертаційних досліджень знайшли застосування при розробці 5 державних нормативних документів для проектування, будівництва, реконструкції, ремонту та експлуатації цементобетонного покриття автомобільних доріг України. Дані дослідження знайшли своє практичне впровадження в навчальному процесі НТУ на факультеті

транспортного будівництва при читанні лекцій, проведенні практичних занять, виробничих практиках та написанні дипломних проектів та магістерських робіт для студентів спеціальності 192 Будівництво та цивільна інженерія.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гамеляк І. П., Корецький А. С., Корецький С. С. Про необхідність будівництва в Україні автомобільних доріг із цементобетонним покриттям. *Автомобільні дороги*. 2013. – № 5. – С. 24–31.
2. Гамеляк І.П. Нові перспективи дорожнього цементобетону на Україні. URL: <https://nadu.com.ua/novi-perspektivi-dorozhnogo-czementobetonu-na-ukra%D1%97ni/> .
3. Гамеляк І. П. По вибоїнам далеко не заїдеш, або чому виникає ямковість та які її наслідки. *Дорожня галузь України: виробничий, науково-технічний журнал*. № 2 . 2013. С. 14-24.
4. Переваги цементобетонних доріг в Україні. Економічна оцінка. URL: http://www.ukrcement.com.ua/zakhodi/icalrepeat.detail/2017/11/14/48/-/kruhlyi-stil-na-temu-betonni-dorohy-realnist-dlia-ukrainy-pid-holovuvanniam-pershoho-zastupnyka-holovy-komitetu-z-pytan-transportu-vasiunyka-iv-za-uch.html?published_fv=-1.
5. Нагайчук В. М., Радовський Б. С. Світовий досвід та сучасні підходи до використання цементобетонного покриття. *Дороги і мости*. 2020. Вип. 21. С. 188 – 200.
6. Проект розпорядження Кабінету Міністрів України «Про схвалення Концепції Державної цільової економічної програми будівництва автомобільних доріг загального користування з цементобетонним покриттям на 2021-2025 роки». URL: https://ukravtodor.gov.ua/4489/povidomlennia_pro_opryliudnennia/60100.html.
7. Дмитриченко М.Ф., Дмитрієв М.М., Гамеляк І.П., Якименко Я.М., Райковський В.Ф. Надійність конструкцій дорожнього одягу: навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл., які навчаються за напрямом підготов. «Буд-во» / – К.: НТУ, 2012. – 206 с.
8. Радовский Б.С. Цементобетонные покрытия в США: конструкции. *Автомобильные дороги*. 2015. №2. –С.48-57.

9. Радовский Б.С. Новые перспективы дорожного цементобетона в США. *Бетон и железобетон. Оборудование. Материалы. Технологии.* - М.: 2011. No1.
10. Галузеві будівельні норми України. ГБН В.2.3-218-534:2011.
11. Ушаков В.В. Автомобильные дороги. Ремонт цементобетонных покрытий автомобильных дорог. Обзорная информация. Вып. 6. *Информационный центр по автомобильным дорогам*, 2002. – URL: <http://www.gosthelp.ru/text/ObzornayainformaciyaAvtom15.html>.
12. Звіт про науково-дослідну роботу. «Оцінка міцності конструкції дорожнього одягу з асфальтобетонними шарами на існуючому цементобетонному покритті ділянки автомобільної дороги Н-01 Київ – Знам'янка, км 21+620 – км Янковский Л.В. 38+880». НТУ. 2015 р. С 243.
13. Янковский Л.В. К вопросу оценки и прогноза состояния цементных бетонов, эксплуатирующихся в условиях воздействия климата Урала и Сибири. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-i-prognoz-sostoyaniya-tsementobetonov-ekspluatiruyuschih-sya-v-usloviyah-vozdeystviya-klimata-severnoy-territorii>.
14. Толмачов Д. С. Розрахунок імовірності утворення температурних тріщин у монолітних дорожніх бетонах / Д. С. Толмачов, В. П. Сопов, С. М. Толмачов. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. 2017. Вип. 66. С. 113-117.
15. Шейнин А.М. Цементобетон для дорожных и аэродромных покрытий. – М.: Транспорт, 1991.- 151 с.
16. Чернявский В.Л. Принцип адаптивности и понятие остаточного ресурса в современном бетоне / В.Л. Чернявский, В.К. Жданюк, В.А. Гуркаленко. *Между народный III научно-практический семинар "Структура, свойства и состав бетона. Вопросы теории бетоноведения и технологической практики"*, Ровно, 11 – 12 ноября 2003.- С.198 – 205.

17. Солодкий С.Й. Оцінювання термонапруженого стану дорожніх покриттів на ранніх стадіях тверднення цементного бетону / С.Й. Солодкий, Р.Я. Лівша. *Автошляховик України*. 2015. № 1 – 2. С. 71 – 74.

18. Сиденко В. М. Эксплуатация автомобильных дорог: учебник для студентов вузов по специальности «Автомобильные дороги» / Сиденко В. М., Михович С. И. – М. : Транспорт, 1976. – 288 с.

19. Полярус О.В. Шляхи визначення енергозберігаючого режиму теплової обробки цементно-водних систем / О.В. Полярус, В. К. Жданюк, О. Л. Вишневецький, С. В. Мінка. *Науковий вісник будівництва ХДТУБА*. 2011. № 63. С. 261 – 267.

20. Котов Д.С. Деформации усадки бетона, модифицированного химическими и тонкодисперсными минеральными наполнителями / Котов Д.С. *Инженерно-строительный журнал*. 2009. № 7. С. 11-21.

21. Дворкін Л.Й. Бетони і будівельні розчини: Підручник / Л.Й. Дворкін, О.Л. Дворкін. – К.: Основа, 2008. – 448 с.

22. EN 1992-1-1: 2005-10 Eurocodez «Desing of concrete structures. Part 1: General rules and rules for building». – Commmition of European Communities. – 248 p.

23. Дмитриев А.С. Образование трещин в бетоне при его усадке / А.С. Дмитриев. *Новое в технологии и конструировании бетонных и железобетонных конструкций*. М.: Стройиздат, 1966. – С. 5 – 10.

24. Цилосани З.Н. Усадка и ползучесть бетона / З.Н. Цилосани. – Тбилиси: Мецниереба. – 1979. – 188 с.

25. Грушко И. М., Ильин А. Г., Чихладзе Э. Д. Повышение прочности и выносливости бетона. – Харьков: Высш. шк., 1986. – 152 с. Шейнин А.М. Цементобетон для дорожных и аэродромных покрытий.- М.: Транспорт, 1991.- 151с.

26. Толмачев С.Н. Факторы обеспечения долговечности дорожного цементного бетона / С. Н. Толмачев, С. Й. Солодкий. *Вісник Одеської*

державної академії будівництва та архітектури. 2013. Вип. 52. С. 275-280.
URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vodaba_2013_52_44.

27. Солодкий С.Й. Дорожні одяги: навч. посібник . Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2015. – 164 с.

28. И.Штарк, Б.Вихт Долговечность бетона.-под ред. П.В.Кривенко.- Киев.- изд-во «Оранта».- 2004.- 301с.

29. Радовский Б.С. Цементобетонные покрытия в США – проектирование. *Автомобильные Дороги*. 2015. № 3. С. 46-59.

30. U. M. Angst, R. D. Hooton, J. Marchand, C. L. Page, R. J. Flatt, B. Elsener, C. Gehlen, J. Gulikers, Present and future durability challenges for reinforced concrete structures. *Materials and Corrosion*, 10.1002/maco. 201206898.63. 12. (1047-1051). (2012).

31. D. Bjegović, M. Serdar, I. Stipanović Oslaković, J. Gulikers, Local detailed inspection methods to determine concrete properties on structures, *Materials and Corrosion*, 10.1002/maco. 201206648. 64. 2.(135-140),(2012).

32. Jie Chen, Katherine G. Kuder, Dawn E. Lehman, Charles W. Roeder, Laura N. Lowes, Creep modeling of concretes with high volumes of supplementary cementitious materials and its application to concrete-filled tubes. *Materials and Structures*, 10.1617/s11527-016-0955-9. 50. 1. (2016).

33. Han Seung Lee, B. Balasubramanian, G.V.T. Gopalakrishna, Seung-Jun Kwon, S.P. Karthick, V. Saraswathy, Durability performance of CNT and nanosilica admixed cement mortar, *Construction and Building Materials*, 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.003. 159. (463-472). (2018).

34. Y. Liu, “Analysis on the influence of temperature on chloride ion diffusion in the concrete,” J. Jiamusi Univ., Nat. Sci. Ed. 31(3). 325–327. (2013).

35. Долговечность бетона и агрессивных, средах / С.Н. Алексеев, Ф.М. Ива-нов, С. Модры, П. Шиссель // - М.: Стройиздат, 1990. - 320 с.

36. Сопов В.П. Расчет температурных полей в бетоне / В.П. Сопов, Е.В. Поклонский, И.М. Белых . Харків. ХОТВ АБУ. 2009. № 54. С. 374 – 378.

37. Рапопорт П.Б., Рапопорт Н.В., Полянский В.Г., Соколова Е.Р., Гарибов Р.Б., Кочетков А.В., Янковский Л.В. Анализ срока службы современных цементных бетонов. *Современные проблемы науки и образования*. 2012. № 4. С. 35 – 47.

38. Носов В.П. Причины образования уступов на цементобетонных покрытиях автомобильных дорог. / В.П. Носов, А.А. Фотиади. *Наука и техника в дорожной отрасли*. 2008. № 3 С. 20–22.

39. Солодкий С. Й. Вплив типу основи на витривалість монолітних цементобетонних дорожніх покриттів / С. Й. Солодкий, І. Ю. Думич. *Автошляховик України*. 2014. № 2. С. 23-26. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/au_2014_2_8.

40. Солодкий С. Й. Деякі аспекти конструювання монолітних цементобетонних дорожніх покриттів за критерієм динамічної стійкості / С. Й. Солодкий, І. Ю. Думич. *Автошляховик України*. 2015. № 1-2. С. 81-83. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/au_2015_1-2_24.

41. Солодкий С. Й. Зміна тріщиностійкості дорожнього бетону в експлуатаційній стадії / С. Й. Солодкий, С. М. Томачев. *Вісник ОДАБА*. Одеса, 2014. № 55. С. 230 – 235.

42. Солодкий С.Й., Русин Р.М. Модифіковані бетони на композиційних цементах для влаштування жорстких дорожніх одягів. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво: наук.-техн.зб.К.*, 2004. Вип.72. С.89-94.

43. Толмачев Д.С. Трещиностойкие мелкозернистые цементные бетоны транспортного назначения: Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Х., 2015. – 155 с.

44. Лівша Р.Я. Оцінка екзотерії на ранній стадії твердіння цементобетонного покриття / Р.Я. Лівша, Л.О. Карасьов. *Вісник НУ Львівська політехніка*. 2007. №600 : Теорія і практика будівництва. С. 130 – 135.

45. Толмачев Д.С. Влияние усадки на структуру и свойства растворов / Д.С. Толмачев. *Строительные материалы*. 2013. № 10. С. 62 – 65.

46. Цилосани З.Н. Усадка и ползучесть бетона / Цилосани З.Н. // Ин-т строит, механики и сейсмостойкости. Тбилиси: 1979. - 230 с.

47. A.N. Onyshchenko, A.S. Lapchenko, N.P. Chyzhenko, S.P. Voznyi Evaluation of inflammatory concerns in cementbound and other cemento-layers of road clothing for care and health. *Slovak international scientific journal*. Slovakia. 2019. № 27. P. 8-13. <http://sis-journal.com/wp-content/uploads/2019/04/Slovak-international-scientific-journal-No27-2019.pdf>

48. Онищенко А.М., Лапченко А.С., Чиженко Н.П. «Оцінка напружень від усадки в цементобетонному покритті автомобільних доріг». *Вісники НУЛП*, серія «Теорія та практика будівництва» Львів. 2019. № 912. С. 132 - 138.

49. Taylor, P.C. Integrated Materials and Construction Practices for Concrete Pavement / P.C. Taylor, S.H. Kosmatka, G. F. Voigt // A State-of-the-Practice Manual, Iowa State University. FHWA. – 2007. – Pp.1–326.

50. Goldbeck, A.T. Thickness of concrete slabs . *Public Roads*. 1919. Vol. 1, №12, April. P. 34–38.

51. Goldbeck, A.T. The present status of impact tests on roadway surfaces. *Motor Travel*. 1920. Vol. 11, №10, Pp. 20–22.

52. Older, C. Highway Research in Illinois, Transactions, ASCE. 1924. Vol. 87. P 1180–1222.

53. Westergaard, H.M. Stresses in Concrete Pavements Computed by Theoretical Analysis. *Public Roads*. 1926. Vol. 7, №2. 25–35.

54. Westergaard, H.M. Analysis of Stresses in Concrete Pavement Due to Variations of Temperature, Proceedings. *Highway Research Board*. 1926. Vol. 6. P. 201–215.

55. Westergaard, H.M. New Formulas for Stresses in Concrete Pavements in Airfields. *American Society of Civil Engineers. Transactions*. Washington, DC. Vol. 113. P. 425–439.

56. Шехтер О.Я. Расчет бесконечной плиты, лежащей на упругом основании конечной и бесконечной мощности и нагруженной сосредоточенной силой. Труды НИИ Фундаментостроя. – М., 1939. – №10.

57. Грушко И.М. Вопросы теории структуры, прочности и разрушения бетонов / И.М. Грушко, В.Д. Алтухов // Технологическая механика бетона. – Рига. – 1986. – С. 15 – 29.

58. Перфилов В.А. Трещиностойкость бетонов / В.А. Перфилов. – Волгоград: Изд-во ВолГАСА, 2000. – 240 с. 138

59. Griffith, A.A. The phenomena of rupture and flow in solids / A.A. Griffith // Phil. Trans. Roy. Soc. – 1921. – Series A-221. – P. 163 – 198.

60. Irwin, G.R. Fracture dynamics / G.R. Irwin // Fracturing of metals. – Cleveland. – A.S.M. – 1948. – 50 p. 25. Jrowan E.O. Fundamentals of brittle behavior in metals / E.O. Jrowan // Fatigue and Fracture of metals. – New-York. – J. Wiley. – 1952. – P. 25 – 34.

61. Woinowsky-Krieger, S. Berechnungen auf elastischem Halbraum aufliegenden, unendlich erstreckten Platte Ingenieur-Archiv. – 1949. – Band XVII. P. 142–149. 28. Горбунов-Посадов, М.И. Плиты на упругом основании (теория и таблицы для расчета). – М.: Стройиздат. – 75 с.

62. Vesic, A.S., Analysis of Structural Behavior of AASHTO Road Test Rigid Pavements / A.S. Vesic, S.K. Saxena: NCHRP Report № 97, Washington, D.C. – 1974.

63. Дорошко Є.В. Удосконалення методу розрахунку тонких асфальтобетонних шарів на жорсткій основі: Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук. Х., 2016. 280 с.

64. Гузеев Е.А., Леонович С.Н., Пирадов К.А. Механика разрушения бетона: вопросы теории и практики. – Брест, БПИ, 1999. – 218 с.

65. Зайцев Ю.В., Сахи Д.М., Пирадов К.А. Механика разрушения бетонов различной макроструктуры. – М.: МГОУ, 2002. – 225 с.

66. Зайцев Ю.В., Казацкий М.Б., Цаава Г.Ф. К нормированию значений K_{1C} для мелкозернистых бетонов // Бетон и железобетон. – 1984. – №6. – С. 23–24.

67. Солодкий С.Й., Русин Р.М., Гайванович Р.В., Поваляшко М.В. Оцінка тріщиностійкості дорожніх бетонів за критеріями механіки руйнування: Зб. наук. статей «Дороги і мости». К.: ДерждорНДІ. 2006. Вип. 6. С. 289–303.

68. Buch, N.D., Gilland, T. Van Dam. A preliminary mechanistic evaluation of PCC cross-sections using ISLAB2000 – a parametric study. Final Report. Michigan State University. – 2004. – P. 1–100.

69. Радовский Б.С. Прочность и расчет бетонных покрытий в США. *Бетон и Железобетон*. Вып. 2. 2011. С. 2–14.

70. Солодкий С.Й. Наукові засади підвищення тріщиностійкості дорожнього цементного бетону: Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук. Л., 2009. 327 с.

71. Пирадов К.А. Механика разрушения железобетона / Пирадов К.А., Гузеев Е.А. // - М.: НИИЖБ, 1998. - 190 с.

72. Бетонні дорожні та аеродромні покриття: навч. посібник / С.Й. Солодкий, С.М. Толмачов. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2016. – 132 с.

73. Батраков В. Г. Теория и перспективные направления развития работ в области модифицированных цементных систем // Цемент. – 1999. – № 5/6. – С. 14–19.

74. Кривенко П.В., Рунова Р.Ф., Саницкий М.А., Руденко И.И. Щелочные цементы: монография. – Киев: изд. ООО Основа, 2015. – 448 с.

75. М. А. Саницький, О. Р. Позняк, У. Д. Марущак, М. М. Чемерис та ін. Модифікатори нової генерації для бетонів. *Будівельні матеріали та вироб.* 2006. No. 1. С. 5–7.

76. Шевчук Г. Я., Генсецький М. П., Гнип О. П., Раєцька К. О. Модифіковані цементобетони для дорожніх та аеродромних покриттів. Вісник ОДАБА. 2015. Вип. №. 57. С. 461–464.

77. Каприелов С.С. Свойства высокопрочного бетона, подвергнутого периодическому воздействию температуры / С.С. Каприелов, А.Л. Гольденберг. *Строительные материалы*. 2013. № 3. С. 60 – 66.

78. Солоненко И.П. Покриття для автомобільних доріг из цементобетонна. Вестник ОГАСА. Вип. №53. – Одеса: Внешрекламсервис. 2014– С. 355-362.

79. Солоненко І.П. Сучасні пластифікуючі добавки для цементобетонів у дорожньому будівництві. *Вестник ОДАБА*. Вип. №45 Одеса: Зовнішрекламсервіс, 2012. С. 254-258.

80. Солоненко И.П. Модифицированные цементобетонные композиции для дорожного покрытия / Солоненко И.П. *Вестник ОГАСА*. Вип. №48. Частина 2. Одеса: Внешрекламсервис, 2012. С. 98-103.

81. Гоц В.І., Ластівка О.В., Волинська Є.В. Ефективність використання шлаколузкого бетону з відходами флотації золівмісної руди в дорожньому будівництві. *Будівельні матеріали та вироби*. № 5 – 6 (96). 2017. С. 28 – 34.

82. Солодкий С. Й. Тріщиностійкість модифікованих високоміцних дорожніх бетонів / С. Й. Солодкий, О. М. Гуняк, Т. Є. Марків. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 2016. Вип. 98. С. 247 - 255.

83. Чиженко Н.П. Дослідження можливості застосування латексів як полімерної добавки в цементний бетон. *Будівельні матеріали, вироби та санітарна техніка*, наук.-техн. збірник. Київ. 2009. Вип. 33. С.68 -73.

84. Чиженко Н.П. Вплив полімерної добавки на фізико-механічні властивості цементобетонного покриття доріг. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*: наук.-техн. збірник. Київ. 2008. Вип. 75. С. 153 -157.

85. Дорошенко Ю.М., Дорошенко О. Ю., Борковський П.П., Чиженко Н.П. Модифікація дорожнього цементобетону відходами хімічної

промисловості. *Автошляховик України*: наук.-виробн. журнал. 2011. № 6. С.42-45.

86. Стьожка В.В. Технологічні аспекти забезпечення довговічності цементобетонного покриття автомобільних доріг / В.В Стьожка, П.П. Борковський. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 2018. Вип. 103. С. 90 – 98.

87. Стьожка В.В. Підвищення довговічності цементобетонного покриття доріг за рахунок застосування гідрофобних хімічних добавок. *Дороги і мости*. Київ, 2020. Вип. 22. С. 128-136.

88. Стьожка В.В. Підвищення довговічності цементобетону для покриття автомобільних доріг / В.В Стьожка, П.П. Борковський. *Вісник Національного транспортного університету*. Серія «Технічні науки». Науково-технічний збірник. К. : НТУ, 2020. Вип. 1 (46). С.324-333.

89. Дорошенко Ю.М. Цементні бетони в дорожньому будівництві: навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. / Ю.М. Дорошенко, О.Ю. Дорошенко.— К.: НТУ, 2012. – 203 с.— Бібліогр.: с. 200–203.

90. Солодкий С.Й., Русин Р.М. Модифіковані бетони на композиційних цементах для влаштування жорстких дорожніх одягів. *Автомобільні дороги і дор.буд-во*: наук. техн. збірник. К.:2004. Вип.72. С.89-94.

91. Ушеров-Маршак А.В., Циака М. Химические и минеральные добавки в технологии цемента и бетона. Труды международной научно-практической конференции: Современные бетоны, компоненты, технология и качество, Хортица, 2003.

92. Петрова Т.М., Джаши Н.А., Смирнова О.М., Чистяков Э.Ю. Современные подходы к проектированию составов высокопрочных бетонов. *Журнал «Строительный Тендер*. №42. 2009.

93. Файнер М.Ш. Высокопрочный бетон. - Черновцы .: Рута 2007. - 124

94. Дорошенко О.Ю. Фібробетон – ефективний матеріал для транспортного будівництва / О.Ю. Дорошенко, Ю.М. Дорошенко, Н.П. Чиженко. *Автошляховик України*. 2006. № 5. С. 29 – 32.

95. Митина Н.А. Использование дисперсно-армирующих материалов в технологии ячеистых бетонов / Н.А. Митина, В.А. Лотов. *Строительное материаловедение – теория и практика: сб. трудов.* – М.: Изд-во СИП РИА. 2006. С. 180 – 182.

96. Мозговий В.В., Пугач М.О., Мозгова Л.А., Куцман О.М., Чиженко Н.П., Соколюк М.Ю. Напрямки застосування золошлаків ТЕС у будівництві автомобільних доріг. *Вісник НТУ. Серія «Технічні науки»: наук.-техн. збірник.* Київ. 2014. Вип. 29. С. 199-205.

97. Гамеляк І. П. Математична модель оцінки ефективності використання високоміцного цементобетону для дорожніх та аеродромних покриттів / І. П. Гамеляк, А. М. Дмитриченко. *Автошляховик України.* 2015. № 1-2. С. 75-80. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/au_2015_1-2_23.

98. Гамеляк І. П. Про ефективність використання високоміцного цементобетону для будівництва жорстких покриттів. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво.* 2011. Вип. 81. С. 30-39.

99. Толмачев С.Н. Строительство автодорог с цементобетонным покрытием в Украине – реальность сегодняшнего дня. *Автомобільні дороги. Будівництво: науково-виробничий журнал* № 4 (234) липень – серпень 2013р. С.36-40

100. Мозговой В.В., Мозговой А.В. Основы проектирования бетонных слоев дорожной одежды с заданной температурной трещиностойкостью. *Матеріали V науково-практичного семінару «Структура, властивості та склад бетону»* м. Рівне, 2006. С.136-144.

101. Дворкин О.Л. Особенности проектирования составов тяжелого бетона при использовании цементов с повышенным содержанием доменного шлака/ Дворкин О.Л., Гарницкий Ю.В., Ледовских Д.А./Проектування бетонів із заданими властивостями. *Матеріали V науково-практичного семінару «Структура, властивості та склад бетону»* м. Рівне, 2006. С.136-144.

102. Бесараб О.М. Підвищення тріщиностійкості асфальтобетонних шарів з врахуванням часу дії навантаження : дис. канд. техн. наук : 05.22.11 / Бесараб Олександр Миколайович. – К., 2003. – 142 с.

103. Йодер Е.Д. Принципы проектирования дорожных и аэродромных одежд. /Перевод с англ. под ред. Н.Н.Иванова. М., Транспорт, 1964, - 189 с.

104. Ковальчик Я.П., Супрун А.С. Воздействие тяжёлого грузового движения на дорожные одежды сельскохозяйственных дорог. - Автомобильные дороги, 1982, №12, с. 15-16.

105. Радовский Б.С., Сливинский В.И., Мозговой В.В., Супрун А.С., Сом М.И., Швец В.В. Влияние количества и расположения колёс на допустимую осевую нагрузку автотранспортных средств. Автомобильная промышленность, 1981, №6, с. 15-17.

106. Радовский Б.С., Сливинский В.И., Мозговой В.В., Супрун А.С., Сом М.И., Швец В.В. О нормировании осевых нагрузок автомобильного подвижного состава. *Промышленный транспорт*. 1980. №10. С. 22-23.

107. Радовский Б.С. Теоретические основы конструирования и расчета нежестких дорожных одежд на воздействие подвижных нагрузок : дис. докт. техн. наук: 05.22.03 / Радовский Борис Самойлович. – М. 1983. – 552 с.

108. Горецкий Л.И. Теория и расчёт цементобетонных покрытий на температурные воздействия / Л.И. Горецкий. – М.: Транспорт, 1965. – 284 с

109. Левицкий Е.Ф., Чернигов В.А. Бетонные покрытия автомобильных дорог. – М.: Транспорт, 1980. – 288 с.

110. Носов В.П. Некоторые вопросы расчёта бетонных покрытий на многократное действие большегрузных автомобилей: дис. ... канд. техн. наук: утв. 18.05.71 / В.П. Носов. – М., 1971. – 215 с.

111. Апестин В.К. Исследование работы дорожных цементобетонных покрытий под действием транспортных нагрузок и температуры применительно к расчёту геометрических параметров плиты: дис.канд. техн. наук: 440:/ В.К. Апистин. – Балашиха, 1969. – 165 с.

112. Бондарева Э.Д. Исследование некоторых вопросов температурных полей в цементобетонных покрытиях автомобильных дорог и аэродромов: дис. канд. техн. наук./ Э.Д. Бондарева. – Ленинград, 1971. – 158 с.
113. Методические рекомендации по проектированию жёстких дорожных одежд (взамен ВСН 197-91). – М., 2004.
114. Носов В.П. Прогнозирование повреждений жёстких слоёв дорожных одежд на основе математического моделирования: дис. д-ра техн. наук: 05.23.11 / В.П. Носов. – М., 1997. – 412 с.
115. Горбунов-Посадов, М.И. Расчёт конструкций на упругом основании / М.И. Горбунов-Посадов, Т.А. Маликова. – 2-е, изд. перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1973.
116. Корочкин, А.В. Теория расчёта жёсткой дорожной одежды с асфальтобетонным покрытием: учеб. пособие / А.В. Корочкин. – М.: МАДИ, 2017. – 148 с.
117. Колтунов М.А. Ползучесть и релаксация / Колтунов М.А. – М.: Высшая школа, 1976. – 277 с
118. Онищенко А.М. Підвищення довговічності асфальтобетонних шарів за рахунок використання полімерних латексів : дис... канд. техн. наук : 05.22.11 / Онищенко Артур Миколайович. – К., 2008. – 157 с.
119. Мозговой В.В. Научные основы обеспечения температурной трещиностойкости асфальтобетонных покрытий : дис... докт. техн. наук : 05.22.11 / Мозговой Владимир Васильевич. – К., 1996 – 406 с.
120. Снітко В.П. Проектування сталезалізобетонних мостів: навчальний посібник // Снітко В. П. – К. : НТУ, 2005. – 118 с.
121. Методические рекомендации по расчету температурных полей, напряжений и деформаций в цементобетонных покрытиях. Союздорнии М. 1976. С 41.
122. Ванли Халед Мустафа. Расчет параметров модели аэродромного покрытия из высокопрочного цементобетона. / Московский государственный

автомобильно-дорожный институт (технический университет). - М., 1999 г. - 9 с, Библиоф. 3. - Рукопись деп. в ВИНТИ 10.11.99, №3291-В99.

123. Трещиностойкие мелкозернистые цементные бетоны транспортного назначения : дис. докт. техн. наук: 05.23.05 / Толмачев Д.С. – Х. 2015. – 155 с.

124. Баженов Ю.М. Технология бетона / Ю.М. Баженов. – М.: Изд-во АСВ, 2003 – 500 с., ил.

125. Грушко И.М. Дорожно-строительные материалы: [Учеб. для вузов] / И.М. Грушко, И.В. Королев, И.М. Борщ, Г.М. Мищенко – М.: Транспорт, 1991. – 357 с.

126. Ладыгин Б.И. Основы прочности и долговечности дорожных бетонов. - Минск: МВСС и ПО БССР, 1963, с. 127

127. Грушко И.М. Повышение прочности и выносливости бетона / И.М. Грушко, А.Г. Ильин, Э.Д. Чихладзе. – Харьков: Изд-во ХГУ, 1986. – 152 с.

128. Баженов Ю.М. Бетон при динамическом нагружении / Ю.М. Баженов. – М.: Стройиздат, 1970. – 272 с.

129. Опыт эксплуатации дорожных одежд с цементобетонными покрытиями. *Серия Строительство и эксплуатация автомобильных дорог*: [обзорн. инф. / подгот. В.К. Апестин, Л.Б. Каменецкий]. М.: ЦБНТИ, вып №4. 1980. 51 с.

130. Афиногенов О.П. Проектирование жестких дорожных одежд / О.П. Афиногенов. – Кемерово: Кузбассвузиздат, 2004. – 227 с.

131. Гамеляк І.П. Застосування цементобетонного покриття в дорожньому будівництві / І.П. Гамеляк, В.В. Смолянець. *Дорожня галузь України*. 2013. № 6. С. 46-51.

132. Толмачев С.М. Будівництво автодоріг із цементобетонним покриттям в Україні – реальність сьогодення. *Автошляховик України*. 2013. № 4. С. 36-40.

133. Толмачев С.Н., Кондратьева И.Г. Прогнозирование долговечности дорожных цементобетонов. С.88-95.
134. Опыт проектирования и строительства асфальтобетонных покрытий на основаниях из тощего бетона. Серия Строительство и эксплуатация автомобильных дорог: [обзорн. инф. / подгот. В.И. Басурманова, Л.Б. Каменецкий]. – М.: ЦБНТИ, вып №7. – 1980. – 29 с.
135. Чернигов В.А. Расчет конструкций асфальтобетонных покрытий на бетонных основаниях по двум предельным состояниям / В.А. Чернигов, И.В. Субботина // Труды СоюзДорНИИ. – 1971. – Вып. 47. – С. 171-189
136. Автомобильные дороги. Дорожные одежды жесткого типа: ТКП 45-3.03-244-2011 (02250). – [Действительный с 2012-01-01]. – Минск: Белдорцентр, 2008. – 61 с.
137. Инструкция по проектированию жестких дорожных одежд: ВСН 197-91. – [Действительный с 1992-01-01]. – М.: СоюзДорНИИ, 1991 – 83 с.
138. Лучко Й.Й., Чубріков В.М., Лазар В.Ф. Міцність, тріщиностійкість і довговічність бетонних та залізобетонних конструкцій на засадах механіки руйнування / НАН України. Фіз.-мех.ін.-т ім. Г.В. Карпенка. – Львів: Каменяр, 1999. – 348 с.
139. Журков С. Н. Кинетика концепции прочности твердых тел. - Изв. АН СССР. Сер. Неорганические материалы, 1967, 3, № 10, с. 1767 - 1771.
140. Алиев А.А. Исследование прочности нежестких дорожных одежд методом динамического нагружения: дис. канд. техн. наук: 440: утв. 19.01.71 / А.А. Алиев. – М., 1969. – 253 с.
141. Степушин А.П. Разработка вероятностно-статистического метода расчёта прочности жестких покрытий аэродромов и автомобильных дорог: дис. д-ра техн. наук: 05.23.11: защищена 18.04.96 /А.П. Степушин. – М., 1995. – 411 с.
142. Коган Б.И. Напряжения и деформации двухслойных и многослойных покрытий. дис. д-ра техн. наук: защищена 08.04.58: утв. 03.10.59 / Б.И. Коган. – Харьков, 1957. – 180 с.

143. Каменецкий Л.Б. Исследование и расчёт предварительно напряжённых дорожных покрытий с безарматурным обжатием бетона: дис. канд. техн. наук / Л.Б. Каменецкий. – М., 1970. – 196 с.
144. Чистяков Е.Г. Разработка методов повышения эксплуатационно-прочностных характеристик автомобильных дорог с учетом циклического воздействия нагрузок: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.23.11 / Е.Г. Чистяков. – Волгоград, 2010. – 23 с.
145. Васильев А.П. Эксплуатация автомобильных дорог и организация дорожного движения / А.П. Васильев, В.М. Сиденко. – М.: Транспорт, 1990. – 304 с.
146. Бабков В.Ф. Реконструкция автомобильных дорог / В.Ф. Бабков. – М.: Транспорт, 1978. – 264 с.
147. Рекомендації по стандартизації влаштування верхніх шарів дорожнього одягу об'єктів транспортного будівництва (РСВДО 01). – Дрезден, 2001. – 71 с.
148. Теоретичні та експериментальні дослідження конструкції Південного мостового переходу через р. Дніпро в м. Києві: монографія // А.М. Онищенко, М.П. Кузьмінець, В.П. Редченко, Д.Й. Тарнопольський, С.Ю. Аксьонов. – К. : НТУ, 2014. – 341 с.
149. Радовський Б.С. Проблемы механики дорожно-строительных материалов и дорожных одежд. К.: ООО «Полиграф Консалтинг», 2003. – 240 с.
150. Чернигов В.А., Павлова О.Б. Методика определения величины и повторяемости температурных напряжений в бетонных покрытиях - Сб.г Труды Союздорнии. Вып.28. Балашиха Московской обл. 1969..
151. Чернигов В.А. Методические рекомендации по расчету цементобетонных покрытий на основаниях различных типов. – М.: СоюздорНИИ, 1972 – 63 с.

152. Солодкий С.Й. Тріщиностійкість бетонів на модифікованих цементах: монографія / Солодкий С.Й. – Львів : видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2008. – 144 с.

153. Методика оцінювання довговічності цементобетонного дорожнього покриття з урахуванням спільного впливу змін температури та дії транспорту М 42.1-37641918-780:2020.

154. ТУ У В.2.7-20.5-38564866-001:2017 Добавки для бетонів та будівельних розчинів комплексні «ШАГ».

155. Дворкін Л.Й., Гоц В.І., Дворкін О.Л. Випробування бетонів і будівельних розчинів. Проектування їх складів: навчальний посібник. – К.:Основа, 2014 . – 304 с.

156. Будівельні матеріали. Суміші бетонні. Методи випробувань. : ДСТУ Б В.2.7-114-2002 (ГОСТ 10181-2000), - [Чинний з 2002-01-31]. – К.: Державний комітет архітектури, будівництва і житлової політики України, 2002. – 27 с. – (Державний стандарт України).

157. Бетони. Методи визначення середньої густини, вологості, водопоглинання, пористості і водонепроникності: ДСТУ Б В.2.7-170:2008, - [Чинний від 2009-07-01]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2009. – 38 с. – (Національний стандарт України).

158. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками: ДСТУ Б В.2.7-214:2009, - [Чинний від 2010-09-01]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2010. – 43 с. – (Національний стандарт України).

159. EN 12390-6:2000 Випробування затверділого бетону - Частина 6: Міцність зразків, що випробовуються на розтяг при розколюванні.

160. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення призмової міцності, модуля пружності і коефіцієнта Пуассона: ДСТУ Б В.2.7-217:2009Будівельні матеріали. Бетони правила, - [Чинний з 2009-12-22]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2010. – 26 с. – (Національний стандарт України).

161. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення деформацій усадки та повзучості: ДСТУ Б В.2.7-216:2009, - [Чинний від 2010-09-01], - К.: Мінрегіонбуд України, 2010. – 27 с. – (Національний стандарт України).

162. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення стиранності: ДСТУ Б В.2.7-212:2009, - [Чинний від 2010-09-01], - К.: Мінрегіонбуд України, 2010. – 13 с. – (Національний стандарт України).

163. Будівельні матеріали. Бетони. Прискорені методи визначення морозостійкості при багаторазовому заморожуванні та відтаванні: ДСТУ Б В.2.7-49-96. – [Чинний від 1997-04-01]. – К.: Держкоммістобудування України. – 48 с. – (Національний стандарт України).

164. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення характеристик тріщиностійкості (в'язкості руйнування) при статичному навантаженні ДСТУ Б В.2.7-227:2009. – [Чинний від 2009-12-22]. – К.: Мінрегіонбуд України. – 23 с. – (Національний стандарт України).

165. Петрова Т.М., Джаши Н.А., Смирнова О.М., Чистяков Э.Ю. Современные подходы к проектированию составов высокопрочных бетонов. Журнал «Строительный Тендер №42», 2009.

166. ДСТУ 8858:2019 Суміші цементобетонні дорожні та цементобетон дорожній. Технічні умови. - [Чинний від 2019-06-07], - К.: Мінрегіонбуд України, 2019. – 31 с. – (Національний стандарт України).

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

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

169. Гаркуша, М. В. Удосконалення методу оцінки стійкості покриття нежорсткого дорожнього одягу до утворення колії // дис. канд. техн. наук : 05.22.11 / Микола Васильович Гаркуша, Нац. транспортний ун-т.— Київ :, 2019.— 209 с.

170. Куцман О.М., Лаповська С.Д., Мозговий В.В., Баран С.А. Оцінка міцності цементобетонну існуючого покриття. *Будівельні матеріали та виробы: наук.-техн.збірник*. 2016. Вип. 2-3 (92). С. 30-34.
171. СОУ 45.2-00018112-062:2010. Методи випробування на кільцевому стенді.
172. ГБН В.2.3-37641918-557:2016 Дорожній одяг жорсткий. Проектування – чинний від 01.04.2017 р. – Київ: Міністерство інфраструктури України, 2016. С. 83.
173. ДБН В.2.3-4:2015 Автомобільні дороги. Частина І. Проектування. Частина ІІ. Будівництво.
174. М 42.1-37641918-772:2018 Методика визначення гранулометричного складу цементобетонних дорожніх сумішей .
175. Саканделидзе А.А. Новый способ рационального проектирования высокопрочных бетонов марок 500-1000. – Тбилиси, 1978.
176. Чистяков В.В., Шургая А.Г., Дорошенко Ю.М., Чиженко Н.П., Сербін В.П., Дорошенко О.Ю. Вплив комплексної добавки на структуроутворення і властивості цементобетонну для покриття доріг. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво: наук.-техн. збірник*. Київ. 2011. Вип. 82. С. 59-64.
177. Чистяков В.В., Шургая А.Г., Дорошенко Ю.М., Чиженко Н.П. Цементобетони для покриття доріг. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво: наук.-техн. збірник*. Київ. 2012. Вип. 85. С. 48-55.
178. Гамеляк І.П, Шургая А.Г., Якименко Я.М., Чиженко Н.П., Карпюк О.А. Порівняння сучасних добавок для високоміцного дорожнього бетону. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво: наук.-техн. збірник*. Київ. 2014. Вип. 92. С. 38-49.
179. Чиженко Н.П. Оцінка тріщиностійкості модифікованого дорожнього бетону. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво: наук.-техн. збірник*. Київ. 2016. Вип. 97. С. 20-26.

180. Гамеляк І.П., Шургая А.Г., Якименко Я.М., Чиженко Н.П. Математичні моделі властивостей високоміцних цементобетонів для дорожнього будівництва. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. Харків. 2017. Вип. 169. С. 103-111.
181. Онищенко А.М., Гаркуша М.В., Чиженко Н.П. Перевірка відповідності гранулометричного складу цементобетонних сумішей. *Вісник ХНАДУ*, 2019. Вип.86. С.53 – 63. DOI:10.30977/BUL.2219-5548.2019.86.2.53.
182. Онищенко А.М., Чиженко Н.П. Оцінка довговічності цементобетонного покриття автомобільних доріг. *Дороги і мости*. Київ, 2020. Вип. 22. С. 138-148. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2020.22.138>
183. Онищенко А.М., Худолій С.М., Чиженко Н.П. Числове моделювання впливу розташування транспортного навантаження на цементобетонне покриття автомобільних доріг. *Вісник НТУ. Серія «Технічні науки»: наук.-техн. збірник*. Київ. 2020. Вип. 46. С. 237-253.
184. Шургая А.Г., Гудименко К.В., Чиженко Н.П. Теоретические и практические аспекты улучшения технологических показателей, экономической целесообразности и долговечности высокопрочных цементобетонов в дорожном строительстве. *Будівельні матеріали, вироби та санітарна техніка*, наук.-техн. збірник. Київ. 2013. Вип. 49. С. 154-163.
185. Чиженко Н.П. Высокопрочный цементобетон с комплексными добавками для дорожного и аэродромного строительства. *Автомобильные дороги и мосты*. Минск. 2015. № 2 (16). С. 69-74.
186. Шургая А.Г., Чиженко Н.П. Высокопрочный бетон в дорожном строительстве (теоретические аспекты). *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво: наук.-техн. збірник*. Київ. 2016. Вип. 96. С. 43-49.
187. Шургая А.Г., Гамеляк І.П., Якименко Я.Н., Чиженко Н.П., Карпюк А.А. Высокопрочный цементобетон с комплексными добавками. *Мир дорог*. Санкт-Петербург. 2017. № 98. С.72-78.
188. Дорошенко Ю.М., Дорошенко О. Ю., Борковський П.П., Чиженко Н.П., Куцоконь О., Наконешна Я. Технологічні методи регулювання

властивостей бетону. *Будівельні матеріали, вироби та санітарна техніка*, наук.-техн. збірник. Київ. 2014. Вип. 51. С.50-54.

189. Гамеляк І.П., Шургая А.Г., Якименко Я.М., Дмитриченко А.М., Чиженко Н.П. Удосконалення технології влаштування монолітного парапетного огороження типу “Нью-Джерсі”. *Вісник НТУ*. Серія «Технічні науки»: наук.-техн. збірник. Київ. 2016. Вип.1 (34). С.78 - 88.

190. Онищенко А.М., Гаркуша М.В., Чиженко Н.П. Розробка методики оцінки довговічності цементобетонного покриття на автомобільних дорогах з урахуванням спільного впливу зміни температури та дії транспорту. *Збірник матеріалів I Міжнародної науково – технічної конференції “Дорожньо-будівельний комплекс: проблеми, перспективи, інновації”*. м. Харків, ХНАДУ, 2019. С. 197-198.

191. Онищенко А.М., Гаркуша М.В., Чиженко Н.П.. Розробка методики оцінки довговічності цементобетонного покриття на автомобільних дорогах з урахуванням спільного впливу зміни температури та дії транспорту. *Збірник матеріалів I Міжнародної науково – технічної конференції “Дорожньо-будівельний комплекс: проблеми, перспективи, інновації”*. м. Харків, ХНАДУ, 2019. С. 197-198.

192. Онищенко А.М., Чиженко Н.П. Метод оцінки довговічності цементобетонного покриття автомобільних доріг. *Збірник тез міжнародної науково-технічної конференції Гідротехнічне і транспортне будівництво*. Одеса. 28-29 травня 2020 р. С.85-89.

193. Свідоцтво України про реєстрацію авторського права на твір № 81519 Україна. Літературний письмовий твір науково-технічного характеру. «Удосконалення методу проектування складу високоміцного дорожнього цементобетону» Чиженко Н.П. Дата реєстрації 14.09.2018 р.

194. Свідоцтво України про реєстрацію авторського права на твір № 81519 Україна. Літературний письмовий твір науково-технічного характеру «Оцінка відповідності гранулометричного складу цементобетонних дорожніх

сумішей» Онищенко А.М., Гаркуша М.В., Чиженко Н.П. Дата реєстрації 14.09.2018 р.

195. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 97238 Україна. Літературний письмовий твір науково-технічного характеру. «Методологія розрахунку цементобетонного покриття автомобільних доріг на довговічність». Онищенко А.М., Лапченко А.С., Чиженко Н.П. Дата реєстрації 15.04.2020 р.

ДОДАТОК А

КРИТЕРІЇ ТА МЕТОДИ ОЦІНКИ ДОВГОВІЧНОСТІ ЦЕМЕНТОБЕТОННОГО ПОКРИТТЯ АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ

Таблиця А.1 — Критерії та методи оцінки довговічності цементобетонного покриття автомобільних доріг

Критерії та методи	Порядковий номер формули	Автор/дослідник	Посилання
1	2	3	4
Критерій міцності крихкого тіла з уже існуючою тріщиною : $\sigma = \sqrt{\frac{2 \cdot \gamma \cdot E}{\pi \cdot l}}$ де: σ - руйнівне напруження; l - розмір тріщини; γ - вільна поверхнева енергія тіла; E - модуль пружності матеріалу.	(A.1)	А. А. Гріффітс	[25,138]
Силовий критерій тріщиностійкості K_{IC}: $K_{IC} = \sigma_c \sqrt{\pi \cdot \alpha_c}$ де σ_c - критичне напруження, при якому виникає тріщина; α_c - критичний розмір тріщини.	(A.2)	А. А. Гріффітс	[138]
Визначення часу до руйнування : $\tau = B\sigma^{-a},$ де τ - довговічність зразка; σ - задане напруження; a і B - константи.	(A.3)	Голланд, Тернер	[25]

Продовження таблиці А.1

1	2	3	4
Визначення довговічності τ від температури T і напружень σ описується співвідношенням $\tau = A\sigma^{-m} \exp\left(\frac{U}{RT}\right),$ де A і m - параметри матеріалу.	(A.4)	Г. М. Бартенев	[25]
Визначення довговічності τ зразка від прикладеного напруження σ і температури T: $\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{U_0 - \gamma\sigma}{\kappa T}\right).$ де τ_0, U_0 і γ - коефіцієнти, що характеризують міцності властивості тіла; κ - постійна Больцмана.	(A.5)	С.Н. Журков	[25, 139]
Визначати довговічності : $\tau = \tau_2 \cdot \frac{R_{to} - R_{дл}}{\sigma - R_{дл}} \cdot e^{-tg\varphi(\sigma - R_{дл})}$ де τ_2 $tg\varphi$ – постійні; $R_{дл}$ – довготривала міцність цементобетону; – міцність цементобетону при тривалості дії навантаження 1 с; σ – прикладене напруження.	(A.6)	И.М. Грушко, В.Д. Алтухов	[25]
Визначення міцності цементобетону: $R_6 = A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot R_{ц},$ де $A_1 \cdot A_2 \cdot A_3$ – коефіцієнти, які враховують вплив макро-, мезо-, мікроструктури на міцність цементобетону; $R_{ц}$ – це активність цементу.	(A.7)	И.М. Грушко	[89]

Продовження таблиці А.1

1	2	3	4
Руйнування відбудеться при умові, якщо: $\sum_{m=1}^m \frac{n_j}{N_j} \geq 1$ Частка пошкодженості при будь-якому рівні амплі-туди напруги циклу Si прямо пропорційна відношенню числа циклів його дії до повного числа циклів, яке призвело б до руйнування при цьому рівні, тобто Di = ni / Ni.	(A.8)	Пальмгрен - Майнера	[37]
$D = \frac{\frac{n}{N}}{1 + \left[\frac{E_0}{S - E_0} \right] \cdot \left(1 - \frac{n}{N} \right)}$ Криві втоми зміщуються в міру накопичення ушкоджень D = (Eo - E) / Eo Eo - межа втоми вихідного матеріалу, E теж після ушкоджень. Вважається, що при дії циклічних навантажень нижче межі втоми не виникає ніяких пошкоджень.	(A.9)	Генрі	[37]
Еквівалентним співвідношенню Генрі. Втомна міцність і межа втоми змінюються безперервно: $D(S) = (S - S_e)^p$ де Se-межа втоми, S-миттєве значення міцності.	(A.10)	Гатс	[37]
$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_1} \cdot \left(\frac{S_2}{S_1} \right)^d + \frac{n_3}{N_1} \cdot \left(\frac{S_3}{S_1} \right)^d + \dots + \frac{n_i}{N_i} \cdot \left(\frac{S_i}{S_1} \right)^d = 1$ Час, необхідний для утворення зародків пошкодженості, дорівнює нулю N1 = 0. Між питомою пошкоджених і числом циклів існує ступенева залежність D1 = rNa.	(A.11)	Кортен – Долан	[37]

Продовження таблиці А.1

1	2	3	4
$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} \cdot \left(\frac{S_2}{S_1}\right)^2 + \frac{n_3}{N_3} \cdot \left(\frac{S_3}{S_1}\right)^2 + \dots + \frac{n_i}{N_i} \cdot \left(\frac{S_i}{S_1}\right)^2 = 1$ Побудовано сімейство кривих втоми, які відповідають різним рівням пошкодженості цементобетону.	(A.12)	Марина	[37]
Білінійне правило Менсона, сумування пошкоджень. Процес втоми розділений на фази зародження тріщини і її поширення. Правило лінійного підсумовування пошкоджень застосовується до кожної фази окремо.	(A.13)	Менсон	[37]
Визначення довговічності цементобетону при багатоступінчатому прямокутному статичному режимі навантаження із урахуванням стану спокою матеріалу конструктивних шарів при непостійному коефіцієнті асиметрії циклу. Для врахування тимчасових інтервалів між рухом автомобілів у транспортному потоці умова розриву при багатоступінчатій прямокутних циклах навантаження із інтервалами спокою матеріалу моделі визначається: $\sum_i^n \frac{\Delta t_i}{\tau(\sigma_i)} = 1,$ де Δt_i - час дії i-того навантаження, с; $\tau(\sigma_i)$ – відповідна їй довговічність. Визначення еквівалентного числа багатоступінчатих циклів навантаження до руйнування при непостійному коефіцієнті асиметрії циклу: $N_d = N_n \left(1 - \sum_i^{n=1} \frac{N_{iu}}{N_i} \right) - \sum_i^n \frac{\Delta t_i}{\tau(\sigma_i)}$	(A.14)	В.М. Сикаченко	[89]

Продовження таблиці А.1

1	2	3	4
Коефіцієнт зниження міцності визначається за залежністю: $k_p = \frac{k_o \cdot k_c \cdot k_d}{1 - \rho_a \left(1 - \frac{k_o \cdot k_c \cdot k_d}{\eta} \right)}$	(A.14)	В.М. Сикаченко	[89]
$\sigma_p + \sigma_m < R'' k_{одн} k_{yc},$ де: σ_p, σ_m – відповідно напруження розрахункове, температури; R'' - нормативна границя міцності цементобетону, $k_{одн}, k_{yc}$ – коефіцієнти однорідності, втоми цементобетону.	(A.15)	Г.І. Глушков	[15]
Визначення зміни тріщиностійкості цементобетонного покриття автомобільних доріг залежно від терміну експлуатації : $K_{1c}^{\tau} = K_{1c}'' - a \cdot \tau^{\kappa}$ де K_{1c}'' – розрахунковий показник в'язкості руйнування для даного класу і категорії тріщиностійкості цементобетону, а також рівня надійності конструкції, τ – термін експлуатації дорожнього покриття в роках.	(A.16)	С.Й. Солодкий	[70]
Визначення ресурсу довговічності: $D = f [B_{btb}, K_{ic}, J, \tau]$ де: D – ресурс довговічності бетонного покриття; B_{btb} – клас міцності бетону на розтяг при згин; K_{ic} – критичний коефіцієнт інтенсивності напружень; J – джей – інтеграл; τ – розрахунковий термін експлуатації покриття в роках за певного рівня надійності безвідмовної роботи.	(A.17)	С.Й. Солодкий	[70]
Визначення показника морозостійкості як число циклів заморожування-відтаювання в проектний період експлуатації: $M_{pz} = T \cdot K_1 \cdot K_2,$	(A.18)	С.В.Шестоперов	[89]

Продовження таблиці А.1

1	2	3	4
де T – проектне число років експлуатації; K_1 – середньорічне число переходів температури поверхневого шару бетону через $0\text{ }^{\circ}\text{C}$; K_2 – коефіцієнт запасу (для масивних конструкцій $K_2 = 1$, для немасивних, товщиною менш 50 см, $K_2 = 2$).	(A.18)	С.В.Шестоперов	[89]
Визначення проектної морозостійкості бетону: $F_n = G \cdot H \cdot D \cdot Z$ де G – нормативний термін служби спорудження, роки; H – нормативне (розрахункове) число циклів заморожування в рік; D – коефіцієнт суворості кліматичних умов; Z – коефіцієнт умов експлуатації бетону спорудження.	(A.19)	Л.М. Добшица	[89]
Закономірність накопичення пошкодження у вигляді: $\frac{t_1}{T} + \frac{t_2}{T} + \dots + \frac{t_{i-1}}{T} + \frac{t_i}{T} \leq 1 \quad \text{або} \quad \sum_{i=1}^n \frac{t_i}{T} \leq 1$ де t_i - час впливу клімату на бетон до моменту визначення пошкоджень: (поточного стану); T – повне можливе час впливу клімату для досягнення бетону стану, прийнятого за граничне. Пошкодження бетону від впливом клімату виражена зміною міжосьових векторів, що описують стан бетону в попередньому стані. Прогнозування довговічності бетону можна визначити за наступною залежністю: $T = \frac{\frac{\pi}{2} t_i}{\frac{\pi}{2} - \varphi}$ де φ – кут вектору, що характеризує стан бетону. При розгляді змін характеристик бетону під впливом клімату як випадкового процесу виявлено, що автокореляційна функція:	(A.20)	Янковский Л.В.	[55]

Кінець таблиці А.1

1	2	3	4
$R(\tau) = \frac{1}{n - \tau} \sum_{i=1}^{n-\tau} \Delta x_i \Delta x_{i+\tau} \text{ де } i = 1, 2, \dots, n; n - \text{обсяг вибірки; } \tau = t_1 - t_2;$ t_i – момент часу реалізації або перетину випадкового процесу; x – середнє арифметичне вибірки x_i, прагне до нуля, що свідчить про ергодичності процесу і підтверджує зроблений раніше висновок про можливість використання з метою прогнозу зміни під впливом клімату протягом року таких характеристик, як R_b, R_{crs}, W.	(A.20)	Янковский Л.В.	[13]
Визначення експлуатаційного періоду цементобетонного покриття: $T = \frac{A_{\text{крит.}} \cdot K_{\text{агр.}}}{A_{\text{ковзання}}^{\text{терття}}} \cdot K_{\text{в}},$ де $A_{\text{ковзання}}^{\text{терття}}$ – робота сили терття ковзання для одного циклу стирання; $K_{\text{в}}$- коефіцієнт, що враховує кількість днів роботи цементобетону у вологому середовищі: $K_{\text{в}} = \frac{365}{(n_1 + n_2)}$ Визначення коефіцієнта агресивності, який враховано в залежності від території експлуатації покриття та агресивності середовища: $K_{\text{агр}} = \frac{n_1 \cdot K_{\text{в}} + n_2 \cdot K_{\text{НС}} + n_3 \cdot K_{\text{МРЗ}} + (365 - \sum n_i)}{365}$ де n_1 – кількість днів на рік із осадками більше 5 мм; n_2 – кількість днів із застосуванням протиожеледних матеріалів; n_3 – кількість переходів через 0°C на рік; $K_{\text{в}}$ – емпіричний коефіцієнт, який враховує вплив поперемінного водонасичення та висихання; $K_{\text{НС}}$ - емпіричний коефіцієнт, який враховує вплив протиожеледних матеріалів; $K_{\text{МРЗ}}$ - емпіричний коефіцієнт, який враховує вплив заморозування та відтавання;	(A.21)	С.М. Толмачев	[133]

Таблиця А.2 — Критерії та методи розрахунку температурних напружень в цементобетонному покритті доріг

Критерії та методи	Порядковий номер формули	Автор/дослідник	Посилання
1	2	3	4
Визначення температурних напружень: $\sigma = 2\gamma fL$ де 2 – параметр, який враховує внецентрове прикладання сили опору переміщенню плити внаслідок тертя – зчеплення плити з основою; γ - об'ємна вага цементобетону; f - коефіцієнт тертя плити по ґрунту основи; L - довжина плити.	(А.22)	Гольдбек	[108]
Визначення температурних напружень: $\sigma = \frac{Lh\gamma(2f_{\text{гр.}} + f) + c}{h}$ де $f_{\text{гр.}}$ – коефіцієнт тертя в ґрунтах; c – сила зчеплення ґрунтових часток	(А.23)		[108]
Визначення температурних напружень: $\sigma = \frac{1,4(h\gamma tg\varphi + c)L}{h},$ де $tg\varphi$ - тангенс кута природного тертя в ґрунтах основи.	(А.24)	В.Ф. Бабковим	[108]

Продовження таблиці А.2

1	2	3	4
$\sigma_{(xz)} = \frac{3\alpha Et}{4} \left(\frac{1}{3} - \frac{z}{h} \right) \left(\frac{ch\lambda x}{ch\lambda L} - 1 \right)$	(A.27)	Н.Х. Арутюнян та Б.Л. Абрамян	[108]
Визначення температурних напружень для плит кінцевих розмірів: $\sigma_y =$ $\sigma_0 \left[1 - \frac{2 \times \cos \lambda \times \cos(h \times \lambda)}{\sin 2\lambda \times \sin(h \times \lambda)} \left\{ (tg\lambda + tg(h \times \lambda)) \cos \frac{y}{l \times \sqrt{2}} \cosh \frac{y}{l \times \sqrt{2}} + tg\lambda - tg(h \times \lambda) \sin \frac{y}{l \times \sqrt{2}} \sin h \frac{y}{l \times \sqrt{2}} \right\} \right],$ у напрямку х: $\sigma_x = \sigma_0 + \mu(\sigma_y - \sigma_0),$ де $\lambda = b/l\sqrt{8}$, $l = 0,6h^3 \sqrt{\frac{E_0}{E_6}}$ b – ширина плити	(A.28)	Х.М. Вестергард	[63,108]
Визначення напружень для краю плити: $\sigma_{кр} = \frac{\alpha E \Delta t}{2} C,$ для середини плити: $\sigma_y = \frac{\alpha E \Delta t}{2(1 - \mu^2)} (C_y + \mu C_x),$ $\sigma_x = \frac{\alpha E \Delta t}{2(1 - \mu^2)} (C_x + \mu C_y),$	(A.29)	Бредбюрі	[108]

Продовження таблиці А.2

1	2	3	4
При вільних поздовжніх деформаціях в покритті розрахунок температурних напружень в плитах без можливості короблення ($C_x = 1$) або маючи часткову можливість короблення ($C_x < 1$) температурні напруження визначаються за: $\sigma_{12x} = E \alpha T(y) - \frac{E \alpha}{h} \int_0^h T(y, t) dy - \frac{12 E \alpha \left(\frac{h}{2} - y \right) (1 - C_x)}{h^3} \int_0^h T(y, t) \left(\frac{h}{2} - y \right) dy,$ де $T(y, t)$ – гармонічна функція температури по товщині плити покриття.	(A.37)		
$\sigma_x = \sigma_y = -\frac{\alpha E T_z}{1 - \mu} + \frac{1}{2 h_1 (1 - \mu)} \int_{-h_1}^{+h_1} \alpha E T_z dz + \frac{3z}{2 h_1^3 (1 - \mu)} \int_{-h_1}^{+h_1} \alpha E T_z dz$ де z – координата по глибині плити h_1 – половина товщини плити α – коефіцієнт лінійного розширення та модуль пружності T_z – розподіл температури по товщині плити .	(A.38)	Тимошенко-Томлінсона	[108]

Продовження таблиці А.2

1	2	3	4
$\sigma_T(t, T(y, t)) = k \cdot E(t) \cdot (\alpha_{цб} - \alpha_{осн}) \cdot (T(y) - \frac{k \cdot E(t) \cdot (\alpha_{цб} - \alpha_{осн})}{h})$ $\int_0^h T(y, t) dy - \frac{12 \cdot k \cdot E(t) \cdot (\alpha_{цб} - \alpha_{осн}) \cdot (\frac{h}{2} - y) \cdot (1 - C_x)}{h^3} \int_0^h T(y, t) \cdot (\frac{h}{2} - y) dy$ де $T(y, t)$ – гармонічна функція температури по товщині покриття; $E(t, T)$ – модуль пружності цементобетону, який залежить від часу дії навантаження; $\alpha_{цб}$ – коефіцієнт лінійного температурного розширення цементобетону; $\alpha_{осн}$ – коефіцієнт лінійного температурного розширення основи; h – товщина покриття; k – швидкість охолодження цементобетону; y – задана глибина.	(A.39)	В.А. Черниговим, Ю.Ф. Левицкий та Л.І. Горецьким	[109]
$Q_e = 2 \frac{\lambda_6 (t_{ц} - t_c - \Delta t_k)}{H}$ де λ_6 - коефіцієнт теплопровідності бетону; $t_{ц}$; - розрахункова температура від екзотерії в середині плити, К; t_c – температура зовнішнього середовища, К; Δt_k – перепад температури в плиті, К; H - товщина плити, М.	(A.40)	А.В. Михайлов	[44]
Залежність модуля пружності цементобетону від функції екзотерії, встановивши залежність за граничним значенням модуля пружності $E_{гр.б}$ що відповідає віку еталона в 28 діб і граничній кількості тепла $\mathcal{E}_{гр.}$ яке виділяється із 1 кг цементу в бетоні: $E_{(\tau, t)} = \frac{E_{гр.б}}{\mathcal{E}_{гр.} - \mathcal{E}_{(\tau)}} \cdot [\mathcal{E}_{(t)} - \mathcal{E}_{(\tau)}]$	(A.41)	Ю.Р. Макачьева	[44]

Таблиця А.3 — Критерії та методи розрахунку напружень в цементобетонному покритті від усадки

Критерії та методи	Порядковий номер формули	Автор/дослідник	Посилання
1	2	3	4
Визначення коефіцієнта втрати вологи: $B = \frac{A \cdot L^2 \cdot U_{\text{пов}}}{t \cdot \text{tg} \alpha},$ де В – це коефіцієнт втрати вологи, см/год $U_{\text{нов}}$ - вологість поверхні $\text{tg} \alpha$ - тангенс кута нахилу дотичної у розрахунку координат зміни вологості у залежності від відстані до поверхні. L- товщина бетонної конструкції, см t – тривалість втрати вологи, год A – коефіцієнт пов'язаний із коефіцієнтом дифузії.	(А.45)	А.В. Белов	[24, 89]
Визначення відносної усадки: $\varepsilon_{\text{бет.}} = \eta \cdot \varepsilon_{\text{ц.к.}},$ де $\varepsilon_{\text{бет.}}$ - відносна усадка бетону; $\varepsilon_{\text{ц.к.}}$ - відносна усадка цементного каменю $\eta = \frac{1}{S} \left[(S - 1) + \frac{S^2 - 1}{\xi_{n+(S^2-1)}} \right],$ ξ – коефіцієнт, який враховує зчеплення крупного заповнювача і цементного каменю.	(А.46)	Г.Д. Вишневецький	[24]

Кінець таблиці А.3

1	2	3	4
Визначення усадки: $\varepsilon_{cs} \cdot 10^{-6} = 0,24 \cdot B^{3/2} \frac{(1+C/B)^{3/2}}{6+(C/B)^2},$ де B – витрата води; C/B – цементно-водне співвідношення	(A.47)	Є.М. Щербаков	[155]
Визначення усадки: $\varepsilon_{cs} \cdot 10^{-6} = 0,125 \cdot B \sqrt{B},$ де B – витрата води; де B – витрата води;	(A.48)	Є.М. Щербаков	[155]
Визначення усадки: $\varepsilon_{cs} \cdot 10^{-6} = \frac{5 \cdot B/C}{1+m} (667 + C),$ де B/C – водоцементне співвідношення; C – витрата цементу, m – масове співвідношення між заповнювачем та цементом	(A.49)	А. Вельмі	[155]
Визначення усадки: $\varepsilon_{cs} \cdot 10^{-6} = 5500 \cdot \frac{1 + B/C}{1 + B/C + m} \cdot (B/C)^2$ де B/C – водоцементне співвідношення; m – масове співвідношення між заповнювачем та цементом.	(A.50)	Європейський комітет з бетону	[155]
Визначення усадки: $\varepsilon_{yc}^u = k_{m.p.} \cdot \Delta t$ де $k_{m.p.}$ – коефіцієнт термічного розширення бетону; Δt - перепад температур.	(A.51)	Л.Й. Дворкін, О.Л. Дворкін	[21]
Визначення усадки: $\varepsilon_{cs} \cdot 10^{-6} = 300 \cdot \left[0,7 + 0,15 \cdot \left(\frac{C-225}{25} + \frac{B/C-0,4}{0,1} \right) \right],$ де C – витрата цементу; B/C – водоцементне співвідношення;	(A.52)	С.В. Александровського	[155]

Таблиця А.4 — Методи та критерії розрахунку напружень в цементобетонному покритті від дії транспортного навантаження

Методи та критерії	Порядковий номер формули	Автор/дослідник	Посилання
1	2	3	4
Визначення розтягуючого напруження на верхній поверхні плити: $\sigma = \frac{M}{W} = \frac{3Q}{h^2}$ де Q – зосереджене навантаження, яке прикладене до вершини кута цементобетонної плити, h – товщина плити.	(A.53)	Гольдбек-Ольдер	[8]
Визначення максимальних розтягуючих напружень на нижній поверхні плити при дії навантаження в центральній зоні плити: $\sigma_{int} = \frac{3 \cdot Q \cdot (1 + \nu)}{2 \cdot \pi \cdot h^2} \left[\ln \left(\frac{2 \cdot l}{a} \right) + 0,5 - \gamma \right]$ $l = \left[\frac{E \cdot h^3}{12 \cdot (1 - \nu^2) \cdot k} \right]^{1/4},$ де Q – навантаження, Кн; a – радіус навантаження площадки, м; l – радіус відносної жорсткості плити на вінклеровській основі; h – товщина плити; E – модуль пружності матеріалу, МПа; ν – коефіцієнт поперечної деформації матеріалу плити; k – коефіцієнт постелі основи; γ – постійна Ейлера, $\gamma = 0,5772$.	(A.54)	Вестергард	[8,53-55]

Продовження таблиці А.4

1	2	3	4
Максимальні розтягуючі напруження на нижній поверхні плити при дії навантаження на краю плити: $\sigma_e = \frac{3 \cdot (1+\nu)}{\pi \cdot (3+\nu) \cdot h^2} \left[\ln \left(\frac{E \cdot h^3}{100 \cdot k \cdot a^4} \right) + 1,84 - \frac{4 \cdot \nu}{3} + \frac{1-\nu}{2} + \frac{1,18 \cdot (1+2 \cdot \nu) \cdot a}{l} \right],$ Максимальні розтягуючі напруження на верхній поверхні плити при дії навантаження в куті плити: $\sigma_c = \frac{3 \cdot Q}{h^2} \left[1 - \left(\frac{\sqrt{2} \cdot a}{l} \right)^{0,6} \right],$	(A.55) (A.56)	Вестергард	[8,53-55]
Визначення згинаючого моменту плити на пружній основі: $M_{\Gamma\Pi} = Q \left(0,2138 \cdot \lg \left(\frac{l_y}{c} \right) + 0,0592 \right),$ де Q – навантаження; c – радіус кола, по якому розподіляється навантаження;	(A.57)	М.И. Горбунов-Посадов	[8]

Продовження таблиці А.4

1	2	3	4
L_y -пружня характеристика плити; $M_{\Gamma\Pi} = Q \left(0,2138 \cdot \lg \left(\frac{l_y}{c} \right) + 0,0592 \right)$ $L_y = h \left[\frac{E(1 - \nu_0^2)}{6E_0(1 - \nu^2)} \right]^{1/3}$ де E_0 - модуль пружності матеріала основи, ν_0 - коефіцієнт поперечної деформації матеріала основи.	(A.57)	М.И. Горбунов-Посадов	[28]
Визначення розтягуючих напружень на нижній поверхні плити: $\sigma = \frac{6Q(1+\nu)}{4\pi h^2} \left[\ln \left(\frac{h}{a} \left(\frac{E(1-\nu_0^2)}{6E_0(1-\nu^2)} \right)^{1/3} \right) + \ln 2 - \gamma + \frac{1}{2} \right],$ де E_0 – модуль пружності основи, МПа; ν_0 – коефіцієнт поперечної деформації основи.	(A.58)	С. Войновський-Кригер	[61,89]
Розрахунок монолітного цементобетонного покриття, перевірка міцності: $K_{\text{мц}} < \frac{R_1^{\text{розр}}}{\sigma_{pt}}$ де $K_{\text{мц}}$ – коефіцієнт міцності, що визначається залежно від категорії дороги ;	(A.59)		[172]

Кінець таблиці А.4

1	2	3	4
$R_1^{\text{розрах}} -$ розрахункова міцність бетону на розтяг при згині, що визначається згідно з додатком А; σ_{pt} – напруження розтягу при згині, що виникають у бетонному покритті від дії навантаження, з урахуванням перепаду температури по товщині плити. Напруження σ_{pt} (МПа) визначається за такою залежністю: $\sigma_{pt} = \frac{Q_p \times K_m \times 60 \times K_{умв} \times K_{шт} \times (0,0592 - 0,09284 \times \ln(\frac{R}{l_{np}}))}{h^2 \times K_t}$ Q_p - розрахункове навантаження, кН, приймається згідно з таблицею Б ДБН В.2.3-4; h - товщина цементобетонної плити, м; K_m - коефіцієнт, що враховує вплив місця розташування навантаження: для неармованих покриттів $K_m = 1,5$; для покриттів з крайовим армуванням або майданчиків з розташуванням смуг накату не ближче ніж 0,8 м; зовнішнього поздовжнього краю покриття - $K_m = 1,0$ для поздовжнього напрямку і $K_m = 1,5$ для поперечного; $K_{умв}$ - коефіцієнт, що враховує умови роботи, рівний 0,66; $K_{шт}$ - коефіцієнт, що враховує вплив штирових з'єднань на умови контакту плит з основою: при наявності у поперечних швах штирів $K_{шт} = 1$, при відсутності штирів $K_{шт} = 1,05$; R - радіус відбитка колеса, см; l_{np} - пружна характеристика плити, см; K_t - коефіцієнт, що враховує вплив температурного короблення плит і визначається згідно з ГБН В.2.3-37641918-557.	(А.59)		[172]

ДОДАТОК Б

ХАРАКТЕРИСТИКА МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ЛАБОРАТОРНИХ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА СКЛАДИ ДОСЛІДЖУВАНИХ ЦЕМЕНТОБЕТОНІВ

Б.1. Характеристика цементу

В табл. Б .1 наведено дані по випробуванню цементу ПЦ І - 500 Р-Н згідно: ДСТУ Б В.2.7-46 Будівельні матеріали. Цементи загально-будівельного призначення. Технічні умови, ДСТУ Б В.2.7-185 Будівельні матеріали. Цементи. Методи визначення нормальної густоти, строків тужавлення та рівномірності зміни об'єму, ДСТУ Б В.2.7-187 Будівельні матеріали. Цементи. Методи визначення міцності на згин і стиск, ДСТУ Б В.2.7-188 Будівельні матеріали. Цементи. Методи визначення тонкості помелу.

Таблиця Б.1 — Результати випробувань цементу

Вид випробування	Одиниці вимірювання	Показники	
Температура повітря	° С	20	
Вологість	%	0,2	
Насипна щільність	кг/м ³	981	
Істинна щільність	г/см ³	3059	
Питома поверхня	см ² /Г	3870	
Залишок на ситі № 008	%	0,1	
Залишок на ситі № 0045	%	2,6	
Водовідділення	%	10,5	
Нормальна густота	%	29,5	
Розплив конуса	мм	114	
Рівномірність зміни об'єму		Відповідає	
Строки тужавіння	год:хв	початок	кінець
		2:20	3:55
Водоцементне відношення	в/ц	0,39	
R _{зг} ^{2 доба}	МПа	6,8	
R _{ст} ^{2 доба}		32,2	
R _{зг} ^{7 доба}		7,2	
R _{ст} ^{7 доба}		42,7	
R _{зг} ^{28 доба}		8,1	
R _{ст} ^{28 доба}		53,0	
Міцність на 28 добу відповідає марці цементу ПЦ І - 500 Р-Н згідно [4].			

Б.2. Характеристика щебеню

Випробування проведені згідно ДСТУ Б В.2.7-71 Будівельні матеріали. Щебінь і гравій із щільних гірських порід і відходів промислового виробництва для будівельних робіт. Методи фізико-механічних випробувань. В табл. Б.2, Б.3 наведені результати по визначенню гранулометричного складу та фізико-механічних показників щебеню фр. 10-20 мм. На рисунку Б.1 показано гранулометричний склад та порівняно з верхньою та нижньою межами.

Таблиця Б.3 — Гранулометричний склад щебеню фракції 10 – 20 мм

Розмір отворів контрольних сит, мм	Часткові залишки		Повні залишки, %	Прохід крізь сито, %
	г	%		
25	0,00	0,00	0,00	100,00
20	652,00	6,52	6,52	93,48
15	5380,00	53,80	60,32	39,68
12,5	2272,00	22,72	83,04	16,96
10	1320,00	13,20	96,24	3,76
7,5	230,00	2,30	98,54	1,46
5	20,00	0,20	98,74	1,26
2,5	0,00	0,00	98,74	1,26
1,25	0,00	0,00	98,74	1,26
0,63	0,00	0,00	98,74	1,26
0	126,00	1,26	100,00	0,00
	10000,00			

Таблиця Б.4 — Фізико-механічні випробування щебеню фр. 10 – 20 мм

Вид випробування	Одиниці вимірювання	Показники
Вологість	%	0
Насипна щільність	кг/м ³	1380
Дійсна щільність	г/см ³	2,63
Середня щільність	кг/м ³	2571
Пустотність	%	46,3
Вміст пиловидних і глинистих часток	%	0,4
Вміст глини у грудках	%	0
Вміст зерен пластинчастої та голчастої форми,	%	10

Щебінь фр. 10 – 20 відповідає вимогам [47].

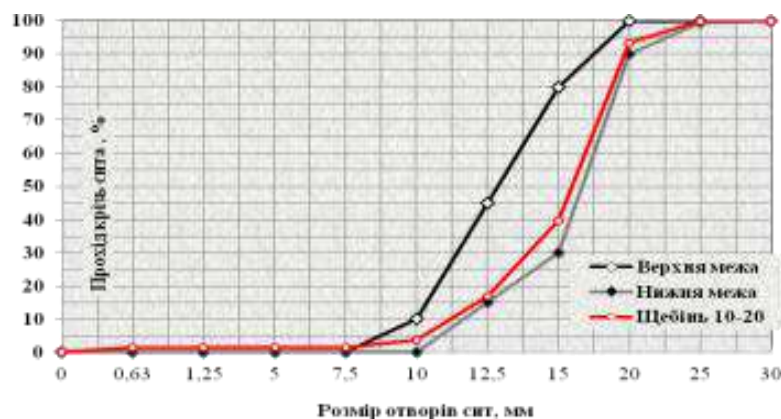


Рисунок Б.1 — Крива розсіву щебеню фр. 10 – 20 мм

В табл. Б.4 — Б.5 наведені результати по визначенню гранулометричного складу та фізико-механічних показників щебеню фр. 5 – 10 мм. На рис. Б.2 показано гранулометричний склад та порівняно з верхньою та нижньою межами.

Таблиця Б.4 — Гранулометричний склад щебеню фракції 5 – 10 мм

Розмір отворів контрольних сит, мм	Часткові залишки		Повні залишки, %	Прохід крізь сито, %
	г	%		
12,5	0,00	0,00	0,00	100,00
10	231,00	4,62	4,62	95,38
7,5	1751,00	35,02	39,64	60,36
5	2524,00	50,48	90,12	9,88
2,5	258,00	5,16	95,28	4,72
1,25	25,00	0,50	95,78	4,22
0,63	0,00	0,00	95,78	4,22
0	211,00	4,22	100,00	0,00
	5000,00			

Таблиця Б.5 — Фізико-механічні випробування щебеню фр. 5 – 10 мм

Вид випробування	Одиниці вимірювання	Показники
Вологість	%	0
Насипна щільність	кг/м ³	1430
Дійсна щільність	г/см ³	2,63
Середня щільність	кг/м ³	2583
Пустотність	%	44,6
Вміст пиловидних і глинистих часток	%	0,7

Щебінь фр. 5 – 10 відповідає вимогам [87].

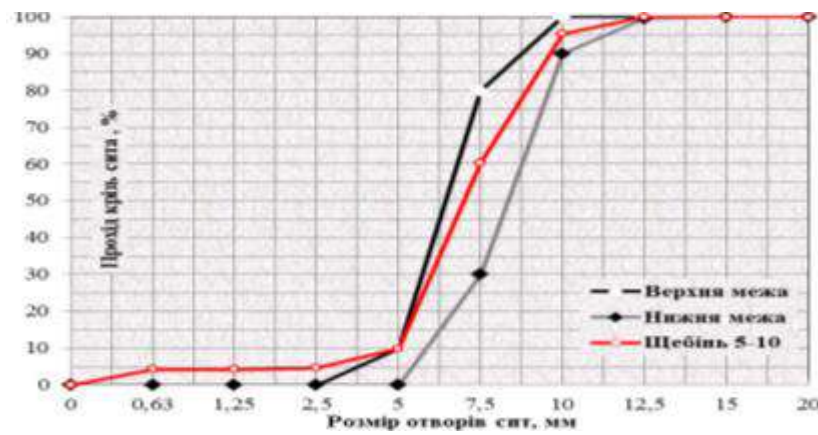


Рисунок Б.2 — Крива розсіву щебеню фр. 5 – 10 мм

Б.3. Характеристика піску

Випробування проведені згідно ДСТУ Б В.2.7-32 Будівельні матеріали. Пісок щільний природний для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій і робіт. В табл. Б.6 — Б.7 наведені результати по визначенню гранулометричного складу та фізико-механічних показників піску. На рис. Б.3 показано гранулометричний склад.

Таблиця Б.6 — Гранулометричний склад щебеню фракції 5 – 10 мм

Розмір отворів контрольних сит, мм	Часткові залишки		Повні залишки, %	Прохід крізь сито, %
	г	%		
5	0,00	0,00	0,00	100,00
2,5	0,00	0,00	0,00	100,00
1,25	0,00	0,00	0,00	100,00
0,63	116,00	5,80	5,80	94,20
0,315	730,00	36,50	42,30	57,70
0,14	976,00	48,80	91,10	8,90
0	178,00	8,90	100,00	0,00
	2000			

Таблиця Б.7 — Фізико-механічні випробування піску

Вид випробування	Одиниці вимірювання	Показники
Вологість	%	4,1
Насипна щільність	кг/м ³	1551
Дійсна щільність	г/см ³	2,63
Модуль крупності		1,4
Пустотність	%	41,1
Вміст пиловидних і глинистих часток	%	0,4
Гр. 10	%	0,0
Гр.5	%	0,1

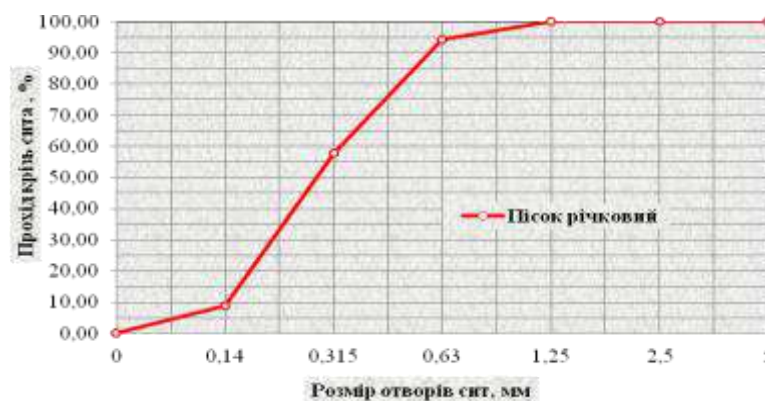


Рисунок Б.3 — Крива розсіву піску

Таблиця Б.8 — Характеристики добавок для цементобетону типу «ШАГ»

ч/ч	Назва показника	Значення показника для добавки типу	
		ШАГ ПА SP-1М	ШАГ ПА SR-3М
1	2	3	4
2	Однорідність	Однорідна рідина без сторонніх включень, допустимий осад	Однорідна рідина без сторонніх включень, допустимий осад
3	Колір	Від світло-коричневого до темно-коричневого	Від світло-коричневого до темно-коричневого
4	Запах	Слабко виражений (поліакрилату)	Слабко виражений (поліакрилату)
5	Ефективний компонент	Поліакрилат	Поліакрилат
6	Відносна густина	$1,09 \pm 0,05$	$1,1 \pm 0,05$
7	Вміст сухої речовини, % за масою	$32,0 \pm 0,5$	$27,0 \pm 0,5$
8	Водневий показник, рН	$7,0 \pm 1,0$	$7,0 \pm 1,0$
9	Розчинний у воді хлорид (Cl), % за масою	Не вище 0,1	Не вище 0,1
10	Вміст лугу (Na_2O еквівалент), % за масою	Не вище 2,0	Не вище 2,0

Таблиця Б.9 — Склади цементобетону для покриття автомобільних доріг для проведення оптимізації складу

Найменування	Склад 1	Склад 2	Склад 3	Склад 4	Склад 5	Склад 6	Склад 7	Склад 8	Склад 9
Цемент ПЦ І – 500 Р-Н, кг/м ³	325	350	375	325	350	375	325	350	375
Пісок, кг/м ³	750	760	725	760	750	725	760	750	725
Щебінь 5 – 10, кг/м ³	347	347	347	347	347	347	347	347	347
Щебінь 10 – 20, кг/м ³	806	806	806	806	806	806	806	806	806
Добавка, %	1,00	1,00	1,00	1,10	1,10	1,10	1,20	1,20	1,20
Вода, л	133	131	134	133	137	137	128	130	130

ДОДАТОК В

**РЕЗУЛЬТАТИ ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ ВИТРАТИ КОМПЛЕКСНОЇ ХІМІЧНОЇ ДОБАВКИ І ЦЕМЕНТУ НА
ТЕХНОЛОГІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЦЕМЕНТОБЕТОННОЇ СУМІШІ, НА МІЦНІСТЬ, МОДУЛЬ ПРУЖНОСТІ,
ТРІЩИНОСТІЙКІСТЬ ЦЕМЕНТОБЕТОНУ ДЛЯ ПОКРИТТЯ АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ**

Таблиця В.1 — Результати визначення впливу витрати комплексної хімічної добавки і цементу на технологічні властивості цементобетонної суміші

Склади цементобетонів	В/Ц	Вміст залученого повітря в цементобетонній суміші, %			Легкоукладальність цементобетонної суміші, см		
		Відразу після перемішування суміші	60 хв.	120 хв.	Відразу після перемішування суміші	60 хв.	120 хв.
1	0,415	4,35	4,00	4,55	3,0	2,5	2,0
2	0,391	4,55	4,40	4,75	3,5	2,5	1,5
3	0,371	4,60	4,65	4,80	4,0	3,0	2,0
4	0,403	5,49	4,07	4,90	4,5	4,0	3,5
5	0,380	5,10	5,25	6,00	4,0	3,5	3,0
6	0,357	4,90	5,30	6,20	4,5	4,5	3,0
7	0,394	6,15	5,44	5,90	4,0	3,5	3,0
8	0,371	6,00	5,76	6,14	4,0	4,0	3,0
9	0,349	5,85	6,00	6,35	4,5	4,0	3,0

Таблиця В.2 — Результати визначення впливу витрати комплексної хімічної добавки і цементу на міцність цементобетону для покриття автомобільних доріг

Склади цементобетонів	Міцність на розтяг при згині призм 100x100x400, МПа				Міцність при стиску зразків кубів 100x100x100, МПа				Міцність при стиску зразків призм 100x100x400, МПа			
	1	3	7	28	1	3	7	28	1	3	7	28
1	3,2	4,2	4,6	5,7	25,2	37,4	44,2	60,2	19,7	29,3	34,6	47,1
2	3,4	4,4	4,8	5,8	27,1	40,1	47,2	61,8	21,2	31,4	37,0	48,4
3	3,4	4,5	5,0	5,9	28,1	42,2	48,9	63,4	22,0	33,0	38,3	49,6
4	3,2	4,2	4,7	5,9	25,8	37,4	45,6	62,7	20,2	29,3	35,7	49,1
5	3,4	4,3	4,9	6,1	27,3	39,2	48,6	65,9	21,4	30,7	38,1	51,6
6	3,4	4,4	5,0	6,1	28,2	41,1	48,7	67,2	22,1	32,2	38,1	52,6
7	3,2	4,1	4,7	5,9	25,6	36,2	45,2	64,1	20,0	28,3	35,4	50,2
8	3,4	4,3	5,0	6,1	27,9	39,1	48,9	66,8	21,8	30,6	38,3	52,3
9	3,5	4,5	5,1	6,2	29,4	41,9	51,4	67,9	23,0	32,8	40,2	53,2

Таблиця В.3 — Результати визначення впливу витрати комплексної хімічної добавки і цементу на значення модуля пружності цементобетону для покриття автомобільних доріг

Склади цементобетонів	Модуль пружності, МПа			
	1	3	7	28
1	27187	32199	34202	37625
2	28128	33046	34963	37896
3	28595	33656	35366	38157
4	27492	32199	34566	38044
5	28223	32772	35296	38547
6	28641	33342	35319	38741
7	27391	31797	34463	38269
8	28503	32741	35366	38682
9	29176	33572	35925	38843

ДОДАТОК Г

РЕЗУЛЬТАТИ ЧИСЛОВОГО МОДЕЛЮВАННЯ

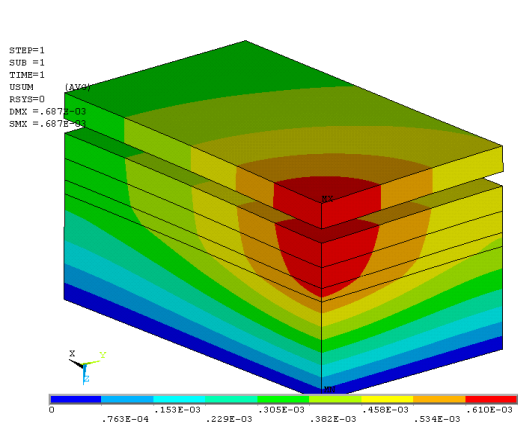
Таблиця Г.1 — Максимальні та мінімальні значення складових переміщень вузлів скінченоелементної моделі конструкції

Варіант транспортного навантаження	Товщина бетонної плити, см	Переміщення вузлів моделі конструкції				
		u_x , мм		u_y , мм		u_z , мм
		min	max	min	max	max
1	2	3	4	5	6	7
№1	18	-0,0191	0,0513	-0,017	0,0354	0,687
	20	-0,0176	0,0459	-0,015	0,0294	0,66
	22	-0,0164	0,0415	-0,0132	0,0245	0,64
	24	-0,0154	0,0378	-0,0117	0,0205	0,624
	26	-0,0145	0,0345	-0,0105	0,0173	0,613
№2	18	-0,0613	0,0626	-0,0237	0,0549	0,835
	20	-0,0595	0,0556	-0,0214	0,0481	0,794
	22	-0,058	0,0498	-0,0196	0,0424	0,763
	24	-0,0565	0,0454	-0,018	0,0375	0,739
	26	-0,0555	0,0421	-0,0166	0,0334	0,72
№3	18	-0,0621	0,0688	-0,0224	0,0428	0,861
	20	-0,0599	0,0624	-0,0199	0,0356	0,823
	22	-0,0574	0,0573	-0,0177	0,03	0,795
	24	-0,0557	0,0528	-0,0158	0,0253	0,772
	26	-0,0541	0,0493	-0,0143	0,0216	0,754
№4	18	-0,0446	0,0724	-0,0584	0,0692	0,978
	20	-0,0419	0,0647	-0,0567	0,0611	0,923
	22	-0,0395	0,058	-0,055	0,0542	0,878
	24	-0,0373	0,0524	-0,0533	0,0483	0,841
	26	-0,0355	0,0476	-0,0517	0,436	0,811

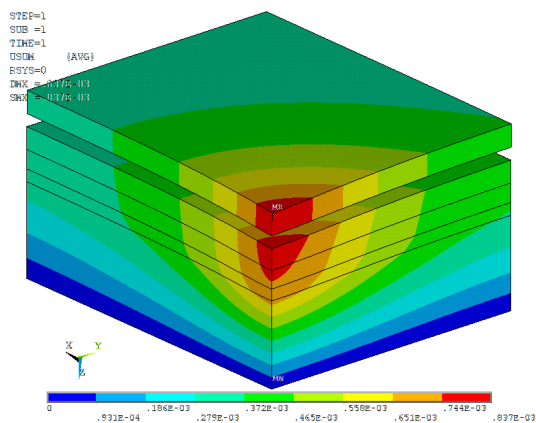
Таблиця Г.2 — Максимальні значення складових тензора напружень та максимальні еквівалентні напруження за Мізесом в елементах скінченно-елементної моделі конструкції цементобетонного покриття

Варіант транспортного навантаження	Товщина бетонної плити, см	Максимальні значення складових тензора напружень в елементах скінченно-елементної моделі									Еквівалентні напруження за Мізесом
		σ_x , МПа		σ_y , МПа		σ_z , МПа		τ_{xy} , МПа	τ_{yz} , МПа	τ_{xz} , МПа	σ_{Miz} , МПа
		стиск.	розтяг	стиск.	розтяг	стиск.	розтяг	max	max	max	
№1	18	-3,19	2,94	-3,08	2,85	-1,04	0,0739	0,451	0,578	0,57	2,98
	20	-2,79	2,53	-2,67	2,43	-1,03	0,0644	0,374	0,523	0,516	2,55
	22	-2,48	2,21	-2,35	2,09	-1,02	0,0552	0,334	0,476	0,47	2,21
	24	-2,23	1,94	-2,09	1,81	-1,01	0,0464	0,306	0,436	0,432	1,93
	26	-2,03	1,71	-1,88	1,58	-1,01	0,0379	0,284	0,405	0,401	1,73
№2	18	-0,598	0,645	-3,13	3	-1,05	0,0585	0,78	1,04	0,5	3,05
	20	-0,521	0,562	-2,73	2,57	-1,03	0,0536	0,675	0,908	0,457	2,63
	22	-0,457	0,493	-2,41	2,22	-1,03	0,0507	0,594	0,805	0,424	2,26
	24	-0,407	0,445	-2,16	1,94	-1,01	0,0476	0,531	0,722	0,403	1,97

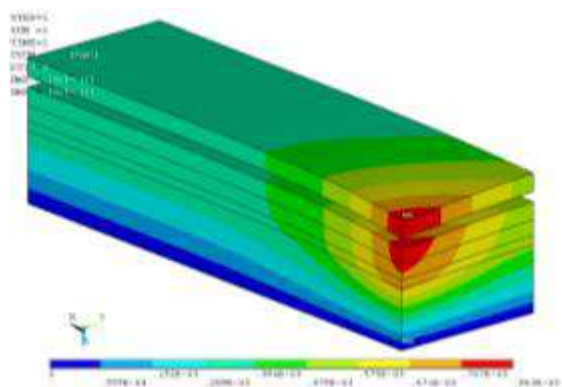
	26	-0,365	0,432	-1,95	1,7	-1	0,0444	0,481	0,652	0,386	1,8
№3	18	-0,635	0,689	-3,06	2,92	-1,04	0,0727	0,782	1,06	0,426	2,98
	20	-0,562	0,612	-2,65	2,48	-1,03	0,0633	0,678	0,926	0,39	2,53
	22	-0,509	0,554	-2,32	2,13	-1,03	0,0543	0,599	0,819	0,359	2,17
	24	-0,457	0,501	-2,06	1,84	-1	0,0456	0,538	0,731	0,337	1,88
	26	-419	0,459	-1,85	1,6	-1	0,0373	0,489	0,659	0,318	1,63
№4	18	-0,716	0,749	-0,729	0,75	-1,05	0,0842	1,05	0,91	0,992	1,83
	20	-0,614	0,646	-0,627	0,648	-1,04	0,0671	0,92	0,794	0,861	1,6
	22	-0,531	0,562	-0,544	0,562	-1,05	0,0609	0,811	0,702	0,76	1,42
	24	-0,463	0,494	-0,473	0,489	-1,06	0,0548	0,725	0,629	0,683	1,32
	26	-0,408	0,437	-0,414	0,427	-1,07	0,0488	0,654	0,571	0,624	1,24



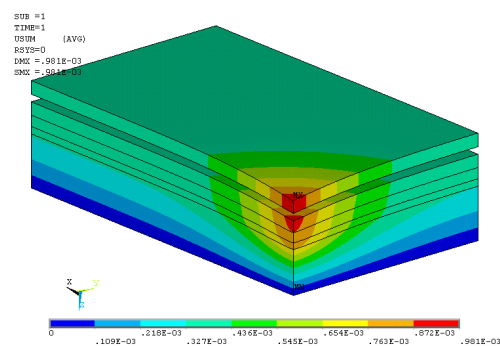
а



б

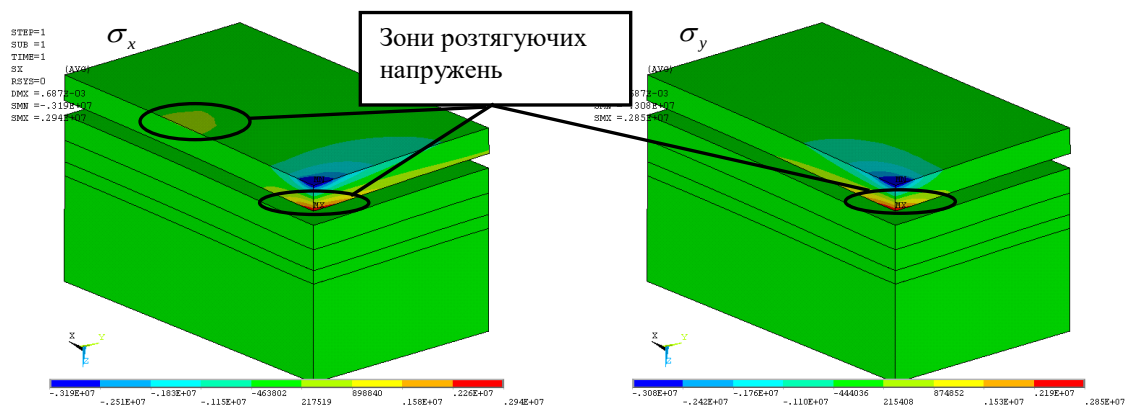


в

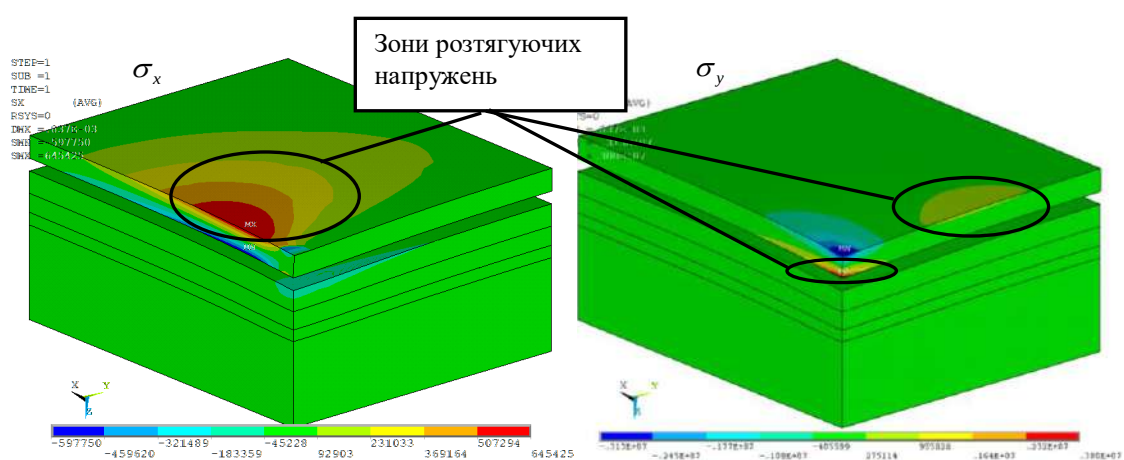


г

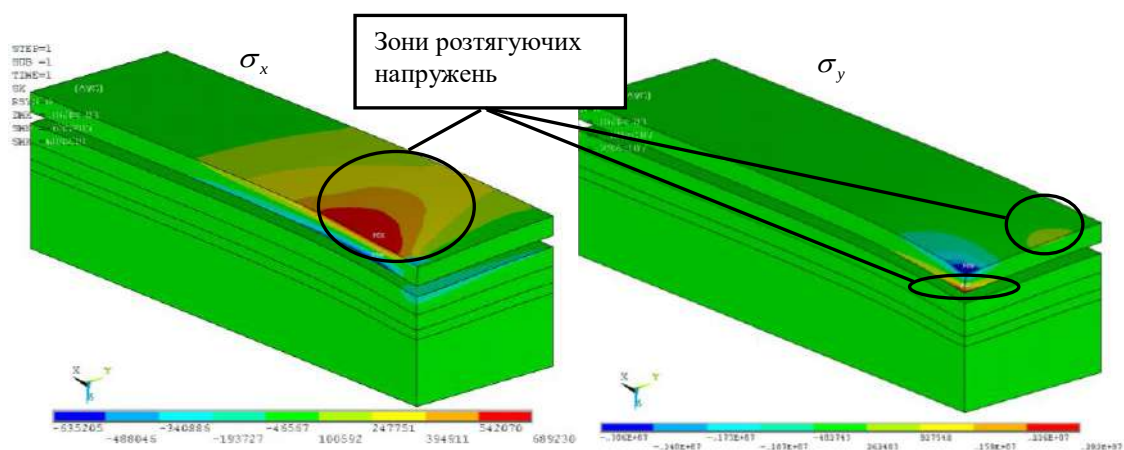
Рисунок Г.4 — Поле повних переміщень вузлів моделі для різних варіантів розміщення транспортного навантаження (Варіант №1 (а), варіант № 2 (б), варіант №3 (в), варіант № 4 (г))



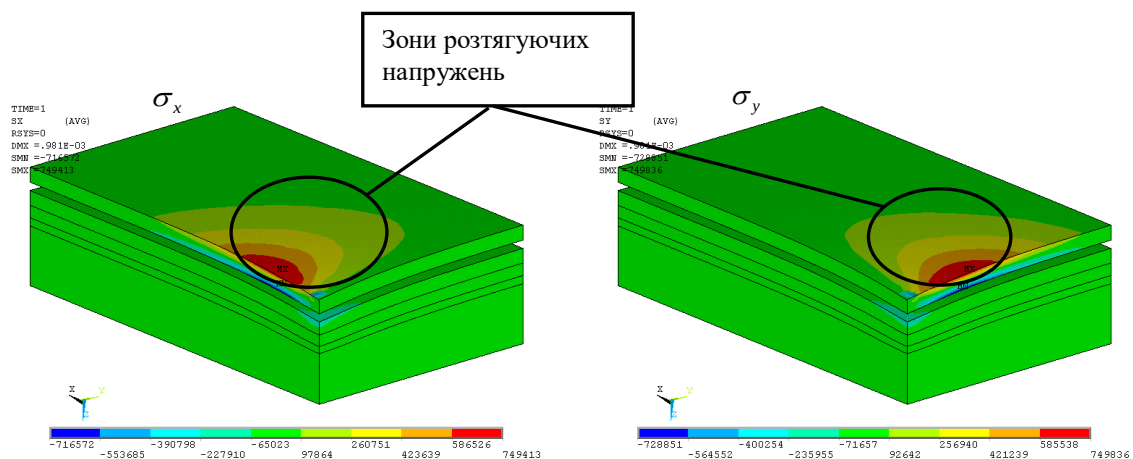
a



б

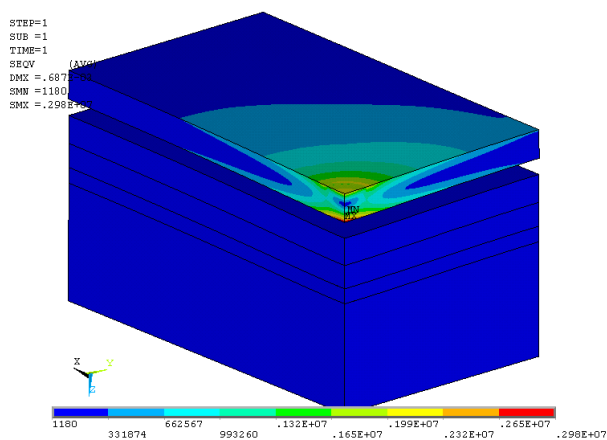


в

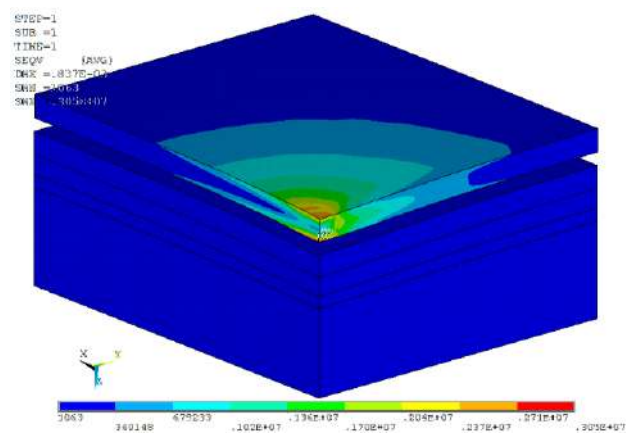


Г

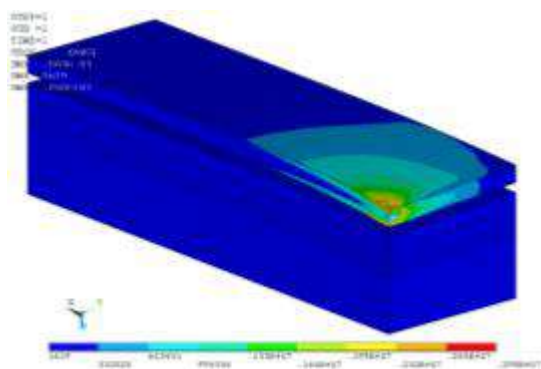
Рисунок Г.5 — Зони розтягуючих напружень σ_x та σ_y в елементах моделі для різних варіантів розміщення транспортного навантаження (Варіант №1 (а), варіант №2 (б), варіант №3 (в), варіант №4 (г))



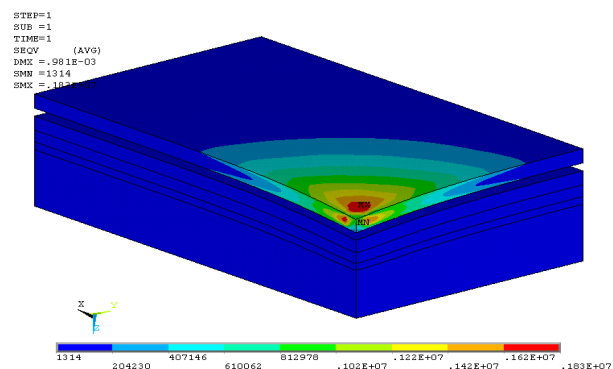
а



б



в



г

Рисунок Г.6 — Характер розподілу еквівалентних напружень за Мізесом в елементах моделі для різних варіантів розміщення транспортного навантаження (Варіант №1 (а), варіант №2 (б), варіант №3 (в), варіант №4 (г))

В табл. Г.3 наведено максимальні та мінімальні значення складових переміщень вузлів скінченно-елементної моделі конструкції для варіанту транспортного навантаження, коли відбиток колеса знаходиться в центрі цементобетонної плити при різних значеннях модуля пружності та товщинах цементобетонної плити.

Таблиця Г.3 — Максимальні та мінімальні значення складових переміщень вузлів скінченно-елементної моделі конструкції для варіанту транспортного навантаження № 1 при різних значеннях модуля пружності та товщини цементобетонної плити

Модуль пружності цементобетонної плити (МПа)	Товщина бетонної плити, см	Переміщення вузлів моделі конструкції				
		u_x , мм		u_y , мм		u_z , мм
		min	max	min	max	max
25000	18	-0,0213	0,0546	-0,0192	0,0394	0,709
	22	-0,0182	0,0443	-0,0151	0,0276	0,658
	26	-0,016	0,0371	-0,0121	0,0198	0,628
30000	18	-0,0191	0,0513	-0,017	0,0354	0,687
	22	-0,0164	0,0415	-0,0132	0,0245	0,64
	26	-0,0145	0,0345	-0,0105	0,0173	0,613
35000	18	-0,0175	0,0485	-0,0152	0,0324	0,669
	22	-0,015	0,0392	-0,0118	0,022	0,625
	26	-0,0133	0,0325	-0,0092	0,0154	0,601
40000	18	-0,0162	0,0462	-0,0138	0,0299	0,654
	22	-0,0139	0,0374	-0,0106	0,0201	0,613
	26	-0,0124	0,0308	-0,0082	0,0139	0,591

В табл. Г.4 наведено значення складових тензора напружень та максимальні еквівалентні напруження за Мізесом в елементах скінченно-елементної моделі конструкції цементобетонного покриття для варіанту транспортного навантаження при змінних значеннях модуля пружності та різних товщинах.

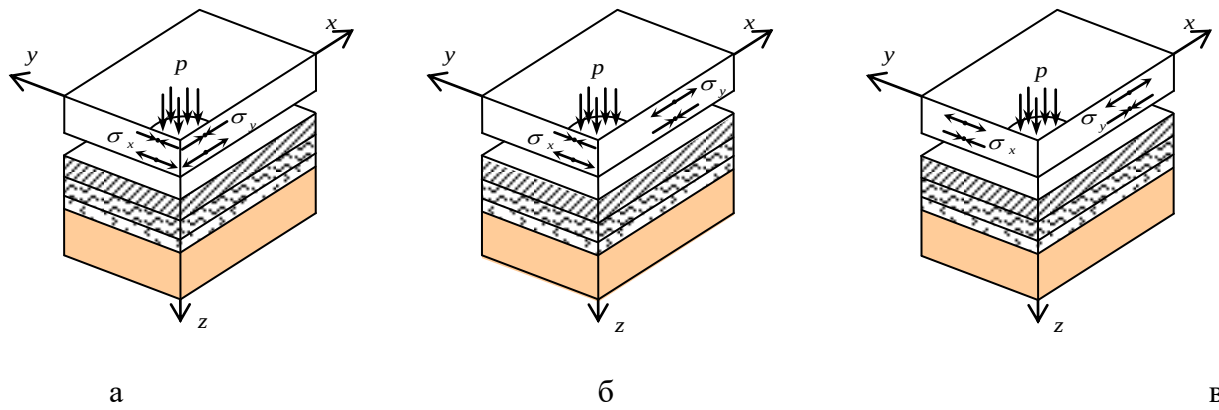


Рисунок Г.7 — Схема розташування розтягуючих напружень при різних положеннях транспортного навантаження

Таблиця Г.4 — Максимальні значення складових тензора напружень та максимальні еквівалентні напруження за Мізесом в елементах скінченно-елементної моделі конструкції цементобетонного покриття для варіанту транспортного навантаження № 1 при різних значеннях модуля пружності та товщини плити

Модуль пружності бетонної плити (МПа)	Товщина бетонної плити, см	Максимальні значення складових тензора напружень в елементах скінченно-елементної моделі									Еквівалентні напруження за Мізесом σ_{Mis} , МПа
		σ_x , МПа		σ_y , МПа		σ_z , МПа		τ_{xy} , МПа	τ_{yz} , МПа	τ_{xz} , МПа	
		стиск.	розтяг.	стиск.	розтяг.	стиск.	розтяг.	max	max	max	max
25000	18	-3,07	2,82	-2,99	2,75	-1,04	0,0737	0,444	0,573	0,565	2,87
	22	-2,4	2,12	-2,29	2,03	-1,02	0,0551	0,333	0,473	0,468	2,14
	26	-1,98	1,65	-1,85	1,54	-1,01	0,0378	0,284	0,403	0,4	1,65
30000	18	-3,19	2,94	-3,08	2,85	-1,04	0,0739	0,451	0,578	0,57	2,98
	22	-2,48	2,21	-2,35	2,09	-1,02	0,0552	0,334	0,476	0,47	2,21
	26	-2,03	1,71	-1,88	1,58	-1,01	0,0379	0,284	0,405	0,401	1,73
35000	18	-3,28	3,04	-3,16	2,94	-1,04	0,0742	0,457	0,582	0,574	3,06
	22	-2,55	2,28	-2,39	2,15	-1,02	0,0554	0,335	0,478	0,473	2,27
	26	-2,08	1,77	-1,91	1,62	-1,01	0,038	0,285	0,406	0,402	1,74
40000	18	-3,37	3,13	-3,23	3,01	-1,04	0,0743	0,461	0,585	0,577	3,14
	22	-2,61	2,34	-2,43	2,19	-1,02	0,0555	0,336	0,48	0,475	2,32
	26	-2,13	1,81	-1,93	1,64	-1,01	0,0381	0,285	0,407	0,403	1,78

На рис. Г.7 зображено схематичне розташування максимальних розтягуючих напружень σ_x та σ_y при різних варіантах транспортного навантаження [105]. При дії варіанту транспортного навантаження № 1 напруження в цементобетонній плиті під штампом розподіляються

наступним чином – верхні шари стиснуті, а нижні розтягнуті (рис. 3.57, а) [105].

При дії варіантів № 2 та № 3 характер розподілу напружень в цементобетонній плиті схожий. У верхніх шарах під штампом σ_x стискаючі, а в нижніх – розтягуючі, зовні штампа у верхніх шарах σ_y – розтягуючі, а в нижніх – стискаючі (рис. Г.7, б). При дії варіанту № 4 максимальні розтягуючі напруження розташовані зовні штампу у верхніх шарах цементобетонної плити (рис. Г.7 , в) [105].

ДОДАТОК Д

РЕЗУЛЬТАТИ СТЕНДОВИХ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Технологія операції послідовності влаштування цементобетонного покриття
на кільцевому стенді дп дорякість



Рисунок Д. 1 – Зняття верхнього шару старого покриття дорожньою фрезою



Рисунок Д. 2 – Фрезування покриття паралельними проходами фрези



Рисунок Д. 3 – Складування матеріалів фрезування асфальтобетонного шару старого покриття



Рисунок Д. 4 – Вигляд дослідної ділянки після фрезування



Рисунок Д. 5 – Розбирання нижнього шару старого асфальтобетонного покриття



Рисунок Д. 6 – Вигляд експериментальної ділянки після видалення старого асфальтобетонного покриття



Рисунок Д. 7 – Поглиблення корита до заданої відмітки



Рисунок Д.8 – Видалення матеріалів старого покриття бабкетом



Рисунок Д.9 – Планування корита ковшом бабкета



Рисунок Д.10 – Вигляд на корито підготовлене до влаштування експериментальних шарів дорожнього одягу



Рисунок Д.11– Армуюча базальтова сітка на секції 4



Рисунок Д.12 – Армуюча базальтова сітка на секції 4



Рисунок Д.13 – Армуюча базальтова сітка на секції 4



Рисунок Д.14 – Армуюча базальтова сітка на секції 4



Рисунок Д.15 – Армуюча базальтова сітка на секції 4



Рисунок Д.16 – Заливка цементобетонною сумішшю на 1-5 секторах



Рисунок Д. 17 – Перевірка рівності поверхні цементобетонного покриття на 5-му секторі



Рисунок Д. 18 – Вигляд бетонної поверхні на секторах 1- 5 після закінчення її планування



Рисунок Д.19 – Накриття бетонного шару на секторі 1 захистною плівкою



Рисунок Д.20 – Накриття щебеневої основи на секторах 6-10 поліетиленовою плівкою перед заливкою бетонною сумішшю



Рисунок Д.21 – Перегородки між секторами



Рисунок Д.22 – Укладання бетонної суміші на 6-10 секторах



Рисунок Д.23 – Укладання бетонної суміші на 6-10 секторах



Рисунок Д.24 – Вигляд експериментальних секторів після закінчення укладання бетону



Рисунок Д. 25 – Вигляд секторів під захистною плівкою у процесі набору міцності



Рисунок Д.26 – Вигляд готової бетонної основи після набору міцності



Рисунок Д.27 – Видалення цементного молока на секторі 3



Рисунок Д.28 – Видалення цементного молока пешано-струйним методом



Рисунок Д. 29 – Відбір кернів на експериментальних секторах



Рисунок Д.30 – Керн 1-В відібраний з покриття на секторі 1

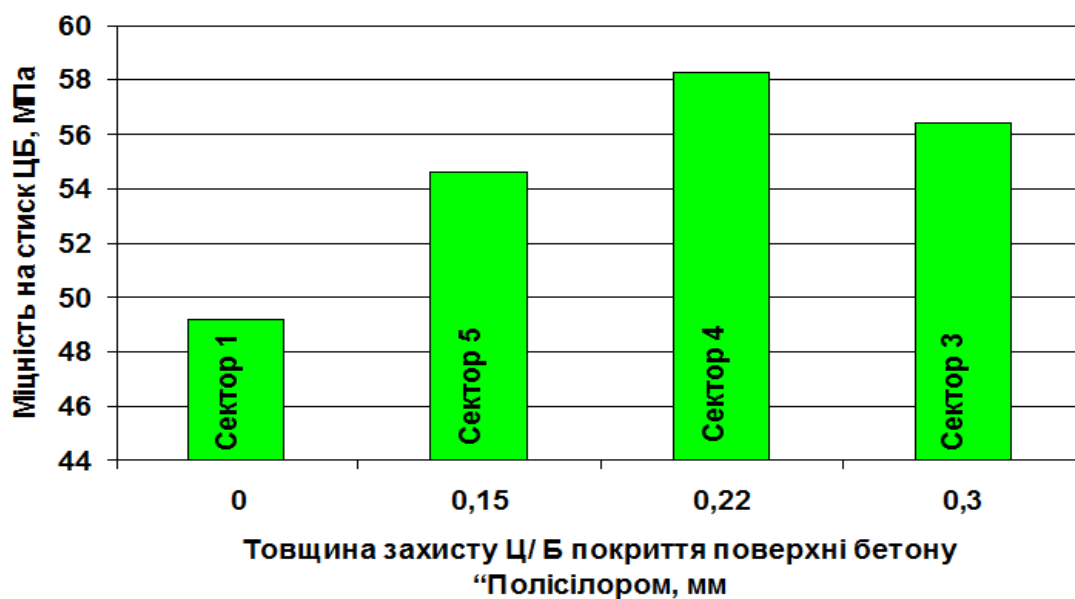


Рисунок Д.31 — Залежність міцності ц/б від товщини шару сілор ультра км

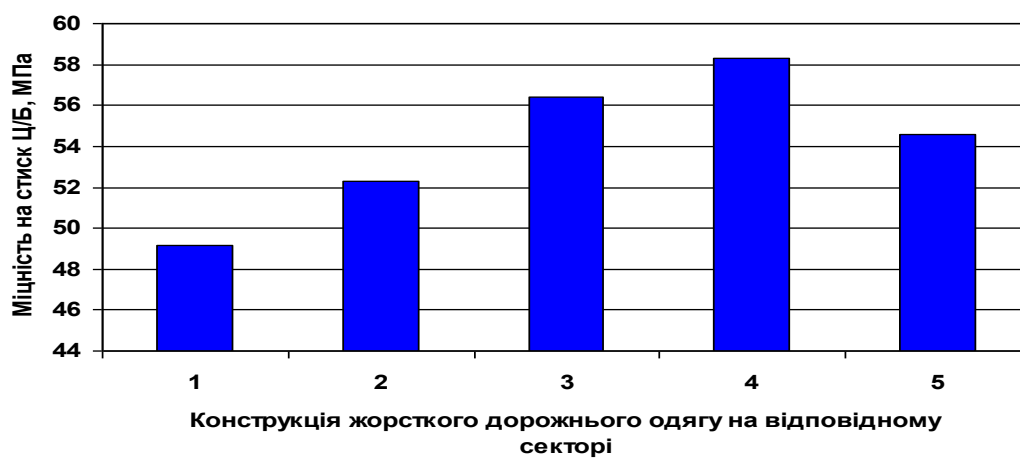


Рисунок Д.31 — Залежність міцності ц/б від виду конструкції жорсткого дорожнього одягу конструкції жорсткого дорожнього одягу

ДОДАТОК Е

ПРИКЛАД РОЗРАХУНКУ ДОВГОВІЧНОСТІ ЦЕМЕНТОБЕТОННОГО ПОКРИТТЯ АВТОМОБІЛЬНОЇ ДОРОГИ З ВИКОРИСТАННЯМ КОМПЛЕКСНОЇ ХІМІЧНОЇ ДОБАВКИ З УРАХУВАННЯМ СПІЛЬНОГО ВПЛИВУ УСАДКИ ЦЕМЕНТОБЕТОНУ, ЗМІНИ ТЕМПЕРАТУРИ ТА ДІЇ ПНЕВМАТИЧНИХ КОЛІС ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

Потрібно запроектувати конструкцію дорожнього з цементобетонним покриттям для автомобільної дороги І-ї категорії, яка пролягає у північно-східному районі А-2.

Вихідні данні:

- ширина проїзної частини в одному напрямку – 7,5 м;
- ширина земляного полотна (враховуючи узбіччя) – 15 м;
- розрахункова тривалість служби цементобетонного покриття – 25 років;
- розрахункове навантаження на дорожній одяг $Q_p=50$ кН, $Q_p=65$ кН;
- тиск в шинах – $p=0,6$ МПа;
- інтенсивність руху приймаємо $N_p=2000$ од/доб;
- показник щорічного приросту інтенсивності руху $q=1.05$;
- ґрунт земляного полотна – супісок легкий;
- розрахункова відносна вологість ґрунту з.п. – $W_p=0,60 \cdot W_T$;
- глибина промерзання – 65 см;
- глибина залягання рівня ґрунтових вод – 1,5 м;
- матеріал покриття – цементобетон $B_{btb} 4,4$ МПа;
- параметри функції довговічності цементобетону $lg B_r = 17,490 \cdot C \cdot \text{МПа}$, $b_r = 18,18$, $m = 1/b_r = 0,055$.
- коефіцієнт лінійного температурного розширення цементобетону: $\alpha_{ub} = 10^{-5} 1/^\circ C$;

- матеріал основи – щебінь з заклинком металургійним шлаком
- нижній шар – пісковиковий відсів.

При конструюванні цементобетонного покриття дорожнього одягу обираємо наступні товщини шарів:

- відсів – 15 см;
- щебінь з заклинком металургійним шлаком – 18 см;
- вирівнюючий шар з піску, який оброблений органічним в'язучим - 3 см;
- монолітний цементобетон 22 см;

Товщину вирівнюючого шару призначають конструктивно і у розрахунку не приймають до уваги.

Розрахункові характеристики матеріалів дорожнього одягу та ґрунту наступні:

- цементобетон класу B_{btb} 4,4 МПа; $E_6 = 36000$ МПа;
- щебінь з заклинком металургійним шлаком – $E_2 = 400$ МПа
- відсів - $E_3 = 150$ МПа; $c = 0,03$; $\varphi = 40^\circ$;
- ґрунт земляного полотна при $W_p = 0,60 \cdot W_T$; $E_3 = 48$ МПа; $c = 0,023$; $\varphi = 20^\circ$;

Визначення міри пошкодження цементобетонного покриття автомобільних доріг від усадки бетону при твердінні

Визначаємо напруження від усадки в цементобетонному покритті при тужавінні та твердінні з можливістю коробитися:

$$\begin{aligned} \sigma_w(y, W) = & \frac{\alpha \cdot E \cdot t \cdot (m - m_1)}{1 - \mu} \cdot \left(\frac{y}{h} - 0,5 \right) + \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{2 \cdot h^2 \cdot \alpha \cdot E \cdot (m + m_1)}{\pi^3 \cdot n^3 \cdot a_1 \cdot (1 - \mu)} \cdot \\ & \cdot \left\{ \sin \frac{\pi \cdot n \cdot y}{h} - \frac{2}{\pi \cdot n} - e^{-\frac{a_1 \cdot t \cdot (\pi \cdot n)^2}{h^2}} \right\} + \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{2 \cdot h^2 \cdot \alpha \cdot E}{\pi^3 \cdot n^3 \cdot a_1 \cdot (1 - \mu)} \cdot e^{-\frac{a_1 \cdot t \cdot (\pi \cdot n)^2}{h^2}} \cdot \left\{ \frac{2 \cdot m}{\pi \cdot n} + \frac{2 \cdot m_1}{\pi \cdot n} \right\} + \\ & + \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} \frac{2 \cdot h^2 \cdot \alpha \cdot E \cdot (m - m_1)}{\pi^3 \cdot n^3 \cdot a_1 \cdot (1 - \mu)} \cdot \left(\sin \frac{\pi \cdot n \cdot y}{h} - e^{-\frac{a_1 \cdot t \cdot (\pi \cdot n)^2}{h^2}} \right) - \frac{12 \cdot (1 - C_x) \cdot \left(\frac{h}{2} - z \right) \cdot \alpha \cdot E}{(1 - \mu)} \cdot \\ & \cdot \left[-\frac{h^2 \cdot t \cdot (m - m_1)}{12} + \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{h^4}{\pi^3 \cdot n^3 \cdot a_1} \cdot \left\{ \frac{m}{\pi \cdot n} \right\} + \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} \frac{h^4}{\pi^3 \cdot n^3 \cdot a_1} \cdot \right. \\ & \cdot \left. \left\{ \frac{2 \cdot m}{\pi \cdot n} - \frac{2 \cdot m}{\pi \cdot n} \cdot e^{-\frac{a_1 \cdot t \cdot (\pi \cdot n)^2}{h^2}} - \frac{2 \cdot m_1 \cdot (-1)^n}{\pi \cdot n} + \frac{2 \cdot m_1 \cdot (-1)^n}{\pi \cdot n} \cdot e^{-\frac{a_1 \cdot t \cdot (\pi \cdot n)^2}{h^2}} \right\} \right] \end{aligned}$$

де $\sigma_w(y, W)$ — напруження в цементобетонні від усадки, МПа;

y — поточна координата по товщині шару, м;

t — час догляду, год;

h — товщина шару, м;

C_x — коефіцієнт міри жолоблення;

α — коефіцієнт усадки, який характеризує зменшення лінійного розміру зразка при видаленні з нього 1 % вологи;

E — модуль пружності, МПа;

μ — коефіцієнт Пуассона;

$W(y, t)$ — функція розподілу вологи по товщині шару цементобетону.

Визначаємо міру пошкодження цементобетонного покриття від усадки бетону при тужавінні та твердінні із можливістю коробитися за залежністю:

$$M_{\text{усад}}(t) = \int_0^{t_{\mu}} \left[\frac{\alpha \cdot E \cdot t \cdot (m - m_1)}{1 - \mu} \cdot \left(\frac{y}{h} - 0,5 \right) + \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{2 \cdot h^2 \cdot \alpha \cdot E \cdot (m + m_1)}{\pi^3 \cdot n^3 \cdot a_1 \cdot (1 - \mu)} \cdot \right. \\ \cdot \left\{ \sin \frac{\pi \cdot n \cdot y}{h} - \frac{2}{\pi \cdot n} - e^{-\frac{a_1 \cdot t \cdot (\pi \cdot n)^2}{h^2}} \right\} + \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{2 \cdot h^2 \cdot \alpha \cdot E}{\pi^3 \cdot n^3 \cdot a_1 \cdot (1 - \mu)} \cdot e^{-\frac{a_1 \cdot t \cdot (\pi \cdot n)^2}{h^2}} \cdot \left\{ \frac{2 \cdot m}{\pi \cdot n} + \frac{2 \cdot m_1}{\pi \cdot n} \right\} + \\ \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} \frac{2 \cdot h^2 \cdot \alpha \cdot E \cdot (m - m_1)}{\pi^3 \cdot n^3 \cdot a_1 \cdot (1 - \mu)} \cdot \left(\sin \frac{\pi \cdot n \cdot y}{h} - e^{-\frac{a_1 \cdot t \cdot (\pi \cdot n)^2}{h^2}} \right) - \frac{12 \cdot (1 - C_x) \cdot \left(\frac{h}{2} - z \right) \cdot \alpha \cdot E}{(1 - \mu)} \cdot \\ \cdot \left[-\frac{h^2 \cdot t \cdot (m - m_1)}{12} + \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{h^4}{\pi^3 \cdot n^3 \cdot a_1} \cdot \left\{ \frac{m}{\pi \cdot n} \right\} + \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} \frac{h^4}{\pi^3 \cdot n^3 \cdot a_1} \cdot \left\{ \frac{2 \cdot m}{\pi \cdot n} - \frac{2 \cdot m}{\pi \cdot n} \cdot e^{-\frac{a_1 \cdot t \cdot (\pi \cdot n)^2}{h^2}} - \frac{2 \cdot m_1 \cdot (-1)^n}{\pi \cdot n} + \frac{2 \cdot m_1 \cdot (-1)^n}{\pi \cdot n} \cdot e^{-\frac{a_1 \cdot t \cdot (\pi \cdot n)^2}{h^2}} \right\} \right] \Bigg] dt = 0,12$$

Значення міри пошкодження цементобетонного покриття від усадки бетону при тужавінні та твердінні із можливістю коробитися має безрозмірну відносну величину, яка рівна $M_{\text{усад}}(t) = 0,12$ і є меншою за граничне значення, що рівняється $M=1$ умова виконується.

Тому наступним етапом визначаємо міру пошкодження цементобетонного дорожнього покриття від температурних напружень, що виникають внаслідок добових і річних температурних коливань

Розрахунок розподілу температури по товщині цементобетонного дорожнього покриття при стаціонарному кондуктивному теплообміні в покритті розподілення температури $T(y,t)$ по товщині виражається лінійними функціями (розділ 2). Визначаємо зміну температури $T(y, t)$ в будь-яку годину доби по товщині покриття при гармонічній умові на поверхні в виді гармонічної функції може бути наближено знайдено згідно з формулами щодо розподілу температурних хвиль в на півпросторі (розділ 2).

Відповідно до (розділ 2) і початкових умови про нульовий градієнт в покритті після двох - трьох год від сходу сонця, отримують розрахункову формулу

$$T(y,t) = T_c \left(1 - \frac{y}{b_0}\right) + A_0 \exp\left(-y \sqrt{\frac{\omega}{2 \cdot a}}\right) \cos\left(\omega \cdot t - y \sqrt{\frac{\omega}{2 \cdot a}} - \varphi_0\right)$$

де φ_0 — зсув фаз температури поверхні покриття от $T_{n \max}$ до $T_{n \min}$ при $t = 0$, виражаємо в градусах.

Величину коефіцієнту b_0 у знайдено з рівності $T(0,0)=T(y,0)$ або:

$$T_c + A_0 \cos(-\varphi_0) = T_c \left(1 - \frac{y}{b_0}\right) + A_0 \exp\left(-y \sqrt{\frac{\omega}{2 \cdot a}}\right) \cdot \cos\left(-y \sqrt{\frac{\omega}{2 \cdot a}} - \varphi_0\right)$$

$$\text{звідки } b_0 = \frac{y \cdot T_c}{A_0 \cdot \left[\exp\left(-y \sqrt{\frac{\omega}{2 \cdot a}}\right) \cdot \cos\left(-y \sqrt{\frac{\omega}{2 \cdot a}} - \varphi_0\right) - \cos \varphi_0 \right]}$$

Тому вираз для розрахунку температурного режиму цементобетонного дорожнього покриття у вигляді бігармонічного закону наступного виду:

$$T(y,t) = T_c \left(1 - \frac{y}{b_0}\right) + A_\delta \exp\left(-y \sqrt{\frac{\omega_\delta}{2 \cdot a}}\right) \cos(\omega_\delta \cdot t - y \sqrt{\frac{\omega_\delta}{2 \cdot a}} - \varphi_\delta) + A_p \exp\left(-y \sqrt{\frac{\omega_p}{2 \cdot a}}\right) \cos(\omega_p \cdot t - y \sqrt{\frac{\omega_p}{2 \cdot a}} - \varphi_p),$$

де T_c — середня температура покриття;

$\bar{A}_p$ — середня по товщині амплітуда коливань температури покриття в річному циклі;

$\bar{A}_\delta$ — середня по товщині амплітуда коливань температури покриття в добовому циклі.

При відсутності в покритті повздовжніх деформацій і короблення температурні напруження визначають за формулою $\sigma_{1T} = E \cdot a \cdot T(y)$ з урахуванням гармонічної функції температури $T(y,t)$. Щоб визначити напруження σ_{1T} на нижній частині плити покриття або на поверхні за формулою $\sigma_{1T} = E \cdot a \cdot T(y)$, прийнято відповідно $y=h$ або $y=0$.

При вільних повздовжніх деформаціях розрахунок температурних напружень в плитах, не маючих можливості коробитися ($C_x=1$) або маючих часткову можливість короблення ($C_x < 1$), визначають за формулою:

$$\sigma_T(t, T(y,t)) = k \cdot E(t) \cdot (\alpha_{\text{цб}} - \alpha_{\text{осн}}) \cdot (T(y) - \frac{k \cdot E(t) \cdot (\alpha_{\text{цб}} - \alpha_{\text{осн}})}{h})$$

$$\int_0^h T(y,t) dy - \frac{12 \cdot k \cdot E(t) \cdot (\alpha_{\text{цб}} - \alpha_{\text{осн}}) \cdot (\frac{h}{2} - y) \cdot (1 - C_x)}{h^3} \int_0^h T(y,t) \cdot (\frac{h}{2} - y) dy$$

де $T(y, t)$ — гармонічна функція температури по товщині покриття;

$E(t)$ — модуль пружності цементобетону, який залежить від часу дії навантаження;

$\alpha_{цб}, \alpha_{осн}$ — коефіцієнт лінійного температурного розширення цементобетону та основи;

h — товщина покриття;

y — задана глибина.

Міра пошкодження цементобетонного дорожнього покриття від зміни напружень з урахуванням добових і річних температурних коливань, визначають за формулою для розрахункових схем (розділ 2):

$$M_{Тем}(T(t)) = \left(\begin{aligned} & n_{l(\pi)} \int_0^{t_i} \frac{dt}{B_{\pi} \cdot (\sigma_{\pi}^p(t, T) + \sigma_{\pi}^d(t, T))^{-b_{T_{\pi}}}} + n_{l(o(\theta))} \int_0^{t_i} \frac{dt}{B_{o, \theta} \cdot (\sigma_{o, \theta}^p(T(t)) + \sigma_{o, \theta}^d(T(t))^{-b_{T_{o, \theta}}}} \\ & + n_{l(z)} \int_0^{t_i} \frac{dt}{B_z \cdot (\sigma_z^p(T(t)) + \sigma_z^d(T(t))^{-b_{T_z}}} \end{aligned} \right) = 0,21$$

$$\sigma_{\pi}^p(t, T(y, t)) = k \cdot E_{\pi}^p(t) \cdot \alpha_{цб} \cdot T(y) - \frac{k \cdot E_{\pi}^p(t) \cdot \alpha_{цб}}{h}$$

$$\text{Де} \int_0^h T(y, t) dy - \frac{12 \cdot k \cdot E_{\pi}^p(t) \cdot \alpha_{цб} \cdot (\frac{h}{2} - y) \cdot (1 - C_x)}{h^3} \int_0^h T(y, t) \cdot (\frac{h}{2} - y) dy$$

$$\sigma_{\pi}^d(t, T(y, t)) = k \cdot E_{\pi}^d(t) \cdot \alpha_{цб} \cdot T(y) - \frac{k \cdot E_{\pi}^d(t) \cdot \alpha_{цб}}{h}$$

$$\int_0^h T(y, t) dy - \frac{12 \cdot k \cdot E_{\pi}^d(t) \cdot \alpha_{цб} \cdot (\frac{h}{2} - y) \cdot (1 - C_x)}{h^3} \int_0^h T(y, t) \cdot (\frac{h}{2} - y) dy$$

$$\sigma_{o, \theta}^p(t, T(y, t)) = k \cdot E_{o, \theta}^p(t) \cdot \alpha_{цб} \cdot T(y) - \frac{k \cdot E_{o, \theta}^p(t) \cdot \alpha_{цб}}{h}$$

$$\int_0^h T(y, t) dy - \frac{12 \cdot k \cdot E_{o, \theta}^p(t) \cdot \alpha_{цб} \cdot (\frac{h}{2} - y) \cdot (1 - C_x)}{h^3} \int_0^h T(y, t) \cdot (\frac{h}{2} - y) dy$$

$$\begin{aligned}\sigma_{o,\varepsilon}^{\partial}(t, T(y, t)) &= k \cdot E_{o,\varepsilon}^{\partial}(t) \cdot \alpha_{\text{цб}} \cdot T(y) - \frac{k \cdot E_{o,\varepsilon}^{\partial}(t) \cdot \alpha_{\text{цб}}}{h} \\ &\int_0^h T(y, t) dy - \frac{12 \cdot k \cdot E_{o,\varepsilon}^{\partial}(t) \cdot \alpha_{\text{цб}} \cdot \left(\frac{h}{2} - y\right) \cdot (1 - C_x)}{h^3} \int_0^h T(y, t) \cdot \left(\frac{h}{2} - y\right) dy \\ \sigma_3^p(t, T(y, t)) &= k \cdot E_3^p(t) \cdot \alpha_{\text{цб}} \cdot T(y) - \frac{k \cdot E_3^p(t) \cdot \alpha_{\text{цб}}}{h} \\ &\int_0^h T(y, t) dy - \frac{12 \cdot k \cdot E_3^p(t) \cdot \alpha_{\text{цб}} \cdot \left(\frac{h}{2} - y\right) \cdot (1 - C_x)}{h^3} \int_0^h T(y, t) \cdot \left(\frac{h}{2} - y\right) dy \\ \sigma_3^{\partial}(t, T(y, t)) &= k \cdot E_3^{\partial}(t) \cdot \alpha_{\text{цб}} \cdot T(y) - \frac{k \cdot E_3^{\partial}(t) \cdot \alpha_{\text{цб}}}{h} \\ &\int_0^h T(y, t) dy - \frac{12 \cdot k \cdot E_3^{\partial}(t) \cdot \alpha_{\text{цб}} \cdot \left(\frac{h}{2} - y\right) \cdot (1 - C_x)}{h^3} \int_0^h T(y, t) \cdot \left(\frac{h}{2} - y\right) dy\end{aligned}$$

Значення міри пошкодження цементобетонного дорожнього покриття автомобільної дороги від температурних напружень, що виникають внаслідок добових і річних температурних коливань має безрозмірну відносну величину, яка рівна $M_{\text{тем}}(T(t)) = 0,21$ і є меншою за граничне значення, що рівняється $M=1$ умова виконується.

Тому наступним етапом визначаємо міру пошкодження цементобетонного дорожнього покриття від розтягуючих напружень, що виникають внаслідок дії пневматичних коліс транспортних засобів

$M_{Tp}(t)$, — міра пошкодження від дії пневматичних коліс транспортного засобів і залежить від часу (t) , яку визначають:

$$M_{Tp}(t) = \frac{\log(N_{pt}(t))}{10^{N_{Tp}}} = 0,42$$

Визначаємо розрахункову сумарну повторність розрахункових навантажень при добовій інтенсивності руху N_p , визначають за формулою згідно ГБН В.2.3-37641918-557:

$$N_{pt}(t) = 2000 \times 210 \times \frac{(1,05^t - 1)}{(1,05 - 1)} = 11815602 = \log N_{pt}(t) = 7,073$$

де n_c — кількість днів року з позитивною температурою повітря (приймається за довідковими даними);

q — знаменник, що описує щорічний приріст інтенсивності руху згідно ГБН В.2.3-37641918-557;

t — строк служби дорожнього одягу до капітального ремонту 22 років;

Визначення гранично допустима кількість розрахункового навантаження N_{Tp} , що може витримати цементобетонне дорожнє покриття при дії горизонтального розтягуючого напруження σ_p при згині;

Тому значення N_{Tp} встановлено за формулою:

$$N_{Tp} = \left(\frac{K_p \times R_i^p}{\sigma_{pt}} \right)^m = 1,23$$

де K_p — комплексний коефіцієнт, рівний $K_p = 1,65$ для доріг Ia – II категорії, $K_p = 1,60$ – Ib – II, $K_p = 1,55$ – III та $K_p = 1,50$ для доріг IV – V категорії згідно з ГБН В.2.3-37641918-557;

b_r , — показник втоми ($m = 1/b_r$), цементобетону приймається за таблицею Б.3;

R_i^p — розрахункова міцність цементобетону на розтяг при згині визначається згідно з ГБН В.2.3-37641918-557:

$$R_i^p = 4,4 \times 1,2 \times 0,38 \times 0,96 = 1,93 \text{ МПа} \quad (6.6)$$

де B_{tb} — клас бетону за міцністю на розтяг при згині приймається за додатком Б;

K_M — коефіцієнт набору міцності: для бетону природного твердіння при температурі повітря понад 10 °С $K_M = 1,2$; для бетону природного твердіння при температурі повітря нижче 10 °С і при зимовому бетонуванні $K_M = 1$;

$K_{морз}$ — коефіцієнт морозостійкості цементобетону (приймається 0,96);

K_y — коефіцієнт втоми цементобетону при повторному навантаженні;

$$K_y = 1,08 \times 200045380^{-0,055} = 0,38,$$

R_{ip} — розрахункова міцність на розтяг при згині в залежності від коефіцієнт міцності заданої надійності та дії розрахункового транспортного навантаження;

$\sigma_p(t)$ — розрахункове напруження розтягу при згині з урахуванням коефіцієнт міцності заданої надійності, що виникають у цементобетонному дорожньому покритті від дії навантаження з урахуванням перепаду температури по товщині плити.

Напруження розтягу при згині визначають для розрахунку товщини покриття при умові гарантованого повного контакту плит з основою за рахунок стійкості земляного полотна і відсутності нерівномірних осідань або здимання (що повинне забезпечуватись дотриманням проекту виконання робіт і правильністю виконання розрахунків на міцність земляного полотна,

дренаж і морозостійкість дорожнього одягу, які наведено нижче). Розрахункове місце прикладення навантаження до дорожнього покриття – поздовжній зовнішній край у центрі по довжині плити.

$$\sigma_{pt} = \frac{65 \times 1,5 \times 60 \times 0,66 \times 1,05 \times (0,0592 - 0,09284 \times \ln(\frac{18,6}{88,78}))}{23^2 \times 0,76} = 1,96$$

де σ_{pt} — напруження розтягу при згині, що виникають у цементобетонному дорожньому покритті від дії навантаження, з урахуванням перепаду температури по товщині плити, (МПа);

Q_p — розрахункове навантаження, 65 кН, приймається згідно з таблицею Б ДБН В.2.3-4;

h — товщина цементобетонної плити, м;

K_m — коефіцієнт, що враховує вплив місця розташування навантаження: для неармованих покриттів $K_m = 1,5$; для покриттів з крайовим армуванням або майданчиків з розташуванням смуг накату не ближче ніж 0,8 м; зовнішнього поздовжнього краю покриття - $K_m = 1,0$ для поздовжнього напрямку і $K_m = 1,5$ для поперечного;

$K_{умв}$ — коефіцієнт, що враховує умови роботи, рівний 0,66;

$K_{шт}$ — коефіцієнт, що враховує вплив штирових з'єднань на умови контакту плит з основою: при наявності у поперечних швах штирів $K_{шт} = 1$, при відсутності штирів $K_{шт} = 1,05$;

R — радіус відбитка колеса, 18,6 см;

l_{np} — пружна характеристика плити 88,78, см;

K_t — коефіцієнт, що враховує вплив температурного короблення плит 0,76.

Для оцінювання пошкодження цементобетонного дорожнього покриття згідно з ГБН В.2.3-37641918-557 необхідно визначати напруження розтягу σ_p

при згині для розрахунку товщини покриття за умови гарантованого повного контакту плити з основою і відсутності нерівномірних осідань або випирань з урахуванням заданого рівня надійності за формулою:

$$\sigma_p = 1,43 \times 1,96 = 2,80 \text{ МПа},$$

де $K_{mц}$ — коефіцієнт міцності з урахуванням заданого рівня надійності;

Значення міри пошкодження цементобетонного покриття автомобільної дороги від розтягуючих напружень, що виникають внаслідок дії пневматичних коліс транспортних засобів має безрозмірну відносну величину, яка рівна $M_{Tp}(t) = 0,42$ і є меншою за граничне значення, що рівняється $M=1$ умова виконується.

Визначаємо сумарну міру пошкодження цементобетонного покриття автомобільної дороги від спільного впливу усадки цементобетону, зміни температури та дії пневматичних коліс транспортних засобів

$$M_{\Pi}(t, T(y, t), W) = 0,12 + 0,21 + 0,42 = 0,75 < [M_{цб}] = 1$$

Умова запроектованого цементобетонного покриття на автомобільній дорозі першої категорії виконується.

Тому останнім етапом оцінюється довговічність цементобетонного покриття з урахуванням спільного впливу усадки цементобетону, зміни температури та дії пневматичних коліс транспортних засобів

Оцінювання довговічності цементобетонного дорожнього покриття автомобільної дороги базується на аналітичних рішеннях отриманих у розділы 2 та вище обчислених аналітичних рішеннях для конкретного варіанту, тому розрахунковий (очікуваний) строк служби T_{PO3} (в роках) цементобетонного покриття визначаємо за залежністю:

$$T_{PO3} = 18 \cdot \frac{1}{0,75} = 24 > [18]$$

де T_{PO3} — строк служби цементобетонного покриття (товщиною $h=22$ см) автомобільної дороги;

$T_{пр}$ — проектний строк експлуатації цементобетонного покриття в автомобільної дороги приймається 18 років;

T_H — нормативне значення строку експлуатації цементобетонного дорожнього покриття між капітальним ремонтом становить для категорії дороги - I $T_H = 18$ років.

Таким чином запроектована конструкція дорожнього одягу відповідає умові за показником строку служби цементобетонного покриття автомобільної дороги першої категорії з урахуванням комплексної хімічної добавки – 1,1% від маси цементу, при товщині покриття 22 см.

Тому нижче наводяться результати чисельного аналізу конструкцій жорсткого дорожнього одягу з урахуванням вище зазначених факторів, які розглядаються в дисертаційній роботі.

Результатами чисельного аналізу встановлено, що на підвищення довговічності цементобетонного покриття впливає збільшення товщини покриття, а також комплексна хімічна добавка з урахуванням категорії

дороги та вище зазначених факторів. Тому для більш об'єктивної оцінки впливу різних вище зазначених факторів побудовано графічні залежності сумарної міри пошкодженості (від усадки бетону, зміни температури та дії пневматичних коліс транспортних засобів) та строку служби (експлуатації) цементобетонного покриття автомобільної дороги, які представлені на рис. (Д.1-Д.12)

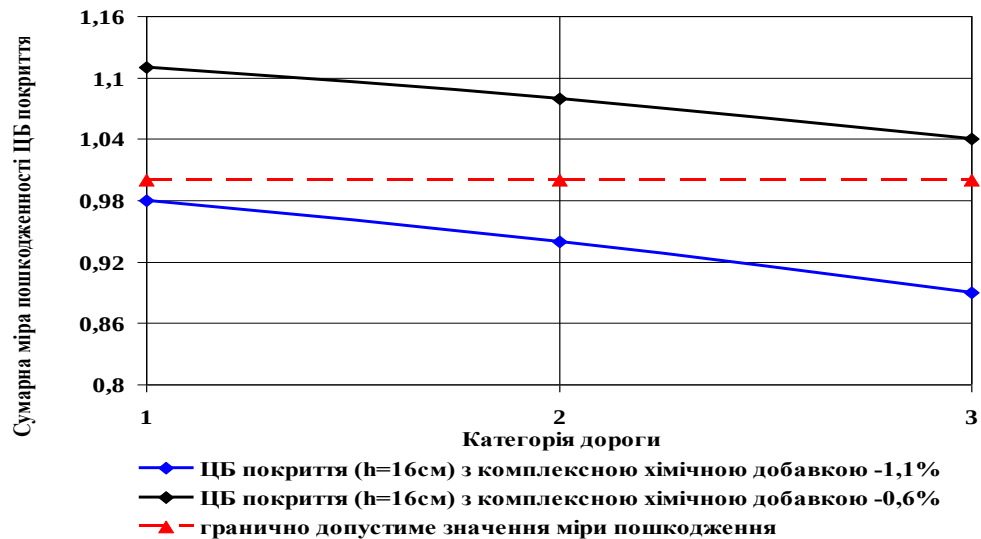


Рисунок Д.1 — Залежність сумарної міри пошкодженості (від усадки цементобетону, зміни температури та дії пневматичних коліс транспортних засобів) цементобетонного покриття автомобільної дороги в залежності від категорії

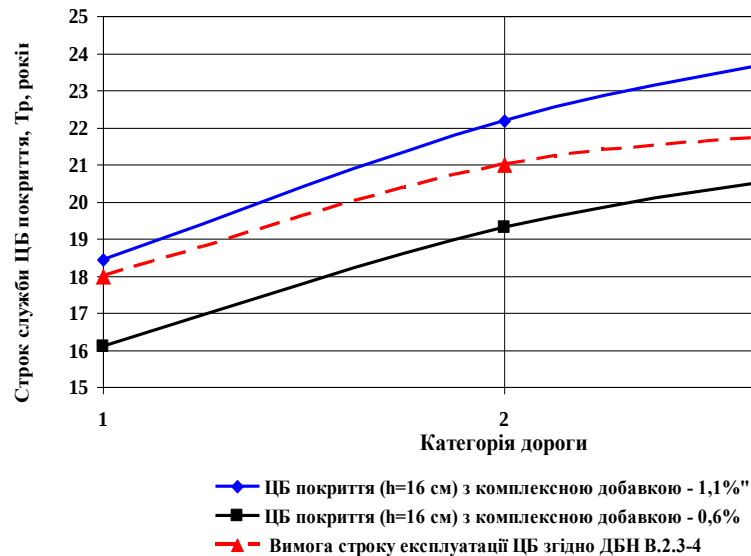


Рисунок Д.2 — Залежність строку служби цементобетонного покриття автомобільної дороги в залежності від категорії

З результатів (рис. Д.1, Д.2) видно, що цементобетонне покриття товщиною 16 см з використанням комплексної хімічної добавки 0,6 % не відповідає граничним вимогам мірі пошкодженості та строку експлуатації, а з комплексною добавкою - 1,1% від маси цементу відповідає для всіх категорій автомобільних доріг.

У роботі проведено числовий аналіз закономірності дії впливових факторів на довговічність цементобетонного покриття. Для прикладу використано конструкцію жорсткого дорожнього одягу з цементобетонним покриттям на автомобільній дорозі I-ї категорії при різних товщинах покриття. Результати оцінки впливу комплексної хімічної добавки на довговічність цементобетонного покриття наведено на рис.Д.3.

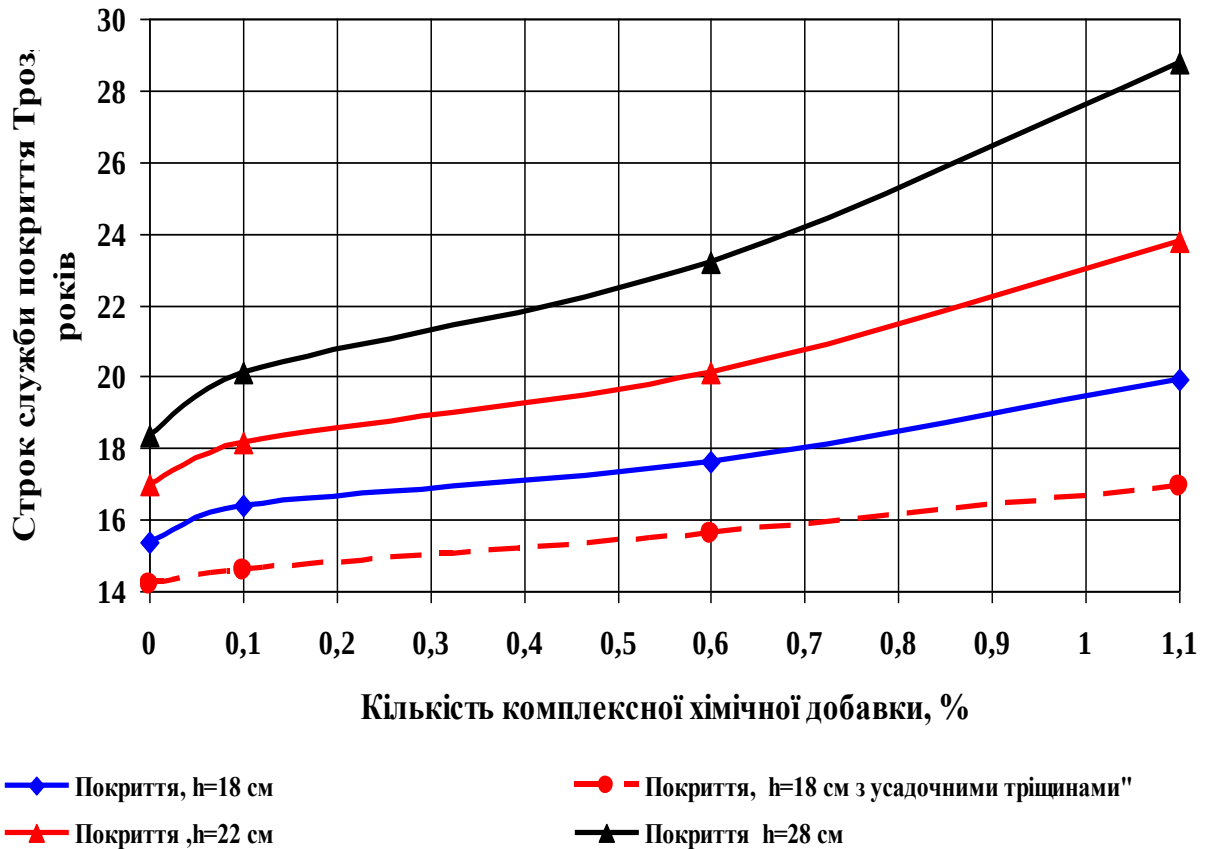


Рисунок Д.3 — Залежність розрахункового строку служби цементобетонного покриття автомобільної дороги в залежності від кількості комплексної хімічної добавки та товщини покриття

Встановлено (рис.Д.3), що вплив комплексної хімічної добавки у цементобетонному покритті в кількості від 0,1 — 1,1% від маси цементу дозволяє підвищувати його довговічність 1,2 — 1,6 рази у порівнянні з цементобетонним покриттям без хімічних добавок. Також встановлено, що на початковому етапі набору міцності в цементобетонні з'являються усадочні тріщини, які в період експлуатації призводять до зниження строку служби покриття 1,2 рази. Це ще раз підтверджує про необхідність належного контролю якості на етапі проектування зернового складу цементобетонної суміші, транспортуванні, влаштуванні та догляду при твердінні цементобетонного покриття.

Проведено чисельний аналіз залежність сумарної міри пошкодженості та строку служби цементобетонного покриття автомобільної дороги

(категорія дороги І) в залежності від товщини покриття (рис.Д.4, рис.Д.5), встановлено, що відбувається стабілізація строку служби цементобетонного покриття при товщині покриття від 25 до 30 см.

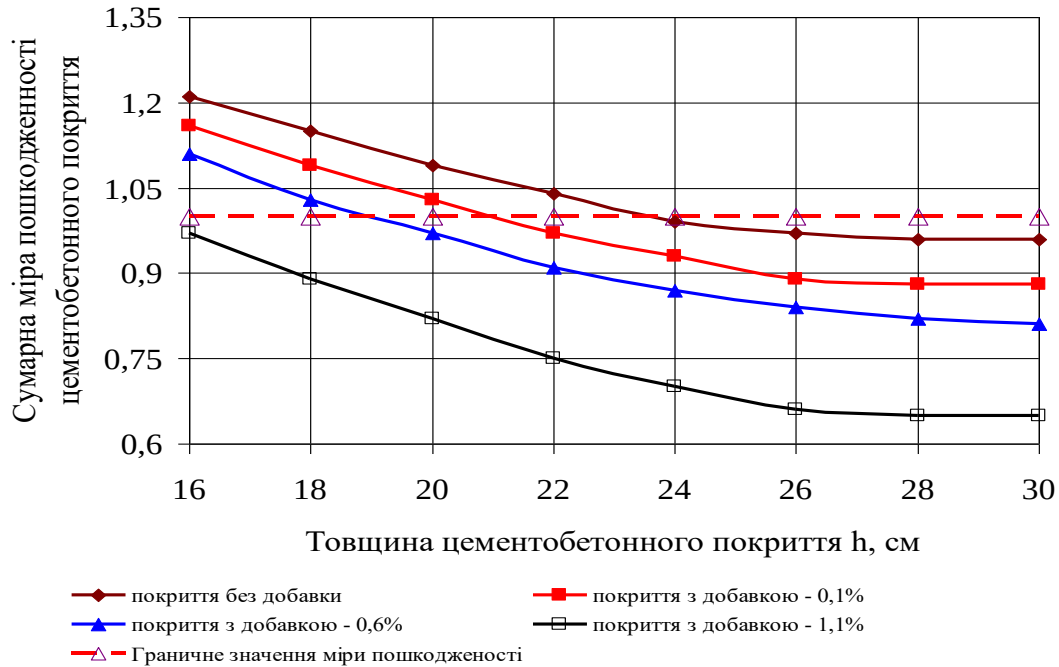


Рисунок Д.4 — Залежність сумарної міри пошкодження (від усадки цементобетону, зміни температури та дії пневматичних коліс транспортних засобів) цементобетонного покриття автомобільної дороги (категорія дороги І) в залежності від товщини покриття

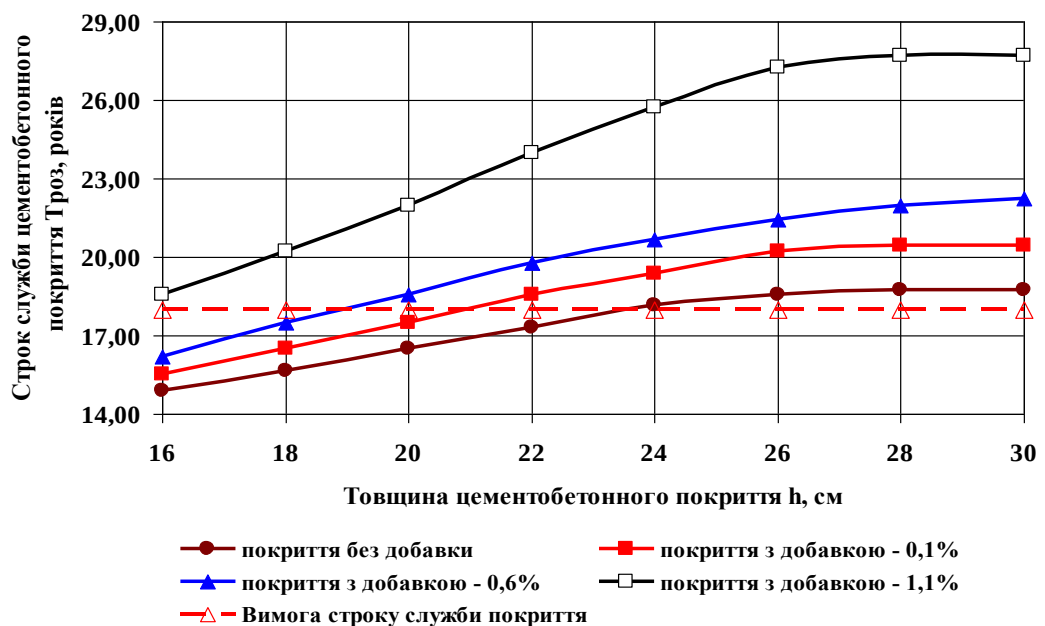


Рисунок Д.5 — Залежність строку служби цементобетонного покриття автомобільної дороги (категорія дороги І) в залежності від товщини покриття

З результатів чисельного аналізу (рис. Д.4, Д.5) встановлено, що цементобетонне покриття без добавки та з добавками при товщині 24 см відповідає вимогам строку служби цементобетонного покриття. Ці данні доводять, що з відповідним техніко-економічним обґрунтуванням рекомендовано товщини цементобетонного покриття для автомобільних доріг приймати від 25 до 28 см та комплексну хімічну добавку до бетону 1,1 % від маси цементу для практичного застосування.

ДОДАТОК Ж
ДОВІДКИ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

**ДЕРЖАВНЕ АГЕНТСТВО АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ УКРАЇНИ
(УКРАВТОДОР)
Національний транспортний університет
(НТУ)**

ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший заступник Голови
Укравтодору

Є. Ю. Кузькін

« 01 » 12 2020 р.

МЕТОДИКА

**оцінювання довговічності цементобетонного дорожнього покриття з
урахуванням спільного впливу змін температури та дії транспорту
М 42.1-37641918-780:2020**

ПОГОДЖЕНО

Начальник Відділу інноваційного
розвитку Департаменту технічного
забезпечення та інноваційного
розвитку Укравтодору

О. Ю. Тимошук

« 01 » 12 2020 р.

ПОГОДЖЕНО

Начальник відділу нормоконтролю
ДП «ДерждорНДІ»

М. М. Стулій

« 01 » 12 2020 р.

РОЗРОБЛЕНО

Перший проректор – проректор з
наукової роботи НТУ, професор

М. М. Дмитрієв

« 01 » 12 2020 р.

Науковий керівник,
завідувач кафедри мостів, тунелів
та гідротехнічних споруд НТУ

А. М. Онищенко

« 01 » 12 2020 р.

Відповідальний виконавець,
науковий співробітник кафедри
мостів, тунелів та гідротехнічних
споруд НТУ

Н. П. Чиженко

« 01 » 12 2020 р.

Київ
2020

012368



УКРАЇНА
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТРАНСПОРТНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

01010, м. Київ, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, т.ф. +38 (044) 280 82 03, т. +38 (044) 280 87 65
 e-mail: general@ntu.edu.ua, код ЄДРПОУ 02070915

01.12.2020 № 1944/13

на № _____

ДОВІДКА

**про впровадження наукових розробок старшого викладача
 кафедри мостів, тунелів та гідротехнічних споруд
 Чиженко Наталії Петрівни**

Результати дисертаційної роботи Чиженко Н.П. «Удосконалення методу оцінки довговічності цементобетону для покриття автомобільних доріг» впроваджено в навчальний процес, а саме при викладанні дисциплін: «Будівельне матеріалознавство», «В'язучі речовини», «Фізико-хімічні методи дослідження будівельних матеріалів», «Бетони і будівельні розчини. Заповнювачі для бетонів», «Сучасні будівельні матеріали для будівництва автомобільних доріг», «Бетони та будівельні розчини для будівництва транспортних споруд» за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія», за освітніми програмами: «Технології будівельних конструкцій, виробів і матеріалів», «Автомобільні дороги і аеродроми», «Мости і транспортні тунелі», крім того при написанні дипломних робіт за освітніми програмами: ОП «Технології будівельних конструкцій, виробів і матеріалів», «Мости і транспортні тунелі».

Проректор з навчальної роботи,
 професор НТУ



О.К. Гришук



ДОВІДКА

**про впровадження наукових розробок старшого викладача
кафедри мостів, тунелів та гідротехнічних споруд
Національного транспортного університету
Чиженко Наталії Петрівни**

Даною довідкою підтверджується, що результати наукових розробок Чиженко Н.П. впроваджені у дорожньому господарстві України і вони мають практичне значення та застосування у напрямі підвищення довговічності цементобетонного покриття автомобільних доріг загального користування державного значення за рахунок підвищення міцності і тріщиностійкості.

Чиженко Н.П. є співавтором рекомендацій, технічних умов, стандартів організацій та методик у сфері дорожнього господарства, зокрема:

Р В.2.7-218-02070915-742:2008 Рекомендації з виготовлення цементобетонного покриття з гідрофобними властивостями для автомобільних доріг.

Р В.2.7-218-02070915-743:2008 Рекомендації з використання сольових техногенних відходів в якості протиожедних матеріалів (ПОМ).

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

М 42.1-37641918-772:2018 Методика визначення гранулометричного складу цементобетонних дорожніх сумішей.

М 42.1-37641918-780:2020 Методика оцінки довговічності цементобетонного дорожнього покриття з урахуванням спільного впливу змін температури та дії транспорту.

Заступник начальника відділу
проектних робіт Департаменту
розвитку мережі доріг

Сергій АКСЬОНОВ



ТОВ «Альтіс-Констракшн»

ЄДРПОУ 37394854
Юридична адреса: вул. Качалова, 5-в, м. Київ, 03126, Україна
тел.: +38044 492-77-62; факс: +38044 492-77-63
mail@altis.ua

№
«12» жовтня 2017 р.

ДОВІДКА

У період із 2016 р. по 2017 р. в ТОВ "Альтіс-Констракшн" було виготовлено склади цементобетонів з комплексною добавкою поліфункціональної дії ШАГ – ПА для будівництва покриття аеродрому в Міжнародному аеропорті «Херсон» за участю асистента Національного транспортного університету Чиженко Наталії Петрівни під керівництвом к.т.н., професора Дорошенка Юрія Михайловича.

Фактичний економічний ефект від впровадження становить 61,15 грн./м³ цементобетону.

Акт впровадження та розрахунок економічної ефективності прикладається.
Довідка видана для подання в результатах дисертаційної роботи.

Директор "Альтіс-Констракшн"

Забігайло М.В.

Головний бухгалтер

Кривошея Т.В.

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Директор ТОВ
"Альтіс – Констракшн"
Забігайло М.В.
«___» _____ 2017 р.

АКТ
про впровадження результатів дисертації
на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук
Чиженко Наталії Петрівни

Ми, що нижче підписалися, представники ТОВ "Альтіс – Констракшн" керівник проекту Португальський М.С., начальник будівельної лабораторії Гомелюк С.М. та представники Національного транспортного університету кандидат технічних наук, професор Дорошенко Ю.М., асистент Чиженко Н.П. склали даний акт про те, що у період із 2016 р. по 2017 р. здійснювалося будівництво цементобетонного покриття аеродрому в Міжнародному аеропорту «Херсон».

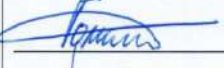
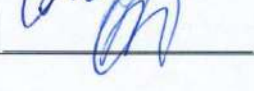
Для виготовлення 1 м³ цементобетонної суміші В40В_{btb}4,8П1F200W6 використано склад: цемент М - 500 – 350 кг, щебінь 5-20 мм – 1230 кг, пісок – 705 кг, вода – 131 кг, комплексна добавка ШАГ – ПА – 1,1 % від маси цементу.

Було виготовлено 10000 м³ монолітного цементобетону В40В_{btb}4,8П1F200W6.

Міцність на стиск зразків – кубів цементобетону, які тверднули в нормальних умовах становить: $R_{cm}^3 = 29,4$ МПа, $R_{cm}^7 = 38,6$ МПа, $R_{cm}^{28} = 54,7$ МПа, вміст залученого повітря – 5,5 %.

Завдяки застосуванню комплексної добавки ШАГ – ПА покращено будівельно – технологічні властивості цементобетонної суміші, фізико – механічні властивості цементобетону.

Додаток – розрахунок економічної ефективності.

Представники Національного транспортного університету	Представники ТОВ "Альтіс – Констракшн"
 Ю.М. Дорошенко	 С.М. Гомелюк
 Н.П. Чиженко	 М.С. Португальський

ДОДАТОК



«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Директор ТОВ

"Адїтіс – Констракшн"

Забігайло М.В.

«__» _____ 2017 р.

РОЗРАХУНОК

економічної ефективності впровадження дослідно – промислових партій
цементобетонів із комплексною добавкою ШАГ – ПА

При виконанні робіт по виготовленню дослідно – промислової партії цементобетонної суміші для будівництва покриття аеродрому в Міжнародному аеропорту «Херсон» було встановлено технічну та економічну доцільність використання комплексної добавки поліфункціональної дії вітчизняного виробництва ШАГ – ПА. Це дозволить подовжити терміни експлуатації цементобетонних виробів та буде економічно ефективніше ніж добавка – аналог зарубіжного виробництва. Розрахунок виконано у відповідності до СН 509 – 78 "Инструкция по определению экономической эффективности использования в строительстве новой техники, изобретений и рационализаторских предложений" за формулою:

$$E = (C_1 - C_2) \cdot A,$$

де C_1 , C_2 – собівартість застосовуваних важких бетонів із комплексними добавками зарубіжного і вітчизняного виробництва;

A – обсяг виробництва.

Собівартість дослідної партії важкого цементобетону визначали виходячи з діючих цін на матеріали.

Розрахунок собівартості цементобетону із комплексною добавкою вітчизняного виробництва у порівнянні із добавкою – аналогом зарубіжного виробництва наведено в таблиці.

Таблиця – Порівняльний розрахунок собівартості цементобетону за базовим варіантом (із застосуванням добавки – аналога зарубіжного виробництва) та із застосуванням запропонованої комплексної добавки ШАГ – ПА.

Статті витрат	Одиниця виміру	Ціна за од., грн	Добавка зарубіжний аналог		ШАГ – ПА	
			витрата на 1 м ³	вартість, грн.	витрата на 1 м ³	вартість, грн.
Цемент	кг	1705,8	365	622,62	350	597,03
Вода	кг	-	140		131	
Пісок	кг	135,0	692,5	93,55	705	95,18
Щебінь 5-20мм	кг	172,8	1230	212,54	1230	212,54
Комплексна добавка	кг		4,5	157,5	4,5	130,5
Всього з ПДВ				1303,45		1242,3

Економічний ефект, отриманий при виготовленні та використанні 1 м³ складає:

$$E = (1303,45 - 1242,3) \cdot 1 = 61,15 \text{ грн.}$$

Економічний ефект, отриманий при виготовленні та використанні 10000 м³ розробленого цементобетону складає:

$$E = (1303,45 - 1242,3) \cdot 10000 = 611500 \text{ грн.}$$

Таким чином, впровадження цементобетону із комплексною добавкою ШІАГ – ПА в кількості 1,1 % від маси цементу дозволяє досягти питомого економічного ефекту – 61,15 грн./м³ цементобетону у порівнянні із добавкою аналогом зарубіжного виробництва.

«УЗГОДЖЕНО»
Головний бухгалтер
ТОВ "Альтіс – Констракшн"



Кривошея Т.В.



ТОВ «Альтіс-Констракшн»

ЄДРПОУ 37394854
Юридична адреса: вул. Качалова, 5-в, м. Київ, 03126, Україна
тел.: +38044 492-77-62; факс: +38044 492-77-63
mail@altis.ua

№
«12» жовтня 2017 р.

ДОВІДКА

У період із 2016 р. по 2017 р. в ТОВ "Альтіс-Констракшн" було виготовлено склади високоміцних цементобетонів із комплексною добавкою поліфункціональної дії ШАГ – ПА для проведення капітального ремонту взлітно – посадкової смуги у Міжнародному аеропорту в м. Запоріжжя за участю асистента Національного транспортного університету Чиженко Наталії Петрівни під керівництвом к.т.н., професора Дорошенка Юрія Михайловича.

Фактичний економічний ефект від впровадження становить 75,48 грн./м³ цементобетону.

Акт впровадження та розрахунок економічної ефективності прикладається.
Довідка видана для подання в результатах дисертаційної роботи.

Директор "Альтіс-Констракшн"

Забігайло М.В.

Головний бухгалтер

Кривошея Т.В.

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Директор ТОВ
"Альтіс – Констракшн"
Забігайло М.В.

«__» _____ 2017 р.

АКТ
про впровадження результатів дисертації
на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук
Чиженко Наталії Петрівни

Ми, що нижче підписалися, представники ТОВ "Альтіс – Констракшн" керівник проекту Португальський М.С., начальник будівельної лабораторії Гомелюк С.М. та представники Національного транспортного університету кандидат технічних наук, професор Дорошенко Ю.М., асистент Чиженко Н.П. склали даний акт про те, що у період із 2016 р. по 2017 р. проводився капітальний ремонт взлітно – посадкової смуги у Міжнародному аеропорту в м. Запоріжжя із застосуванням високоміцного цементобетону.

Для виготовлення 1 м³ цементобетонної суміші В40В_{btb}4,8 П4F200W10 використано склад: цемент М - 500 – 450 кг, щебінь 5-20 мм – 1200 кг, пісок – 600 кг, вода – 148 кг, комплексна добавка ШАГ – ПА – 1,1 % від маси цементу.

Було виготовлено 64,26 м³ монолітного цементобетону В40В_{btb}4,8 П4F200W10.

Міцність на стиск зразків – кубів цементобетону, які тверднули в нормальних умовах становить: $R_{cm}^{12 \text{ год.}} = 35,5 \text{ МПа}$, $R_{cm}^{24 \text{ год.}} = 42,0 \text{ МПа}$, $R_{cm}^{28} = 59,5 \text{ МПа}$, вміст залученого повітря – 5,48 %.

Додаток – розрахунок економічної ефективності.

Представники Національного транспортного університету	Представники ТОВ "Альтіс – Констракшн"
 Ю.М. Дорошенко	 С.М. Гомелюк
 Н.П. Чиженко	 М.С. Португальський

ДОДАТОК



«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Директор ТОВ

"Алітіс – Констракшн"

Забігайло М.В.

«18» грудня 2017 р.

РОЗРАХУНОК

економічної ефективності впровадження дослідно – промислових партій високоміцних цементобетонів із комплексною добавкою ШАГ – ПА

При виконанні робіт по виготовленню дослідно – промислової партії цементобетонної суміші для будівництва покриття аеродрому в Міжнародному аеропорту «Запоріжжя» було встановлено технічну та економічну доцільність використання комплексної добавки поліфункціональної дії вітчизняного виробництва ШАГ – ПА. Це дозволить продовжити терміни експлуатації цементобетонних виробів та буде економічно ефективніше ніж добавка – аналог зарубіжного виробництва. Розрахунок виконано у відповідності до СН 509 – 78 «Инструкция по определению экономической эффективности использования в строительстве новой техники, изобретений и рационализаторских предложений» за формулою:

$$E = (C_1 - C_2) \cdot A,$$

де C_1 , C_2 – собівартість застосовуваних важких бетонів із комплексними добавками зарубіжного і вітчизняного виробництва;

A – обсяг виробництва.

Собівартість дослідної партії важкого цементобетону визначали виходячи з діючих цін на матеріали.

Розрахунок собівартості високоміцного цементобетону із комплексною добавкою вітчизняного виробництва у порівнянні із добавкою – аналогом зарубіжного виробництва наведено в таблиці.

Таблиця – Порівняльний розрахунок собівартості високоміцного цементобетону за базовим варіантом (із застосуванням добавки – аналога зарубіжного виробництва) та із застосуванням запропонованої комплексної добавки ШАГ – ПА.

Статті витрат	Одиниця виміру	Ціна за од., грн	Добавка зарубіжний аналог		ШАГ – ПА	
			витрата на 1 м ³	вартість, грн.	витрата на 1 м ³	вартість, грн.
Цемент	кг	1705,8	465	793,20	450	767,61
Вода	кг	-	155	-	148	-
Пісок	кг	135,0	587,5	79,31	600	81,00
Щебінь 5-20мм	кг	172,8	1200	207,36	1200	207,36
Комплексна добавка	кг		6,5	227,5	6,5	188,5
Всього з ПДВ				1568,84		1493,36

Економічний ефект, отриманий при виготовленні та використанні 1 м³ складає:

$$E = (C_1 - C_2) \cdot A = (1568,84 - 1493,36) \cdot 1 = 75,48 \text{ грн.}$$

Економічний ефект, отриманий при виготовленні та використанні 64,26 м³ розробленого цементобетону складає:

$$E = (1568,84 - 1493,36) \cdot 64,26 = 4850,35 \text{ грн.}$$

Таким чином, впровадження високоміцного цементобетону із комплексною добавкою ШАГ – ПА в кількості 1,1 % від маси цементу дозволяє досягти питомого економічного ефекту – 75,48 грн. /м³ цементобетону у порівнянні із добавкою аналогом зарубіжного виробництва.

/ «УЗГОДЖЕНО»
Головний бухгалтер
ТОВ "Альтіс – Констракшн"



Кривошея Т.В.

19.03.2018 № 23/198

на № _____

ДОВІДКА
про впровадження наукових розробок
асистента кафедри ДБМ і хімії
Чиженко Наталії Петрівни

Цим підтверджую, що наукові розробки Чиженко Н.П. мали практичне застосування на ТОВ «Бетон Комплекс» при виготовленні дорожніх плит ПДС (0,16×2,0×3,0) із високоміцного дорожнього цементобетону B50B_{тв}5,2P1F200W8 у період із 2015 р. по 2017 р.

Фактичний економічний ефект від впровадження становить 48,50 грн./шт.

Акт впровадження прикладається.

Довідка видана для подання в результатах дисертаційної роботи.

Директор ТОВ «Бетон Комплекс»



Гвоздарьов Є.Б.

Головний бухгалтер

Парфесса Н.П.

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
 Директор ТОВ
 «Бетон Комплекс»
 Гвоздарьов Є.Б.
 «19» 03 2018 р.



АКТ
про впровадження результатів дисертації
на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук
Чиженко Наталії Петрівни

Ми, що нижче підписалися, представники ТОВ «Бетон Комплекс» начальник інноваційно – технологічного центру Попруга П.В., головний технолог Дурицький С.Ю. та представник Національного транспортного університету асистент Чиженко Н.П., склали даний акт про те, що у період із 2015 р. по 2017 р. здійснювалося виробництво дорожніх плит ПДС (0,16×2,0×3,0), кількістю – 100 штук.

Для виготовлення дорожніх плит застосовували високоміцний дорожній цементобетон – В50В_{пб}5,2Р1F200W8. Склад : цемент М - 500 – 350 кг, щебінь 5-20 мм – 1200 кг, пісок – 730 кг, вода – 122 кг, комплексна добавка ШАГ – ПА – 1,1 % від маси цементу.

Міцність при стиску на 28 добу зразків – кубів цементобетону, які тверднули в нормальних умовах становить – 64,18 МПа, міцність на розтяг при згині – 5,99 МПа, модуль пружності – 39825 МПа, модуль деформації – 26206 МПа, середнє значення щільності цементобетону – 2,39 г/см³.

Застосування комплексної добавки ШАГ – ПА покращує будівельно – технологічні властивості цементобетонної суміші, фізико – механічні властивості та тріщиностійкість цементобетону.

Представник Національного транспортного університету	Представники ТОВ «Бетон Комплекс»
 Н.П. Чиженко	 С.Ю. Дурицький
	 П.В. Попруга

19.03.2018. № 29/199

на № _____

ДОВІДКА
про впровадження наукових розробок
асистента кафедри ДБМ і хімії
Чиженко Наталії Петрівни

Даною довідкою підтверджую, що наукові розробки Чиженко Н.П. мали практичне впровадження на ТОВ «Бетон Комплекс» у період із 2014 р. по 2017 р. при виготовленні високоміцного дорожнього цементобетону БСГ В40F200P4W8 (400 м³), БСГ В40P4F300W8 (800 м³).

Фактичний економічний ефект від впровадження становить 75,48 грн./м³ цементобетону.

Довідка видана для подання в результатах дисертаційної роботи.

Директор ТОВ «Бетон Комплекс»



Гвоздарьов С.Б.

Головний бухгалтер

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Н.П. Парфесса'.

Парфесса Н.П.



УКРАЇНА
ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ
ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ
МОСТОБУДІВЕЛЬНИЙ ЗАГІН № 112

ПІН 222022110068
07400 Київська обл., м. Бровари,
вул. Щолківська, 2.
тел./факс (04594) 5-44-16 тел. 5-12-03
ЄДРПОУ 22202218

Вих. № _____

від « 8 » 10 2014 р.

ДОВІДКА

В 2014 році в ТОВ «Мостобудівельний загін № 112» за участю аспіранта Національного транспортного університету Чиженко Наталії Петрівни впроваджено у виробництво результати наукової роботи Д/Б НДР № 21 «Підвищення надійності конструкцій дорожніх та аеродромних покриттів при використанні високоміцного бетону».

Фактичний економічний ефект від впровадження становить 27,34 грн./м³ бетону порівняно зі складом БУ-813.

Акт впровадження додається.

Довідка видана для подання в результатах дисертаційної роботи.



Директор
ТОВ «Мостобудівельний загін № 112»

Головний бухгалтер

Тарун В.М.

Сівак А.І.

Юридична адреса: 87525, Україна, м. Маріуполь,
Приморський р-н, вул. Бахчиванджи, 2

Поштова адреса: 01135, Україна, м. Київ, вул. Дмитрівська, 92/94
Тел.: +38 044 237 79 00, + 38 044 237 79 01

ЄДРПОУ 32794511

E-mail: ds@altcom.org.ua, www.altcom.ua



АЛЬТКОМ
ШЛЯХОВЕ БУДІВНИЦТВО

21/06-05 № 21.06.17р.

на № _____

ДОВІДКА

В період з 20 квітня 2015 р. по 27 квітня 2017 на ТОВ "ШЛЯХОВЕ БУДІВНИЦТВО "АЛЬТКОМ" було виготовлено склади дорожніх цементобетонів з комплексною добавкою поліфункціональної дії ШАГ – ПА для будівництва монолітного парапетного огороження типу "Нью - Джерсі" на автомобільній дорозі М-05 Київ - Одеса км 17+740 – км 87+000 за участю асистента Національного транспортного університету Чиженко Наталії Петрівни під керівництвом к.т.н., професора Дорошенка Юрія Михайловича.

Фактичний економічний ефект від впровадження становить 51,8 грн./м³ цементобетону.

Акт впровадження та розрахунок економічної ефективності прикладається.

Довідка видана для подання в результатах дисертаційної роботи.

Генеральний директор ТОВ «Шляхове
будівництво «АЛЬТКОМ»

Головний бухгалтер



Антощук А.В.

Подоліна С.М.

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Генеральний директор ТОВ «Шляхове
будівництво «АЛЬТКОМ»
Автошук А.В.



2017 р.

АКТ
про впровадження результатів дисертації
на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук
Чиженко Наталії Петрівни

Ми, що нижче підписалися, представники ТОВ "ШЛЯХОВЕ БУДІВНИЦТВО "АЛЬТКОМ" головний інженер Якимович І.В., начальник будівельної лабораторії Кос М.В. та представники Національного транспортного університету кандидат технічних наук, професор Дорошенко Ю.М., асистент Чиженко Н.П. склали даний акт про те, що у період із 20 квітня 2015 р. по 27 квітня 2017 р. здійснювалося будівництво монолітного парапетного огороження типу "Нью - Джерсі" на автомобільній дорозі М - 05 Київ - Одеса км 17+740 – км 87+000.

Для виготовлення 1 м³ цементобетонної суміші БСГ В30П1F200W6 використано склад: цемент М - 500 – 350 кг, щебінь 5-20 мм – 1140 кг, щебінь 2-5 мм – 200 кг, пісок – 600 кг, вода – 135 кг, комплексна добавка ШАГ – ПА – 1,1 % від маси цементу.

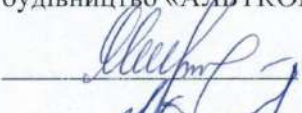
Було виготовлено 728,5 м³ монолітного цементобетону В30П1F200W6.

Бетонування відбувалося при температурі повітря 5 ... 30 °С.

Міцність на стиск зразків – кубів цементобетону, які тверднули в нормальних умовах становить: $R_{cm}^7 = 39,5$ МПа, $R_{cm}^{28} = 52,1$ МПа, середня щільність – 2350 кг/м³, вміст залученого повітря – 5,66 %.

Завдяки застосуванню комплексної добавки ШАГ – ПА та раціонального підбору складу цементобетонної суміші покращено будівельно – технологічні властивості цементобетонної суміші, фізико – механічні властивості цементобетону, продуктивність бетоноукладальника збільшилась в 1,5 рази із 73,3 м³ до 110 м³/зміну і наблизилась до конструктивно можливої.

Додаток – розрахунок економічної ефективності.

Представники Національного транспортного університету	Представники ТОВ «Шляхове будівництво «АЛЬТКОМ»
 Ю.М. Дорошенко	 І.В. Якимович
 Н.П. Чиженко	 М.В. Кос

ДОДАТОК

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Генеральний директор ТОВ «Шляхове
будівництво «АЛЬТКОМ»
Антошук А.В.

2017 р.



РОЗРАХУНОК

економічної ефективності впровадження дослідно – промислових партій дорожніх
цементобетонів із комплексною добавкою ШАГ – ПА

При виконанні робіт по виготовленню дослідно-промислової партії цементобетонної суміші для будівництва монолітного парапетного огороження типу “Нью – Джерсі” було встановлено технічну та економічну доцільність використання комплексної добавки поліфункціональної дії вітчизняного виробництва ШАГ – ПА. Це дозволить подовжити терміни експлуатації цементобетонних виробів та буде економічно ефективніше ніж добавка – аналог зарубіжного виробництва. Розрахунок виконано у відповідності до СН 509 – 78 “Инструкция по определению экономической эффективности использования в строительстве новой техники, изобретений и рационализаторских предложений” за формулою:

$$E = (C_1 - C_2) \cdot A,$$

де C_1 , C_2 – собівартість застосовуваних важких бетонів із комплексними добавками зарубіжного і вітчизняного виробництва;

A – обсяг виробництва.

Собівартість дослідної партії важкого цементобетону визначали виходячи з діючих цін на матеріали.

Розрахунок собівартості дорожнього цементобетону із комплексною добавкою вітчизняного виробництва у порівнянні із добавкою – аналогом зарубіжного виробництва наведено в таблиці.

Таблиця – Порівняльний розрахунок собівартості дорожнього цементобетону за базовим варіантом (із застосуванням добавки – аналога зарубіжного виробництва) та із застосуванням запропонованої комплексної добавки ШАГ – ПА.

Статті витрат	Одиниця виміру	Ціна за од., грн	Добавка зарубіжний аналог		ШАГ – ПА	
			витрата на 1 м ³	вартість, грн.	витрата на 1 м ³	вартість, грн.
Цемент	кг		400	682,33	350	597,04
Вода	кг		160	-	135	-
Пісок	кг		450	60,75	600	81,00
Щебінь 5-20мм	кг		1200	207,36	1140	196,99
Щебінь 2-5 мм	кг		150	19,62	200	26,16
Комплексна добавка	кг		5,4	100,37	5,5	126,08
Всього				1070,43		1027,27
Всього з ПДВ:				1284,52		1232,72

Економічний ефект, отриманий при виготовленні та використанні 1 м³ складає:

$$E = (C_1 - C_2) \cdot A,$$

$$E = (1284,52 - 1232,72) \cdot 1 = 51,8 \text{ грн.}$$

Економічний ефект, отриманий при виготовленні та використанні 728,5 м³ розробленого цементобетону складає:

$$E = (1284,52 - 1232,72) \cdot 728,5 = 37736,3 \text{ грн.}$$

Таким чином, впровадження дорожнього цементобетону із комплексною добавкою ШАГ – ПА в кількості 1,1 % від маси цементу дозволяє досягти питомого економічного ефекту – 51,8 грн./м³ цементобетону у порівнянні із добавкою аналогом зарубіжного виробництва.

«УЗГОДЖЕНО»

Головний бухгалтер ТОВ «Шляхове
будівництво «АЛЬТКОМ»



Подоліна С.М.



ТОВ «Технобазальт-Інвест»

Адреса заводу:
вул. Князів Сангушків, 95,
м. Славути,
Хмельницька область, 30002,
Україна

www.technobasalt.com

Головний офіс:
вул. Омеляновича-Павленка, 4/6,
офіс 1105, м. Київ,
Україна
тел. (044) 280-93-61, 280-12-23
факс (044) 280-61-64, 280-12-24
email: sales@technobasalt.com

Довідка

Видана аспіранту кафедри дорожньо-будівельних матеріалів і хімії
Чиженко Наталії Петрівні

Про те, що Чиженко Н.П. приймала участь при розробці та впровадженні рецептів бетонної суміші з додаванням базальтової фібри для верхнього шару цементобетонного покриття автомобільної дороги в місті Ладизин та для цементобетонних перонів міжнародного аеропорту «Одеса». На основі лабораторних досліджень нею був підібраний оптимальний вміст базальтової фібри для дорожнього та аеродромного бетону, в результаті чого був одержаний цементобетон підвищеної тріщиностійкості.

Генеральний директор
ТОВ «Технобазальт-Інвест»



Васильчишина С. А.









УКРАЇНА



СВІДОЦТВО
про реєстрацію авторського права на твір

№ 73075

Літературний письмовий твір науково-технічного характеру "Стандарт організації України. Дорожньо-будівельні матеріали. Визначення розрахункових модулів пружності. СОУ 45.2-00018112-059. Проект"

(вид, назва службового твору)

Автор(и) Мозговий Володимир Васильович, Оніщенко Артур Миколайович, Баран Сергій Анатолійович, Куцман Олександр Михайлович, Лаптева Наталія Сергіївна, Чиженко Наталія Петрівна, Гудіменко Катерина Володимирівна

(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Авторські майнові права належать Національний транспортний університет, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, м. Київ, 01010

(повне ім'я фізичної та/або повне офіційне найменування юридичної особи, адреси)

Дата реєстрації 25.07.2017



Державний секретар Міністерства економічного розвитку і торгівлі України **О. Ю. Перевезенцев**



УКРАЇНА



СВІДОЦТВО
про реєстрацію авторського права на твір

№ 97238

Науковий твір "Методологія розрахунку цементобетонного покриття
автомобільних доріг на довговічність"
(вид, назва твору)

Автор(и) **Онищенко Артур Миколайович, Лапченко Артем Сергійович,
Чиженко Наталія Петрівна**
(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Дата реєстрації 15.04.2020



Заступник Міністра розвитку економіки,
торгівлі та сільського господарства
України **Д. О. Романович**





ГРАМОТА

КОМУНАЛЬНОЮ КОРПОРАЦІЄЮ «КИЇВАВТОДОР»

НАГОРОДЖУЄТЬСЯ

**ЧИЖЕНКО
НАТАЛІЯ ПЕТРІВНА**

*старший викладач кафедри мостів, тунелів та гідротехнічних споруд
факультету транспортного будівництва
Національного транспортного університету*

**за особистий вагомий внесок в розвиток
дорожньо-транспортної галузі та освітнього середовища,
високий професіоналізм, багаторічну плідну працю
та з нагоди Дня автомобіліста і дорожника**

В.о. генерального директора

О. Федоренко

08 жовтня 2020 року
№ 326-к







м. Київ

Дата видачі: 5.06.2018

СЕРТИФІКАТ

CERTIFICATE

№ 02

про підвищення кваліфікації

ЧИЖЕНКО НАТАЛІЯ ПЕТРІВНА

за напрямом

«БУДІВНИЦТВО»

з 02.01.2018 по 31.05.2018 р.

Основні теми:

- Сучасні дорожньо-будівельні матеріали у транспортному будівництві.
- Сучасні методи, технології, машини і механізми виконання будівельних та ремонтних робіт.
- Сучасна структура управління дорожнім господарством України.

Д.О. Коглубей





Rheinheim S.A.

Ch. de la Mousse 53A
1226 Thonex - Geneva
SWITZERLAND

Advanced Certificate 300720/8 (internship)

This certificate confirms that **Nataliia Petrivna Chyzhenko** (born on September 29th, 1984), Associate Professor of the Department of Bridges, Tunnels and Hydraulic Structures of National Transport University, got the internship at Rheinheim SA and took part in a training program for scientific and pedagogical workers to improve qualification (internship) study of innovative methods of forming students' knowledge of basic modern trends in the study of academic disciplines from 12th of September, 2019 to 12th of March, 2020 in the following scientific fields:

- Fluid and Gas Dynamics, Applied Hydraulics;
- Engineering Fluid and Gas Mechanics;
- Engineering Hydraulics;
- Hydraulic Engineering Installation;
- Hydraulic Engineering and Regulatory Documentation;
- Scientific Research Methodology;
- Innovative Methods and Approaches in Teaching.

A scientific report on the topic: "Improving the quality of hydraulic structures for design, construction, repair and maintenance" was concluded. This report received positive feedback from participants and members of the Organizing Committee.

«Rheinheim S.A.» Director


Irina Wyss
A circular blue stamp with the text "RHEINHEIM SA" at the top, "CH-660-7178008-1" in the center, and "Geneva * Switzerland" at the bottom.

12.03.2020

RHEINHEIM

ДОДАТОК К
СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ТА
ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

Список опублікованих праць за темою дисертації

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

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

1. A.N. Onyshchenko, A.S. Lapchenko, N.P. Chyzenko, S.P. Voznyi Evaluation of inflammatory concerns in cementbound and other cemento-layers of road clothing for care and health. *Slovak international scientific journal*. Slovakia. 2019. № 27. P. 8-13. <http://sis-journal.com/wp-content/uploads/2019/04/Slovak-international-scientific-journal-No27-2019.pdf>

Статті у фахових виданнях:

2. Чистяков В.В., Шургая А.Г., Дорошенко Ю.М., Чиженко Н.П., Сербін В.П., Дорошенко О.Ю. Вплив комплексної добавки на структуроутворення і властивості цементобетонну для покриття доріг. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво: наук.-техн. збірник*. Київ. 2011. Вип. 82. С. 59-64.

3. Чистяков В.В., Шургая А.Г., Дорошенко Ю.М., Чиженко Н.П. Цементобетони для покриття доріг. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво: наук.-техн. збірник*. Київ. 2012. Вип. 85. С. 48-55.

4. Гамеляк І.П., Шургая А.Г., Якименко Я.М., Чиженко Н.П., Карпюк О.А. Порівняння сучасних добавок для високоміцного дорожнього бетону. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво: наук.-техн. збірник*. Київ. 2014. Вип. 92. С. 38-49.

5. Чиженко Н.П. Оцінка тріщиностійкості модифікованого дорожнього бетону. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво: наук.-техн. збірник*. Київ. 2016. Вип. 97. С. 20-26.

6. Гамеляк І.П., Шургая А.Г., Якименко Я.М., Чиженко Н.П. Математичні моделі властивостей високоміцних цементобетонів для

дорожнього будівництва. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. Харків. 2017. Вип. 169. С. 103-111.

7. Онищенко А.М., Лапченко А.С., Чиженко Н.П. «Оцінка напружень від усадки в цементобетонному покритті автомобільних доріг». *Вісник НУЛП*, серія «Теорія та практика будівництва» Львів. 2019. № 912. С. 132 - 138.

8. Онищенко А.М., Гаркуша М.В., Чиженко Н.П. Перевірка відповідності гранулометричного складу цементобетонних сумішей. *Вісник ХНАДУ*, 2019. Вип.86. С.53 – 63. DOI:10.30977/BUL.2219-5548.2019.86.2.53

9. Онищенко А.М., Чиженко Н.П. Оцінка довговічності цементобетонного покриття автомобільних доріг. *Дороги і мости*. Київ, 2020. Вип. 22. С. 138-148. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2020.22.138>

10. Онищенко А.М., Худолій С.М., Чиженко Н.П. Числове моделювання впливу розташування транспортного навантаження на цементобетонне покриття автомобільних доріг. *Вісник НТУ*. Серія «Технічні науки»: наук.-техн. збірник. Київ. 2020. Вип. 46. С. 237-253.

Опубліковані праці апробаційного характеру:

11. Шургая А.Г., Гудименко К.В., Чиженко Н.П. Теоретические и практические аспекты улучшения технологических показателей, экономической целесообразности и долговечности высокопрочных цементобетонов в дорожном строительстве. *Будівельні матеріали, вироби та санітарна техніка*, наук.-техн. збірник. Київ. 2013. Вип. 49. С. 154-163.

12. Чиженко Н.П. Высокопрочный цементобетон с комплексными добавками для дорожного и аэродромного строительства. *Автомобильные дороги и мосты*. Минск. 2015. № 2 (16). С. 69-74.

13. Шургая А.Г., Чиженко Н.П. Высокопрочный бетон в дорожном строительстве (теоретические аспекты). *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*: наук.-техн. збірник. Київ. 2016. Вип. 96. С. 43-49.

14. Шургая А.Г., Гамеляк І.П., Якименко Я.Н., Чиженко Н.П., Карпюк А.А. Высокопрочный цементобетон с комплексными добавками. *Мир дорог*. Санкт-Петербург. 2017. № 98. С.72-78.
15. Дорошенко Ю.М., Дорошенко О. Ю., Борковський П.П., Чиженко Н.П., Куцоконь О., Наконешна Я. Технологічні методи регулювання властивостей бетону. *Будівельні матеріали, вироби та санітарна техніка*, наук.-техн. збірник. Київ. 2014. Вип. 51. С.50-54.
16. Гамеляк І.П., Шургая А.Г., Якименко Я.М., Дмитриченко А.М., Чиженко Н.П. Удосконалення технології влаштування монолітного парапетного огороження типу “Нью-Джерсі”. *Вісник НТУ*. Серія «Технічні науки»: наук.-техн. збірник. Київ. 2016. Вип.1 (34). С.78 - 88.
17. Онищенко А.М., Гаркуша М.В., Чиженко Н.П. Розробка методики оцінки довговічності цементобетонного покриття на автомобільних дорогах з урахуванням спільного впливу зміни температури та дії транспорту. *Збірник матеріалів І Міжнародної науково – технічної конференції “Дорожньо-будівельний комплекс: проблеми, перспективи, інновації”*. м. Харків, ХНАДУ, 2019. С. 197-198.
18. Онищенко А.М., Гаркуша М.В., Чиженко Н.П.. Розробка методики оцінки довговічності цементобетонного покриття на автомобільних дорогах з урахуванням спільного впливу зміни температури та дії транспорту. *Збірник матеріалів І Міжнародної науково – технічної конференції “Дорожньо-будівельний комплекс: проблеми, перспективи, інновації”*. м. Харків, ХНАДУ, 2019. С. 197-198.
19. Онищенко А.М., Чиженко Н.П. Метод оцінки довговічності цементобетонного покриття автомобільних доріг. *Збірник тез міжнародної науково-технічної конференції Гідротехнічне і транспортне будівництво*. Одеса. 28-29 травня 2020 р. С.85-89.

Опубліковані праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

20. Мозговий В.В., Пугач М.О., Мозгова Л.А., Куцман О.М., Чиженко Н.П., Соколюк М.Ю. Напрямки застосування золошлаків ТЕС у будівництві автомобільних доріг. *Вісник НТУ. Серія «Технічні науки»: наук.-техн. збірник*. Київ. 2014. Вип. 29. С. 199-205.

21. Чиженко Н.П. Дослідження можливості застосування латексів як полімерної добавки в цементний бетон. *Будівельні матеріали, виробництва та санітарна техніка*, наук.-техн. збірник. Київ. 2009. Вип. 33. С.68 -73.

22. Чиженко Н.П. Вплив полімерної добавки на фізико-механічні властивості цементобетонного покриття доріг. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*: наук.-техн. збірник. Київ. 2008. Вип. 75. С. 153 -157.

23. Дорошенко Ю.М., Дорошенко О. Ю., Борковський П.П., Чиженко Н.П. Модифікація дорожнього цементобетону відходами хімічної промисловості. *Автошляховик України*: наук.-виробн. журнал. 2011. № 6. С.42-45.

Свідоцтва та патенти:

24. Свідоцтво України про реєстрацію авторського права на твір № 73075 Україна. Літературний письмовий твір науково-технічного характеру «Стандарт організації України. Дорожньо-будівельні матеріали. Визначення розрахункових модулів пружності. СОУ 45.2-00018112-059 Проект» Мозговий В.В., Онищенко А.М., Баран С.А., Куцман О.М., Лаптева Н.С., Чиженко Н.П., Гудіменко К.В. Дата реєстрації 25.07.2017 р.

25. Свідоцтво України про реєстрацію авторського права на твір № 81519 Україна. Літературний письмовий твір науково-технічного характеру «Оцінка відповідності гранулометричного складу цементобетонних дорожніх сумішей» Онищенко А.М., Гаркуша М.В., Чиженко Н.П. Дата реєстрації 14.09.2018 р.

26. Свідоцтво України про реєстрацію авторського права на твір № 81519 Україна. Літературний письмовий твір науково-технічного характеру.

«Удосконалення методу проектування складу високоміцного дорожнього цементобетону» Чиженко Н.П. Дата реєстрації 14.09.2018 р.

27. Свідоцтво України про реєстрацію авторського права на твір № 81520 Україна. Літературний письмовий твір науково-технічного характеру. «Підвищення довговічності дорожнього цементобетону за рахунок використання комплексної хімічної добавки» Чиженко Н.П. Дата реєстрації 14.09.2018 р.

28. Свідоцтво України про реєстрацію авторського права на твір № 85058 Україна. Літературний письмовий твір науково-технічного характеру. «Напруження усадки в цементобетонних та інших цементовмісних шарах дорожнього одягу при тужавінні та твердінні» Онищенко А.М., Лапченко А.С., Чиженко Н. П. Дата реєстрації 31.01.2019 р.

29. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 97238 Україна. Літературний письмовий твір науково-технічного характеру. «Методологія розрахунку цементобетонного покриття автомобільних доріг на довговічність». Онищенко А.М., Лапченко А.С., Чиженко Н.П. Дата реєстрації 15.04.2020 р.