

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

**МАРШДІ КОСАЙ САХІБ РАДІ**



УДК 666.965:541.183

**МОДИФІКОВАНИЙ ДОРОЖНІЙ ЦЕМЕНТНИЙ БЕТОН  
В УМОВАХ ЖАРКОГО КЛІМАТУ**

05.23.05 – будівельні матеріали та вироби

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2015

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі будівельних конструкцій Луганського національного аграрного університету Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:** кандидат технічних наук, ст. наук. співробітник  
**НАЗАРОВА** Антоніна Василівна

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, доцент  
**ТОЛМАЧОВ** Сергій Миколайович,  
Харківський національний автомобільно-дорожній  
університет, професор кафедри дорожньо-  
будівельних матеріалів;

кандидат технічних наук, доцент  
**КАЗИМАГОМЕДОВ** Ібрагім Емірчубанович,  
Харківський національний університет будівництва  
та архітектури, доцент кафедри будівельних матеріа-  
лів та виробів.

Захист відбудеться « 25 » грудня 2015 р. о 12<sup>30</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.820.02 Українського державного університету залізничного транспорту за адресою: 61050, Україна, м. Харків, майд. Фейєрбаха, 7.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Українського державного університету залізничного транспорту за адресою: 61050, Україна, м. Харків, майд. Фейєрбаха, 7.

Автореферат розісланий « 17 » листопада 2015 р.

В.о. ученого секретаря  
спеціалізованої вченої ради,  
д.т.н., професор



А.П. Фалендиш

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Зростання вантажопідйомності автомобілів та їх швидкостей, високі транспортно-експлуатаційні витрати вимагають створення якісних дорожніх одягів, поліпшення будівельно-технічних властивостей покриттів, збільшення терміну їх служби. Світова практика свідчить про те, що в низці розвинутих країн як основна альтернатива асфальтобетону при влаштуванні покриттів автомобільних доріг розглядається цементний бетон. Основна перевага дорожніх одягів з цементобетонним покриттям полягає в тому, що при приблизно однаковій будівельній вартості вони характеризуються значно більшим міжремонтним терміном експлуатації у порівнянні з нежорсткими дорожніми одягами. Цементобетонні покриття забезпечують більш високий рівень транспортно-експлуатаційного стану автомобільних доріг і умов руху ними протягом усього терміну експлуатації. В той же час, для підвищення конкурентоспроможності цементобетонних покриттів у порівнянні з асфальтобетонним необхідно вдосконалювати властивості дорожнього бетону, технологію будівництва та конструкції покриттів на його основі. Підвищення якості та довговічності цементобетонних покриттів може бути досягнуто за рахунок застосування у складі бетону комплексу органо-мінеральних модифікаторів, а також заходів з догляду за свіжовідформованим бетоном, що набуває особливої актуальності при будівництві доріг у складних кліматичних умовах Республіки Ірак.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дослідження виконані в межах держбюджетної науково-дослідної теми на замовлення Міністерства освіти і науки України Донбаською національною академією будівництва і архітектури: Д-2-04-13 "Нові композиційні матеріали для промислового та дорожнього будівництва, що відрізняються підвищеною довговічністю, зниженою ресурсоемністю та енергоемністю виробництва" (2013-2014 рр., № 0113U001920). Автор дисертації є виконавцем НДР, його внесок полягає у проведенні частини експериментальних досліджень з розробки і оптимізації складів високоякісного дорожнього цементобетону, вивчення його властивостей, а також впровадження результатів виконаної роботи у виробництво.

**Мета дослідження** – теоретичне та експериментальне обґрунтування одержання складів і технології високоякісних дорожніх цементних бетонів з компенсованою усадкою, що експлуатуються в умовах сухого жаркого клімату Республіки Ірак, на основі встановлення закономірностей впливу комплексу модифікаторів (активна мінеральна добавка (тонкомелений наповнювач), суперпластифікатор, розширний компонент, добавка, що знижує усадку, і агент внутрішнього догляду) на структуроутворення і властивості бетону.

### **Задачі дослідження:**

– виконати аналіз існуючих уявлень про структуру і властивості високоякісних дорожніх цементних бетонів і вплив поліфункціональних органо-мінеральних модифікаторів на структуроутворення бетонних сумішей та бетонів;

- дослідити вплив комплексу модифікаторів: суперпластифікатор, добавка, що знижує усадку, мікрокремнезем, на властивості цементних паст та самоущільнювальних бетонних сумішей;

- вивчити кінетику тверднення бетону з комплексом органо-мінеральних модифікаторів;

- встановити закономірності впливу комплексу органо-мінеральних модифікаторів на формування складу продуктів гідратації цементних паст;

- виконати оптимізацію складу дорожнього цементного бетону за критеріями рухливості бетонної суміші та міцності бетону при стиску;

- дослідити вплив комплексу модифікаторів на обмежене розширення і обмежену усадку бетону, а також ймовірність тріщиноутворення бетону;

- розробити технологічний регламент влаштування монолітних цементобетонних покриттів і основ автомобільних доріг;

- здійснити дослідно-промислове впровадження результатів дослідження та оцінити їх техніко-економічну ефективність.

*Об'єкт дослідження* – високоякісні дорожні цементні бетони з компенсованою усадкою, що містять комплекс органо-мінеральних модифікаторів.

*Предмет дослідження* – процеси і явища, що визначають закономірності формування структури і властивостей високоякісних дорожніх цементних бетонів, які містять комплекс органо-мінеральних модифікаторів.

**Методи дослідження.** Експериментальні дослідження виконано згідно з стандартними та спеціальними методами з використанням атестованих засобів вимірювальної техніки та випробувального обладнання. Склад продуктів гідратації в'язучого встановлено за даними рентгенофазового аналізу. Оцінювання ймовірності тріщиноутворення бетону здійснено на оригінальній установці відповідно до ASTM C1581-04 "Standard Test Method for Determining Age at Cracking and Induced Tensile Stress Characteristics of Mortar and Concrete under Restrained Shrinkage". Оптимізацію складу дорожніх цементних бетонів виконано з використанням математичних моделей. Для обробки та аналізу результатів експериментів застосовано методи математичної статистики.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає у наступному:

- здійснено теоретичне та експериментальне обґрунтування одержання високоякісних дорожніх цементних бетонів з компенсованою усадкою, що експлуатуються в умовах сухого жаркого клімату, за рахунок використання комплексу органо-мінеральних модифікаторів, що містить активну мінеральну добавку (тонкомелений наповнювач); суперпластифікатор з високим водоредукуючим ефектом; розширний компонент на основі оксидів кальцію і магнію, одержаний випалюванням доломітизованого вапняку; добавку, що зменшує усадку бетону (Shrinkage Reducing Admixture), на основі поліпропіленгліколю; агент внутрішнього догляду (попередньо водонасичений дрібний пористий заповнювач);

- за даними рентгенофазового аналізу встановлено, що комплексна органо-мінеральна добавка впливає на кінетику формування та склад продуктів гідратації каменя в'язучого: уповільнюючий вплив добавки, що зменшує усадку SRA 25

(зниження інтенсивностей дифракційних відображень портландиту  $d=0,493$ ;  $0,312$ ;  $0,145$  нм та еtringіту  $d=0,561$ ;  $0,469$ ;  $0,215$  нм); інтенсифікуючий гідратацію вплив агенту внутрішнього догляду цементного каменю (зростання інтенсивностей дифракційних відображень портландиту, гідросилікатів кальцію  $d=0,501$ ;  $0,301$ ;  $0,247$ ;  $0,208$  нм, брусита  $d=0,475$ ;  $0,158$  нм);

– досліджено новий ефект впливу комбінованого застосування розширеного компоненту на основі оксидів CaO і MgO, добавки, що зменшує усадку (SRA), та агенту внутрішнього догляду, на показники обмеженого розширення (обмеженої усадки) та ймовірність ризику тріщиноутворення бетону;

– визначено області оптимальних складів бетонних сумішей за вмістом комплексного модифікатору та величини водоцементного співвідношення, що забезпечують одержання бетонних сумішей з показником рухливості за осадкою стандартного конусу в межах 1-4 см (або розпливу конусу в межах 310-370 мм для самоущільнювального бетону), а також бетону з границею міцності при стиску в проектному віці не менше 55 МПа.

#### **Практичне значення одержаних результатів:**

– розраховано й оптимізовано склади високоякісних дорожніх цементних бетонів, у тому числі самоущільнювальних, застосування яких у дорожньому будівництві забезпечує покращення якості дорожнього одягу, підвищення швидкості будівництва, зниження енергоспоживання та трудомісткості процесу;

– розроблено "Технологічний регламент влаштування монолітних цементобетонних покриттів і основ автомобільних доріг", який впроваджено ДП "Луганський облавтодор" ВАТ "Автомобільні дороги України";

– здійснено впровадження результатів дослідження будівельною компанією "Alfyafy" (Республіка Ірак, м. Вавилон) при будівництві ділянки автомобільної дороги сполученням "Babylon – Hashemite".

Результати дисертаційного дослідження впроваджені в навчальний процес Луганського національного аграрного університету при підготовці студентів спеціальності 7.06010105 (8.06010105) "Автомобільні дороги та аеродроми".

**Особистий внесок здобувача** полягає у виконанні експериментальних досліджень, обробці та інтерпретації одержаних даних, впровадженні результатів досліджень у виробництво. Окремі складові теоретичних та експериментальних досліджень, а також впровадження результатів дисертаційної роботи виконано із співавторами наукових праць, що викладено у списку публікацій.

**Апробація дисертаційної роботи.** Основні положення дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на засіданнях кафедри будівельних конструкцій Луганського НАУ (2012-2014 рр.) та щорічних науково-технічних конференціях будівельного факультету ЛНАУ (2012-2014 рр.). Матеріали дисертації доповідалися також на: XII міжнародній конференції молодих вчених, аспірантів, студентів "Будівлі та конструкції із застосуванням нових матеріалів та технологій" (м. Макіївка, ДонНАБА, 19 квітня 2013); міжнародній науково-практичній конференції "Актуальні проблеми фізико-хімічного матеріалознавства" (м. Макіївка, ДонНАБА, 30 вересня - 4 жовтня 2013); VIII науково-практичному семінарі "Ни-

зкоенергоємні в'яжучі, бетони і розчини" (м. Рівне, НУВГП, 30 жовтня 2013); міжнародній конференції "Структуроутворення, міцність і руйнування композиційних будівельних матеріалів і конструкцій" (м. Одеса, ОДАБА, 11-13 березня 2014); международной студенческой научно-практической конференции "Строительство и архитектура-2015" (г. Ростов-на-Дону, 16 апреля 2015).

**Публікації.** За темою дисертації опубліковано автором самостійно та у спів-авторстві 8 наукових праць, у тому числі 6 статей – у фахових виданнях, рекомендованих МОН України, 1 стаття – у зарубіжному виданні та 1 тези доповіді на конференції.

**Структура і обсяг дисертації.** Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 180 найменувань на 19 сторінках, двох додатків, містить 179 сторінок, у тому числі 116 сторінок основного тексту, 49 рисунків, 31 таблицю.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

**У вступі** обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету і задачі дисертаційного дослідження, викладено наукову новизну та практичне значення роботи, приведено інформацію щодо структури та обсягу дисертації, публікацій та апробації роботи.

**У першому розділі** проаналізовано сучасний стан питання з напрямку теми дисертації, викладено теоретичні передумови досліджень, на основі яких сформульовано наукову гіпотезу дисертаційного дослідження.

Вітчизняними та зарубіжними ученими в галузі будівельного матеріалознавства в якості узагальнюючих переваг будівельно-технічних характеристик цементобетонних покриттів перед асфальтобетонними встановлено наступне: суттєво більш висока міцність при стиску, що забезпечує належну несучу здатність дорожнього полотна; стабільність деформаційних властивостей цементобетону при коливаннях температури, що гарантує рівність покриттів і виключає колійність, напливи тощо; зростання міцності цементобетону в часі за сприятливих умов експлуатації; висока морозостійкість бетону при застосуванні суперпластифікаторів та повітровтягуючих добавок; довговічність – термін служби покриттів до капітального ремонту при високій якості будівництва і нормальній експлуатації може досягати 50 років; достатні зносостійкість та шорсткість поверхні, що забезпечує розвиток високої швидкості автомобілів; стабільність коефіцієнту зчеплення покриття з колесами автомобілів, слабка його залежність від ступеня зволоження; стійкість до впливу масел і палива; можливість використання місцевих сировинних матеріалів (цемент, заповнювачі), незалежність від цін на нафтовому ринку; світлий колір дороги, що дозволяє значно зменшити витрати на її освітлення; низький рівень шуму; доступність обладнання для швидкісного будівництва бетонних покриттів з високими показниками рівності; значне зниження трудовитрат при влаштуванні дорожніх основ і покриттів з литих бетонних сумішей, поліпшення умов праці, зменшення енергоємності та вартості будівництва доріг

(В.Ф. Бабков, І.П. Гамеляк, Н.Д. Гах, І.М. Грушко, Л.Й. Дворкін, О.Л. Дворкін, А.Г. Ільїн, М.С. Коганзон, В.Ф. Коровяков, А. Лауринавичюс, Є.Ф. Левицький, В.М. Могілевич, В.П. Носов, Б.С. Радовський, Р.М. Русин, С.М. Толмачов, В.В. Ушаков, О.М. Шейнін, В.С. Юшков, R. Hela, L. Bodnarova, J.-J. Mbele, M. Ondova, S.P. Shah, A. Sicakova, K. Wang та ін.).

В той же час, кліматичні умови жарких, посушливих регіонів, зокрема країн Близького Сходу, є вкрай несприятливими для технологічних процесів формування дорожніх покриттів з бетону. Температура протягом літньої доби може змінюватися в межах 30°C, відносна вологість повітря від 40 до 100 %. Це створює безліч проблем при влаштуванні дорожніх покриттів – бетон одночасно піддається дії високої температури і низької відносної вологості навколишнього повітря, вітру та інтенсивної сонячної радіації, що в сукупності значно впливає на процес твердіння і властивості бетону. Щодо властивостей бетонних сумішей необхідно зазначити підвищення водопотреби для забезпечення робочої консистенції, складність контролювання об'єму втягнутого повітря, більш високу швидкість втрати рухливості, що обумовлює в деяких випадках необхідність додавання води замішування на будівельному об'єкті. Для бетону це має такі наслідки: зниження проектної міцності; більш висока схильність до розвитку усадки при висиханні та термічного тріщиноутворення; знижена довговічність внаслідок наявності тріщин; більш висока ймовірність розвитку корозії сталеві арматури; підвищена проникність; знижена зносостійкість тощо (В.Д. Копилов, А.В. Мішутін, С.А. Миронов, В.М. Пунагін, Є.І. Шмітько, А. Aguado, S. Ahmad, Ali H. Nameed, K.E. Hassan, H.Z. Hussein, V. Khan, J. Ortiz, I. Soroka).

Головними причинами тріщиноутворення в бетонних покриттях і конструкціях, які не пов'язані з помилками проектних рішень, технології будівельно-монтажних робіт та експлуатаційними навантаженнями, є об'ємні зміни, що викликані усадкою. Останнім часом значно більше уваги приділяється дослідженням усадки в ранньому віці, коли бетон характеризується мінімальною міцністю на розтяг і модулем пружності, щоб витримувати внутрішні напруження, обумовлені усадкою за наявності будь-яких умов обмеження деформацій (армування, зчеплення з основою дорожнього полотна, з'єднання з іншими будівельними конструкціями тощо). Застосування бетонів з компенсованою усадкою – найбільш ефективний спосіб запобігання або мінімізації тріщиноутворення в покриттях доріг і мостів, залізобетонних конструкціях внаслідок усадки. Для цього обмежене розширення повинно бути більше за величиною прогнозованої усадки. Це досягається за рахунок використання інноваційних матеріалів, таких як добавки, що знижують усадку (Shrinkage Reducing Admixtures – SRA), синтетичні волокна, розширні цементні (добавки) та ін. (F. Canpolat, M. Collepardi, K. Folliard, P. Lura, J. Mora-Ruacho). В той же час, при витраті SRA приблизно 4-5 кг/м<sup>3</sup> та її вартості в Європі 3-5 €/кг, підвищення собівартості 1 м<sup>3</sup> бетону становить до 12-20 €/м<sup>3</sup>, при цьому проблема усадки повною мірою не вирішується. Така проблема може бути вирішена при застосуванні цементів з компенсованою усадкою, механізм

тверднення яких ґрунтується на розширенні цементної матриці на відміну від усадки звичайних цементів.

Аналіз літературних джерел дозволяє виділити дві головні проблеми, що стримують широке застосування розширних цементів (добавок) сульфоалюмінатного типу – яскраво виражена залежність рівня розширення від вологісного догляду та можливе руйнування бетону внаслідок вторинного утворення еtringіту. З цієї точки зору перспективним є застосування розширних компонентів на оксидній основі: гідрати окисів кальцію і магнію є стабільними сполуками, і на відміну від в'язучих на сульфоалюмінатній основі, в цементному камені не відбуваються фазові зміни, що ведуть до порушення структури і втрати міцності.

Науковою школою М. Collepardi виявлено синергетичний ефект комбінованого застосування розширного компоненту на основі CaO і добавки, що знижує усадку (SRA), що дозволяє одержати бетон з компенсованою усадкою навіть за відсутністю вологісного догляду. Однією з гіпотез синергізму такої комплексної добавки є той факт, що з пониженням розчинності утворюваного гідроксиду кальцію розширення системи підвищується. Отже, значний інтерес може також представляти дослідження впливу внутрішнього вологісного догляду на розширення цементної системи, що містить комплексну добавку (CaO + MgO + SRA).

Таким чином, на підставі аналізу стану питання та теоретичних передумов дослідження висунута наступна *наукова гіпотеза*. Необхідний рівень показників якості бетонних сумішей та бетонів, що використовуються для влаштування жорстких покриттів автомобільних доріг, які бетонуються й експлуатуються в умовах сухого жаркого клімату республіки Ірак, може бути забезпечений при модифікуванні бетонів комплексом добавок на основі суперпластифікатора з високим водоредукуючим ефектом; розширного компоненту на основі оксидів кальцію і магнію, одержаного випалом доломіту (доломітизованого вапняку); добавки, що знижує усадку бетону (SRA), на основі поліпропіленгліколю; агенту внутрішнього догляду (попередньо водонасичений дрібний пористий заповнювач). Це забезпечить одержання високотехнологічних бетонних сумішей, усунення ризику тріщиноутворення при твердненні та експлуатації бетону від дії різних видів усадки і, як наслідок, підвищення довговічності покриттів автомобільних доріг та будівельних конструкцій дорожньої інфраструктури.

**У другому розділі** наведено властивості вихідних матеріалів та викладено методи досліджень.

При проведенні експериментів як вихідні матеріали прийнято:

- в'язучі речовини: портландцемент ПЦ І-500 Н виробництва ПАТ "Хайделберг Цемент Україна" (м. Амвросіївка), що відповідає вимогам ДСТУ Б В.2.7-46:2010 "Цементи загальнобудівельного призначення. Технічні умови"; портландцемент першого типу (Ordinary Portland Cement type (I), Tassloja Cement Factory, Республіка Ірак) і сульфатостійкий цемент (Sulphate Resistance Cement, Al Qa'im, Республіка Ірак), що відповідають вимогам стандарту Iraqi Specifications Limits (I.Q.S. 5/1984);



- заповнювачі: кварцовий пісок (П) Кондрашевського кар'єру Луганської області (Україна) (ДСТУ Б В.2.7-32-95 "Пісок щільний природний для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій і робіт) ( $M_{кр}=1,32$ ) та Карбельського кар'єру (Ірак) (Iraqi Specifications Limits (I.Q.S. 45/1984)) ( $M_{кр}=2,0$ ); щебінь (Щ) гранітний Торезького кар'єру (фракція 5-20 мм). Пористий заповнювач у вигляді керамзитового піску (КП) з насипною щільністю  $780 \text{ кг/м}^3$  і водопоглинанням протягом 24 годин 28 % за масою використано як агент внутрішнього догляду за бетоном;

- мінеральні добавки: мікрокремнезем (МК) "Mareplast SF" ("Marepl") з насипною щільністю  $620 \text{ кг/м}^3$  і вмістом  $\text{SiO}_2$  88 % за масою; мелений вапняк (МВ) ( $S_{пит.}=385 \text{ м}^2/\text{кг}$ );

- хімічні добавки: суперпластифікатори на основі: модифікованого акрилового полімеру Dynamon SR-3 (Marepl, Італія); модифікованого карбоксилатного ефіру Melflux 5581 F (BASF); нафталінсульфонату Conmix SP1B (Англія); добавка, що знижує усадку бетону, на основі поліпропіленгліколевого полімеру Marecure SRA 25 (Marepl, Італія);

- розширний компонент (РК) для бетонів з компенсованою усадкою: одержано випалом при температурі  $1150 \text{ }^\circ\text{C}$  протягом години тонкодисперсного доломітизованого вапняку (Докучаївське рудоуправління, Україна). Порошкоподібну добавку "Expancrete" ("Marepl") застосовано як контрольний зразок.

За даними рентгенофазового аналізу встановлено, що вихідний доломітизований вапняк представлений переважно мінералами доломітом ( $d=0,293; 0,221; 0,182; 0,144 \text{ нм}$ ) та кальцитом ( $d=0,307; 0,211; 0,203; 0,192; 0,189; 0,161 \text{ нм}$ ). Після випалу вихідного порошку всі дифракційні відображення, що характеризують карбонати, зникають. Найбільш характерні дифракційні відображення відповідають утворенням в результаті випалу оксидам кальцію ( $d=0,280; 0,171; 0,145; 0,139 \text{ нм}$ ) і магнію ( $d=0,243; 0,212; 0,149 \text{ нм}$ ).

Експериментальні дослідження виконано за допомогою стандартних та спеціальних методів. Технологічні властивості бетонних сумішей визначали відповідно до вимог ДСТУ Б В.2.7-114-2002 "Бетонні суміші. Методи випробувань"; самоущільнювальних бетонних сумішей – згідно з Європейськими директивами з самоущільнювального бетону (The European Guidelines for Self Compacting Concrete).

Виготовлення зразків для визначення розширення (усадки) бетону в обмеженому стані здійснено у спеціальній формі відповідно до ASTM C878/C878-09 "Standard Test Method for Restrained Expansion of Shrinkage-Compensating Concrete", що має розміри  $0,05 \times 0,05 \times 0,25 \text{ м}$  з обмежувальною обіймою, яка складається з нарізного низьковуглецевого сталевого оцинкованого стержня та двох сталевих пластин. Після формування зразки бетону тверднули протягом доби в формах, а бетонна поверхня була захищена від випаровування вологи поліетиленовою плівкою. Після розпалубки бетонні зразки зберігалися спочатку у воді, потім у повітряних умовах при відносній вологості навколишнього середовища 75-66 %. Терміни тверднення бетонних зразків у різних середовищах і періодичність

вимірювання їх лінійних розмірів визначалися розробленою програмою експериментальних досліджень.

Ризик потенційного тріщиноутворення дорожнього цементного бетону оцінено за показником часу від початку висихання до появи тріщини або зростання рівня напруження бетонного зразку в кільці згідно з методикою ASTM C1581-04 "Standard Test Method for Determining Age at Cracking and Induced Tensile Stress Characteristics of Mortar and Concrete under Restrained Shrinkage". Реєстрація деформацій здійснюється модулем введення-виведення "ОВЕН МВ-110-224.4ТД". Конфігурування модулю здійснюється за допомогою ПК через адаптер інтерфейсу RS-485/RS-232 або RS-485/USB за допомогою програми "Конфігуратор M110".

Склад продуктів гідратації цементного каменя досліджено з використанням рентгенофазового аналізу (дифрактометр "Дрон-4-07": мідне випромінювання з довжиною хвилі  $\lambda=0,154178$  нм, напруга 27 кВ і струм 15  $\mu$ А. Зйомка дифрактограм здійснювалася в покроковому режимі ( $2\theta=10-80^\circ$  з кроком  $0,1^\circ$  і часом експозиції 5 с).

Оптимізацію складу дорожніх цементних бетонів виконано з використанням математичних моделей. Для обробки та аналізу результатів експериментів застосовано методи математичної статистики.

**У третьому розділі** наведено результати досліджень впливу комплексного модифікатору – суперпластифікатор, добавка, що знижує усадку, мікрокремнезем, на властивості цементних паст та самоущільнювальних бетонних сумішей; вивчено кінетику тверднення бетону з комплексом органо-мінеральних модифікаторів, досліджено вплив складу комплексу органо-мінеральних модифікаторів на формування продуктів гідратації в'язучих паст.

Встановлено, що найбільш ефективним способом введення хімічних добавок (суперпластифікатор, добавка, що знижує усадку) до складу цементної пасти (бетонної суміші) для досягнення максимальної вихідної рухливості та її зберігання в часі є змішування сухих компонентів з 100 %-ою витратою води замішування, витримка протягом п'яти хвилин і подальше введення розчинів хімічних добавок. При цьому, комплексна хімічна добавка (суперпластифікатор + SRA) покращує технологічні властивості цементних паст (бетонних сумішей), однак дещо знижує границю міцності цементного каменя (бетону) при стиску як у ранньому (на 6,3-12,3 %), так і в проектному віці (на 5,8-7,9 %). Зменшення міцності, ймовірно, пов'язано зі зниженням ступеня гідратації цементу у зв'язку з тим, що добавка SRA збільшує питому поверхню новоутворень і, відповідно, кількість фізично зв'язаної води. В результаті, в бетонах з низьким значенням водоцементного співвідношення може бути недостатньо води, доступної для гідратації цементу. Однак, з урахуванням пластифікуючого ефекту добавки SRA можливо знизити водоцементне співвідношення без погіршення технологічних властивостей сумішей, що забезпечує усунення негативного впливу добавки на міцність бетону.

При дослідженні впливу комплексного органо-мінерального модифікатора на кінетику зростання міцності бетону при твердненні за нормальних умов у межах 7-28-90-180 діб запроектовано два базових складу бетонних сумішей, які при пев-

ній витраті води забезпечують легкоукладальність за показником рухливості відповідно П1 і П3 (табл. 1). При додаванні до складу цих сумішей суперпластифікаторів (Conmix або SR-3) вихідна рухливість сумішей відповідно збільшується до марки П4 за осадкою стандартного конусу і класу SF1 за показником текучості (діаметру розпливу D=540 мм).

Таблиця 1

## Склад бетонних сумішей

№	Витрата компонентів, кг/м <sup>3</sup>					Добавка, л/м <sup>3</sup>				
	ПЦ	Щ	П	В	В/Ц	Conmix	SR-3	SRA	МК, кг	РК, кг
1	405	1160	540	210,0	0,52	-	-	-	45	-
2	433	980	663	225,0	0,52	-	-	-	48	-
3	405	1160	540	203,6	0,52	-	6,4	-	45	-
4	433	980	663	218,1	0,52	-	6,9	-	48	-
5	405	1160	540	197,1	0,52	-	6,4	6,5	45	28
6	433	980	663	211,2	0,52	-	6,9	6,9	48	30
7	405	1160	540	202,0	0,52	8,0	-	-	45	-
8	433	980	663	201,5	0,52	8,5	-	-	48	-
9	405	1160	540	195,5	0,52	8,0	-	6,5	45	28
10	433	980	663	209,6	0,52	8,5	-	6,9	48	30

Результати експериментів свідчать про те, що практично всі склади бетону показують підвищення показника границі міцності при стиску протягом усього періоду тверднення. В той же час, для складів бетонів №№ 1, 8, 9 у віці 180 діб має місце незначне скидання міцності у порівнянні з показником у віці 90 діб.

Порівнюючи показники міцності бетонів контрольних складів (№№ 1 і 2), слід зазначити, що, незважаючи на більш високу витрату в'язучого (портландцемент + мікрокремнезем) у складі № 2 (рухливість П3) при однаковому значенні водоцементного співвідношення бетон з помірно рухомою бетонною сумішшю складу № 1 (П1) характеризується більш високими показниками міцності в усі терміни тверднення. При додаванні до контрольного складу № 1 суперпластифікатора SR-3 міцність бетону в усі терміни тверднення вище: 7 діб – на 50 %; 28 діб – 30 %; 90 діб – 20 %; 180 діб – 37 %. На приріст міцності позитивний вплив у цьому випадку надає диспергувальний ефект суперпластифікатора, який при помірному дозуванні (0,5 % від маси цементу в перерахунку на суху речовину) не уповільнює тверднення бетону в ранньому віці. У разі застосування суперпластифікатора на основі поліметиленафталінсульфоната (Conmix) бетон має приблизно таку ж динаміку зростання міцності, трохи поступаючись в абсолютних значеннях бетону з добавкою суперпластифікатора на основі модифікованого акрилового полімеру SR-3.

Добавка, що знижує усадку SRA, незначно уповільнює тверднення бетону у віці 7 діб (міцність бетону складу № 5 менше на 17 % у порівнянні з бетоном складу № 3) і практично не впливає на міцність у більш пізні терміни тверднення.

В той же час, сповільнюючий ефект добавки SRA на тверднення бетону в ранньому віці слід брати до уваги, тому що даний склад (№ 5) містить розширний компонент, що може призвести до розтріскування бетону при його недостатній міцності для сприйняття розширення системи, що твердне.

При дослідженні впливу комплексу органо-мінеральних модифікаторів на формування продуктів гідратації прийнято склад цементних паст, що мають однакову рухливість за показником розпливу міні-конусу на струшувальному столику в межах 145-150 мм (табл. 2).

Таблиця 2

## Склад цементних паст

Найменування компонента	Од. вим.	Витрата, склад					
		1	2	3	4	5	6
Портландцемент	г	400	400	400	400	400	400
Розширний компонент	г	-	32	32	32	32	-
Суперпластифікатор	г	-	2	2	2	2	-
Добавка SRA	мл	-	-	1	1	1	1
Керамзитовий пісок	г	-	-	-	65	65	-
Вода	мл	125	111	108	112	109	124
В/Ц	-	0,31	0,28	0,27	0,28	0,27	0,31

Встановлено, що, застосування у складі цементної пасті контрольного складу (№ 1) суперпластифікатора на основі модифікованого карбоксилатного ефіру Melflux 5581 F (№ 2) забезпечує підвищення міцності при стиску цементного каменя у віці 3 діб – на 55 %, 28 діб – на 37,5 % (рис. 1). Це обумовлено як зниженням величини водоцементного співвідношення, так і диспергувальним ефектом суперпластифікатора, що створює електростеричну стабілізацію системи.

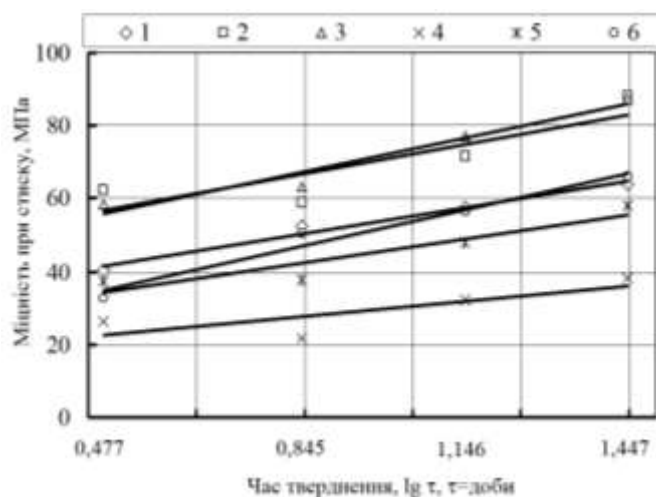


Рис. 1. Вплив складу комплексного модифікатора на кінетику зростання міцності цементного каменя

При введенні до складу контрольної цементної пасті добавки, що знижує усадку SRA 25, відзначено зменшення на 19,3 % міцності цементного каменя у ві-

ці трьох діб (склад № 6), що обумовлено сповільнюючим ефектом добавки на тверднення в'язучого на ранніх етапах. У той же час, при спільному введенні добавок SRA 25 та Melflux 5581 F (склад № 3) міцність цементного каменя у порівнянні зі складом, що містить лише добавку Melflux 5581 F (склад № 2), практично не змінюється в усі досліджувані терміни тверднення.

Слід також зазначити, що для обох складів цементних паст (№№ 2, 3), що містять окрім хімічних добавок SRA 25 і Melflux 5581 F також розширний компонент, спостерігається незначне падіння міцності у віці семи діб у порівнянні з показником у віці трьох діб (для цементного каменя складу № 3 менш виражене, ніж для складу № 2). Це скидання міцності найбільш ймовірно пов'язано з розвитком напружень в цементному камені, що обумовлені гідратацією й розширенням оксидів кальцію і магнію, які присутні у розширному компоненті.

При додаванні до цементної пасти, що містить комплексний модифікатор (склад № 3), невеликої порції сухого керамзитового піску, спостерігається істотне зниження міцності – у віці трьох діб на 54 %, семи діб – на 66 %, 14 діб – на 58 %, 28 діб – на 56 % (склад № 4). Також зафіксовано явно виражене падіння міцності у віці семи діб у порівнянні з міцністю у віці трьох діб. Окрім того, вихідна рухливість цементної пасти вже через 3-5 хв. різко знижується, що обумовлено інтенсивним поглинанням води замішування керамзитовим піском. У той же час, використання попередньо водонасиченого керамзитового піску, по-перше, виключає проблему швидкої втрати рухливості цементної пасти, по-друге, істотно підвищує показники міцності при стиску (склад № 5). Для порівняння зміна (зниження / підвищення) показників міцності цементного каменя складу № 5 у порівнянні зі складами № 3 та № 4 ілюструється такими даними: три доби тверднення: -36 % / +42 %; сім діб: -40 % / +76 %; 14 діб: -38 % / +49 %; 28 діб: -33,5 % / +52 %. У віці семи діб падіння міцності має менш виражений характер. Таким чином, очевидно, що наявність у складі цементної пасти агенту внутрішнього догляду позитивно впливає на процеси гідратації в'язучого та розширного компоненту. Зменшення міцності при стиску бетону, в якому агент внутрішнього догляду (пористий керамзитовий пісок) застосовується як часткова заміна щільного піску, буде у значно меншій мірі, ніж це зафіксовано для цементного каменя.

Результати рентгенофазового аналізу свідчать про те, що комплексна органо-мінеральна добавка впливає на кінетику формування продуктів гідратації каменя в'язучого. Уповільнюючий вплив добавки, що знижує усадку SRA 25, на кінетику зростання міцності цементного каменя в ранні терміни тверднення ілюструється також зниженням інтенсивностей дифракційних відображень портландита ( $d=0,493; 0,312; 0,145$  нм) та еtringіту ( $d=0,561; 0,469; 0,215$  нм), а також більш високою інтенсивністю ліній аліта ( $d=0,176; 0,164; 0,154$  нм) у порівнянні з контрольним складом. З іншого боку, агент внутрішнього догляду цементного каменя інтенсифікує гідратацію (зростання інтенсивностей дифракційних відображень портландиту, гідросилікатів кальцію  $d=0,501; 0,301; 0,247; 0,208$  нм та брусита  $d=0,475; 0,158$  нм).

**Четвертий розділ** присвячено оптимізації складів та дослідженню фізико-механічних та деформаційних показників якості дорожніх цементних бетонів, що містять комплекс органо-мінеральних модифікаторів.

Згідно з ДБН В.2.3-4-2000 "Автомобільні дороги" для цементобетонних покриттів і основ необхідно використовувати бетон важкий за ДСТУ Б.В.2.7-43-96, який для I категорії доріг характеризується класом за міцністю при стиску В 35.

У відповідності до ДСТУ Б В.2.7-224:2009 середній рівень міцності бетону при нормуванні міцності за класами – при стиску ( $f_{cm}$ ) та на розтяг при згині ( $f_{c,tf}$ ):

$$f_{cm} = \frac{1,1 \cdot C_n}{k_b} \cdot k_{m.n.} = \frac{1,1 \cdot 35}{0,78} \cdot 1,12 = 55,4 \text{ МПа} \quad (1)$$

$$f_{c,tf} = \frac{1,1 \cdot C_n}{k_b} \cdot k_{m.n.} = \frac{1,1 \cdot 4,4}{0,78} \cdot 1,12 = 6,97 \text{ МПа} \quad (2)$$

Необхідна міцність бетону при стиску ( $f_c$ ), що забезпечує нормовану міцність на розтяг при згині дорівнює:

$$f_c = \left( \frac{C_n}{0,08} \right)^{1,5} / 10 = \left( \frac{4,4}{0,08} \right)^{1,5} / 10 = 40,8 \text{ МПа} \quad (3)$$

Оскільки  $f_{cm} > f_c$ , для подальших розрахунків прийнято  $f_{cm}=55$  МПа (базовий склад бетонної суміші з маркою за рухливістю П1, кг(л)/м<sup>3</sup>: ПЦ=405; Щ=1187; П=568; В=177,5; В/Ц=0,47; SR-3=6,4; SRA25=6,5; МК=45; РК=28).

При оптимізації складу бетонної суміші за вмістом хімічних модифікаторів і величини водоцементного співвідношення як параметри оптимізації прийнято границю міцності бетону при стиску в проектному віці  $Y_1$  (не менше 55 МПа) та рухливість бетонної суміші  $Y_2$  (не менше 1 і не більше 4 см). Значення факторів варіювання наведено в табл. 3.

Таблиця 3

### Значення факторів варіювання

Код	Фізичний зміст фактору	Од. вим.	Інтервал	Рівні фактору		
				-1	0	+1
X <sub>1</sub>	Вміст добавки SR-3	%	0,15	0,35	0,50	0,65
X <sub>2</sub>	Вміст добавки SRA25	л/м <sup>3</sup>	1,5	5,0	6,5	8,0
X <sub>3</sub>	Водоцементний фактор В/Ц	м.ч.	0,03	0,44	0,47	0,50

Графічна інтерпретація рівняння регресії (4), що характеризує зміну рухливості бетонних сумішей, см, від діючих факторів (X<sub>2</sub>, X<sub>3</sub> при фіксованому значенні фактору X<sub>1</sub>), представлена на рис. 2.

$$\hat{y}_2 = 6,525 + 1,975X_1 + 0,6X_2 + 1,625X_3 + 0,625X_1X_3 + 0,25X_2X_3 \quad (4)$$

На нижньому рівні фактору X<sub>1</sub> (-1) область оптимальних значень факторів X<sub>2</sub> і X<sub>3</sub> знаходиться в межах: X<sub>2</sub> (SRA 25, л/м<sup>3</sup>)=5,5-8,0; X<sub>3</sub> (В/Ц)=0,44-0,473.

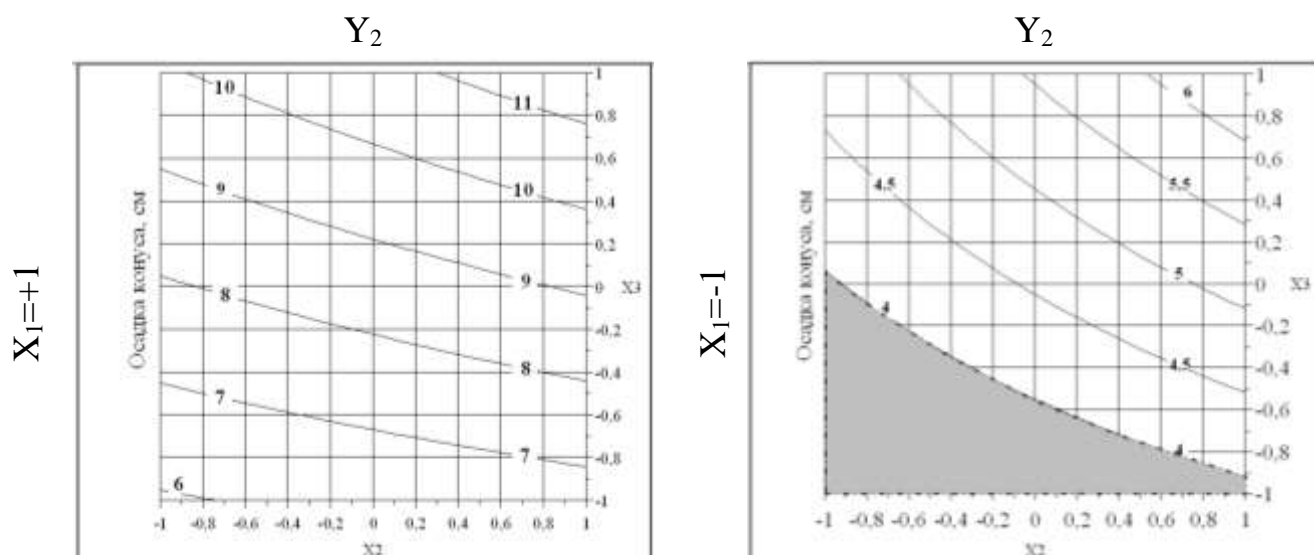


Рис. 2. Графічна інтерпретація рівняння регресії (4), що характеризує зміну рухливості бетонних сумішей, см, від діючих факторів ( $X_2$ ,  $X_3$  при фіксованому значенні фактору  $X_1$ )

Встановлено, що зі збільшенням абсолютного значення факторів  $X_2$  і  $X_3$  спостерігається зниження міцності бетону, що ще раз свідчить про уповільнюючий вплив добавки, що знижує усадку SRA 25, на міцність бетону. Вплив фактору  $X_1$  на міцність бетону є не значимим, що пов'язано, ймовірно, з досить вузьким інтервалом його варіювання (рівняння 5):

$$\hat{y}_1 = 49,86 - 5,388X_2 - 9,563X_3 \quad (5)$$

Область оптимальних значень факторів  $X_2$  і  $X_3$  знаходиться в межах:  $X_2$  (SRA 25, л/м<sup>3</sup>)=5,5-7,7;  $X_3$  (В/Ц)=0,44-0,47.

На даний час у світовій практиці будівництва автомобільних доріг з жорстким покриттям використовують спеціальні бетоноукладчики – сліп-формери, що забезпечують безперервне бетонування дорожнього полотна товщиною від 50 до 300 мм і шириною від 1800 до 6100 мм. Недоліком такого способу бетонування є утворення на поверхні дорожнього полотна так званих поздовжніх "вібраційних доріжок" – у місцях дії вібраторів, де властивості бетону значно відрізняються від основного масиву. Застосування самоущільнювальних бетонів у дорожньому будівництві забезпечує покращення якості дорожнього полотна, підвищення швидкості будівництва, зниження енергоспоживання та трудомісткості процесу. В той же час, необхідно вирішити досить складну суперечливу задачу – забезпечити, з одного боку, високу рухливість (текучість) бетонної суміші, з іншого – здатність свіжовідформованого масиву зберігати форму без осідання після формування. Ці умови можуть бути виконані при раціональному підборі складу бетону, зокрема при оптимальному вмісту хімічних модифікаторів (суперпластифікатор, модифікатор в'язкості) та мінеральних добавок (дрібнодисперсних наповнювачів).

На основі методу планування експерименту ПФЕ=2<sup>k</sup> виконано оптимізацію складу СУБ за величиною водоцементного співвідношення та вмістом добавки тонкомеленого мінерального наповнювача у вигляді вапняку ( $S_{\text{пит.}}=385 \text{ м}^2/\text{кг}$ ). Базовим складом бетонної суміші ( $D_p=350 \text{ мм}$ ), в якому витрата меленого вапняку (МВ) прийнята у кількості 25 % від маси цементу, є наступний: кг(л)/м<sup>3</sup>: ПЦ=433; Щ=953; П=635; В=179; В/Ц=0,445; SR-3=6,9; SRA=6,9; МК=48; РК=30, МВ=108.

Як параметри оптимізації прийнято границю міцності бетону при стиску в проектному віці  $Y_2$  (не менше 55 МПа) та рухливість бетонної суміші  $Y_1$  (діаметр розпливу не менше 310 і не більше 370 мм). Значення факторів варіювання наведено в табл. 4.

Таблиця 4

### Значення факторів варіювання

Код	Фізичний зміст фактору	Од. вим.	Інтервал	Рівні фактору		
				-1	0	+1
X <sub>1</sub>	Водоцементний фактор В/Ц	м.ч.	0,02	0,425	0,445	0,465
X <sub>2</sub>	Вміст меленого вапняку	%	10	15	25	35

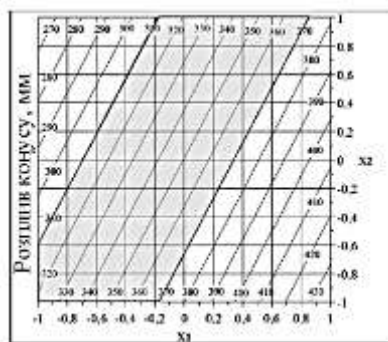
Розраховано наступні рівняння регресії:

$$\hat{y}_1 = 360,4 + 57,9X_1 - 29,6X_2, \quad (6)$$

$$\hat{y}_2 = 55,4 - 6,88X_1 - 3,28X_2. \quad (7)$$

Відповідно до прийнятих граничних значень функцій відгуку область оптимальних складів бетонних сумішей за величиною водоцементного співвідношення (В/Ц=0,449-0,425) та вмістом тонкомеленого наповнювача (МВ=15-33 %) представлено на рис. 3.

Y<sub>1</sub>



Y<sub>2</sub>

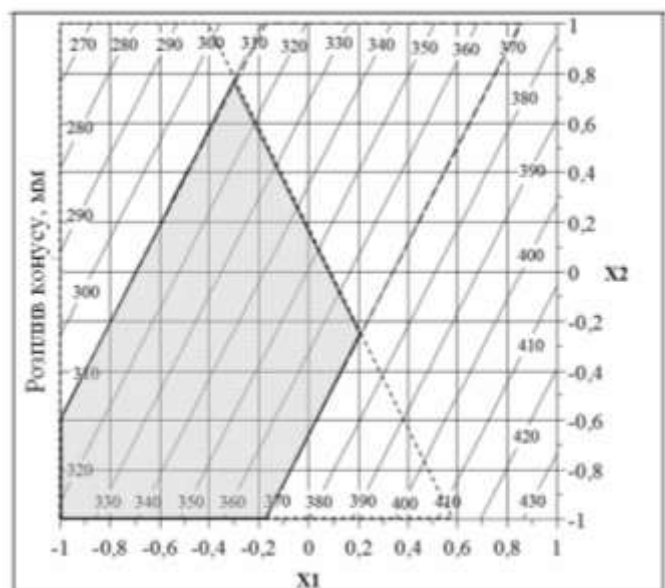
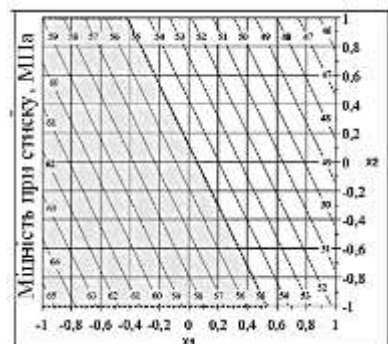


Рис. 3. Області оптимальних складів СУБ



Показники обмеженого розширення (обмеженої усадки) СУБ (табл. 5) визначено згідно з методикою ASTM C878/C878M-09 "Standard Test Method for Restraint Expansion of Shrinkage-Compensating Concrete".

Таблиця 5

### Склад самоущільнювальних бетонних сумішей

№	Найменування матеріалу	Витрата, кг(л)/м <sup>3</sup>				
		№№ складу				
		1	2	2"	3	3"
1.	Портландцемент ПЦ I-500-Н	433	433	433	433	433
2.	Мікрокремнезем	48	48	48	48	48
3.	Пісок кварцовий	680	664	468	468	468
4.	Щебень гранітний	983	965	965	965	965
5.	Вода, л	177,1	177,1	177,1	170,2	170,2
6.	Суперпластифікатор SR-3, л	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9
7.	Мелений вапняк, кг	86	86	86	86	86
8.	SRA 25, л	-	-	-	6,9	6,9
9.	Розширний компонент	-	30	30	30	30
10.	Керамзитовий пісок	-	-	94	-	94

За результатами дослідження розширення бетону в обмежених умовах встановлено, що бетон, який містить комплекс модифікаторів у вигляді "SRA 25 + розширний компонент", протягом усього періоду дослідження (до 28 діб) показує залишкове розширення: для бетону складу № 3 –  $\epsilon=+19$  мкм/м, а за наявності агенту внутрішнього догляду (склад № 3") –  $\epsilon=+126$  мкм/м (рис. 4).

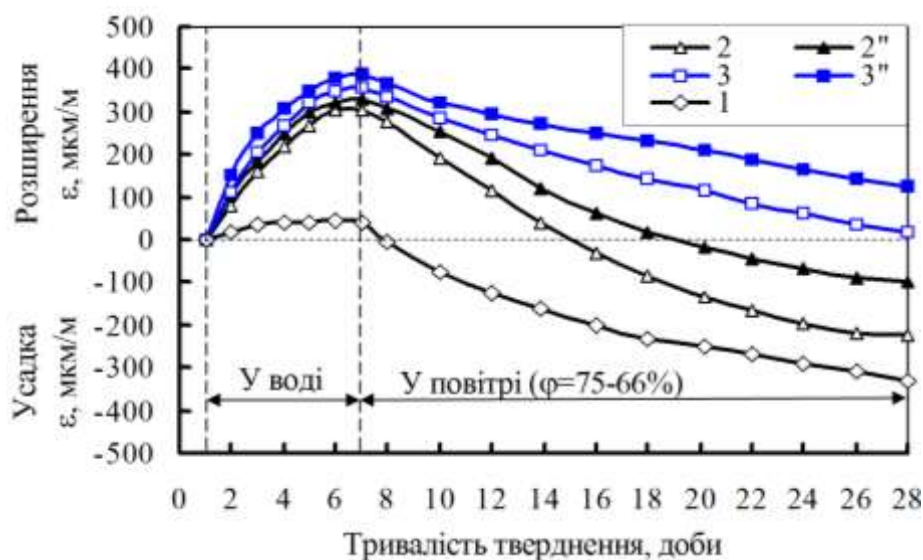


Рис. 4. Вплив складу модифікаторів на обмежене розширення і обмежену усадку СУБ: 1, 2, 2", 3, 3" – склади бетону (див. табл. 5)

Для прогнозування ймовірності тріщиноутворення бетону, викликаного обмеженою усадкою, використано "Метод кілець" згідно з ASTM C1581-04 "Stand-

ard Test Method for Determining Age at Cracking and Induced Tensile Stress Characteristics of Mortar and Concrete under Restrained Shrinkage". Час до появи тріщини – це різниця між віком появи тріщини і віком початку висушування зразка.

Розрахунок величини середнього напруження розтягу в бетоні як функцію часу твердіння, (МПа) здійснюється за формулою:

$$\sigma_{\text{avg}}(t) = \frac{E_s r_{1c} h_s}{r_{1s} h_c} \times (\varepsilon_s(t)) \times 10^{-6}, \quad (8)$$

де  $E_s$  – модуль пружності сталі, МПа;  $r_{1c}$  – внутрішній радіус кільця бетону, мм;  $r_{1s}$  – внутрішній радіус сталевго кільця, мм;  $h_c$  – товщина стінки бетонного кільця, мм;  $h_s$  – товщина стінки сталевго кільця, мм;  $\varepsilon_s(t)$  – деформація в сталевому кільці як функція часу ( $\mu\text{m}/\text{m}$ ).

Встановлено, що в процесі тверднення і висихання кільця бетону контрольного складу № 1 в ньому розвиваються напруження розтягу, які до віку тверднення відповідно 11 діб і сушіння 7 діб досягають величини 3,44 МПа, що призводить до утворення тріщини (рис. 5). При появі тріщини в бетонному кільці у віці до семи діб і величині рівня напружень при тріщиноутворенні  $\sigma \geq 0,34$  МПа/добу ( $\sigma_{\text{факт.}} = 0,34$  МПа/добу) склад бетону № 1 можна характеризувати як такий, що має високу ймовірність тріщиноутворення.

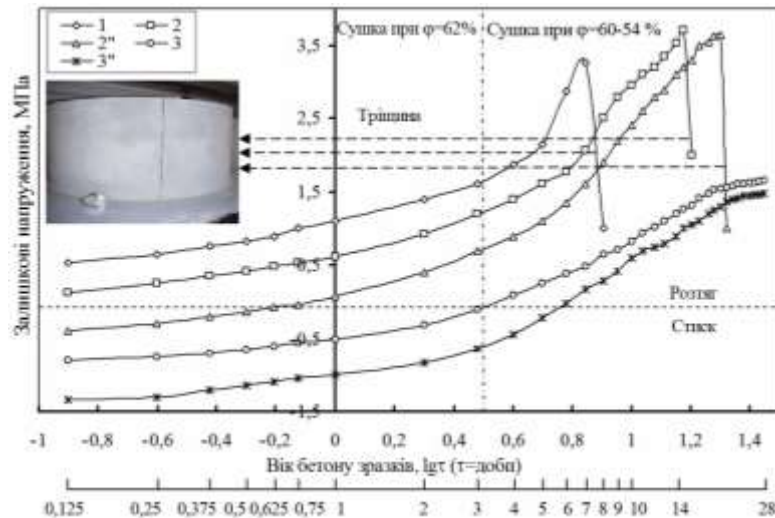


Рис. 5. Вплив складу модифікаторів на обмежене розширення і обмежену усадку бетону за "методом кільця"

Позитивний вплив на зниження ризику тріщиноутворення надає комплекс модифікаторів, який включає розширний компонент і добавку, що знижує усадку SRA 25 (склад № 3), а також агент внутрішнього догляду (склад № 3"). Така комбінація забезпечує до трьох і шести діб, відповідно, збереження в бетонному кільці напруження стиску, тобто компенсувати усадкові деформації. В подальшому процесі висушування до 28 діб в бетонних кільцях утворення тріщин не зафіксовано, а рівень напружень становить  $\sigma(3) = 0,06$  МПа/добу і  $\sigma(3'') = 0,05$  МПа/добу – низька ймовірність тріщиноутворення.

Досліджено основні фізико-механічні та деформаційні властивості дорожніх цементних бетонів оптимальних складів з показником рухливості бетонної суміші ПІ та СУБ (310-370 мм), відповідно: границя міцності при стиску  $f_{c,cube}=56$  і 63 МПа; призмova міцність  $f_{c,prism}=40$  і 49 МПа; границя міцності на розтяг при розколюванні  $f_{c,tn}=3,4$  і 3,6 МПа; границя міцності на розтяг при згині  $f_{c,tf}=5,8$  і 6,4 МПа; модуль пружності  $E_c=33$  і 31 ГПа; водопоглинання за масою  $W=2,4$  і 1,9 %.

## ВИСНОВКИ

1. Теоретично і експериментально обґрунтовано технічне рішення технології високоякісних дорожніх цементних бетонів з компенсованою усадкою, що застосовуються для влаштування жорстких покриттів автомобільних доріг в умовах сухого жаркого клімату республіки Ірак, шляхом модифікування бетонів комплексом органо-мінеральних добавок: активна мінеральна добавка (тонкомелений наповнювач); суперпластифікатор з високим водоредукуючим ефектом; розширний компонент на основі оксидів кальцію і магнію, одержаний випалом доломітизованого вапняку; добавка, що знижує усадку бетону (SRA), на основі поліпропіленгліколю; агент внутрішнього догляду (попередньо водонасичений дрібний пористий заповнювач).

2. Встановлено, що хімічна добавка, рекомендована для зниження усадки цементного каменя (бетону) SRA 25, має слабкий пластифікуючий ефект, забезпечуючи підвищення рухливості цементних паст на 7,6-12 %. У комплексі з суперпластифікатором на основі модифікованого акрилового полімеру (SR-3) або поліметиленафталінсульфонату (Conmix) ця добавка подовжує терміни зберігання показників легкоукладальності цементних паст (бетонних сумішей).

3. Показано, що добавка SRA знижує міцність бетону при стиску залежно від дозування на 6,3-12,3 % у ранньому і на 5,8-7,9 % у проектному віці тверднення. З урахуванням пластифікуючої дії SRA можливе зниження водоцементного співвідношення без погіршення технологічних властивостей сумішей, що забезпечує усунення негативного впливу добавки на міцність бетону.

4. За даними рентгенофазового аналізу встановлено, що комплексна органо-мінеральна добавка впливає на кінетику формування та склад продуктів гідратації каменя в'язучого: добавка, що знижує усадку SRA 25, уповільнює гідратацію (зменшення інтенсивностей дифракційних відображень портландита  $d=0,493$ ; 0,312; 0,145 нм та еtringіту  $d=0,561$ ; 0,469; 0,215 нм); агент внутрішнього догляду цементного каменя (бетону) інтенсифікує гідратацію (збільшення інтенсивностей дифракційних відображень портландита  $d=0,493$ ; 0,312; 0,145 нм; гідросилікатів кальцію  $d=0,501$ ; 0,301; 0,247; 0,208 нм; брусита  $d=0,475$ ; 0,158 нм).

5. Визначено області оптимальних складів бетонних сумішей за вмістом комплексного модифікатора та величини водоцементного співвідношення, що забезпечують одержання бетонних сумішей з показником рухливості за осадкою стандартного конусу в межах 1-4 см (або розпливу конусу в межах 310-370 мм

для СУБ), а також бетону з границею міцності при стиску в проектному віці не менше 55 МПа.

6. Показано, що комбіноване застосування розширеного компоненту на основі СаО і MgO, а також добавки, що знижує усадку (SRA), призводить до синергетичного ефекту зменшення величини обмеженої усадки та ймовірності ризику тріщиноутворення, який виявляється в ще більшій мірі при забезпеченні внутрішнього вологісного догляду за бетоном.

7. Розроблено "Технологічний регламент влаштування монолітних цементобетонних покриттів і основ автомобільних доріг", який впроваджено ДП "Луганський облавтодор" ВАТ "Автомобільні дороги України". Результати дослідження апробовані й впроваджені будівельною компанією "Alfyafy" (Республіка Ірак, м. Вавилон) при будівництві ділянки автомобільної дороги сполученням "Babylon – Hashemite".

### **Основні положення дисертації опубліковані у таких роботах:**

*Статті у наукових фахових виданнях:*

1. Зайченко М.М. Високоякісні самоущільнювальні бетони з компенсованою усадкою / Зайченко М.М., Штефурко М.Ю., Назарова А.В., Ал-Маршди Косай // Міжвідомчий наук.-техн. зб. – Вип. № 56. – К.: Вид-во НДІБВ, 2014. – С. 67-72 (*Особистий внесок: дослідження впливу складу комплексу органо-мінерального модифікатора на величину обмеженої усадки бетону*).

2. Ал-Маршди Косай. Влияние порядка смешивания компонентов цементной пасты на ее технологические свойства / Ал-Маршди Косай // Вісник Одеської держ. академії будівництва та архітектури. – Вип. № 53. – Одеса : Вид-во "Зовнішресервіс". – 2014. – С. 191-197.

3. Ал-Маршди Косай. Преимущества дорожного цементного бетона и его проблемы в условиях жаркого климата / Ал-Маршди Косай // Науковий вісник Луганського національного ун-ту: Технічні науки. – 2014. - № 58. – С. 194-202.

4. Ал-Маршди Косай. Концепции получения тяжелых цементных бетонов нового поколения // Науковий вісник Луганського національного ун-ту: Технічні науки. – Луганськ: Вид-во ЛНАУ, 2013. – № 47. – С. 206-211.

5. Зайченко Н.М. Влияние полифункционального модификатора (добавка, снижающая усадку, – суперпластификатор – микрокремнезем) на свойства самоуплотняющейся бетонной смеси и твердение бетона / Зайченко Н.М., Назарова А.В., Ал-Маршди Косай // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Зб. наук. праць. – Вип. 26. – Рівне: Вид-во НУВГП, 2013. – С. 167-171 (*Особистий внесок: дослідження властивостей самоущільнювальних бетонних сумішей*).

6. Зайченко Н.М. О проблеме совместимости цементных вяжущих и химических добавок / Зайченко Н.М., Назарова А.В., Ал-Маршди Косай // Науковий вісник Луганського національного ун-ту: Технічні науки. – Луганськ: Вид-во ЛНАУ, 2011. – № 41. – С. 275-282 (*Особистий внесок: експериментальні дослідження*).

*Публікації у міжнародних виданнях чи у збірниках, що включені до міжнародних наукометричних баз:*

7. Zaichenko M. Effect of expansive agent and shrinkage reducing admixture in shrinkage-compensating concrete under hot-dry curing environment / M. Zaichenko, A. Nazarova, Qosai Marshdi // ТЕКА. – Vol. 14. – No 2. – Lublin, 2014. – pp. 170-178 (*Особистий внесок: підбір складів бетону з компенсованою усадкою, дослідження властивостей бетону*).

*Статті апробаційного характеру:*

8. Лобода Е.С. Высококачественные модифицированные бетоны с компенсированной усадкой / Е.С. Лобода, С.В. Лахтарина, Ал-Маршди Косай // Строительство и архитектура – 2015. Часть 1: Современные проблемы промышленного и гражданского строительства: мат-лы Междун. науч.-практ. конф.: тезисы докладов. – Ростов н/Д: Ростовский государственный строительный ун-т, 2015. – С. 131-134 (*Особистий внесок: дослідження розвитку обмеженої усадки високоякісного бетону*).

## АНОТАЦІЯ

**Маршді Косай Сахіб Раді. Модифікований дорожній цементний бетон в умовах жаркого клімату.** – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.05 – будівельні матеріали та виробы. – Український державний університет залізничного транспорту МОН України, Харків, 2015.

Дисертацію присвячено вирішенню важливої задачі створення якісних дорожніх покриттів на основі цементного бетону, підвищення їх будівельно-технічних властивостей та збільшення терміну експлуатації за рахунок застосування у складі бетону комплексу органо-мінеральних модифікаторів, який містить активну мінеральну добавку (тонкомелений наповнювач); суперпластифікатор з високим водоредуруючим ефектом; розширний компонент на основі оксидів кальцію і магнію, одержаний випалюванням доломітизованого вапняку; добавку, що зменшує усадку бетону, на основі поліпропіленгліколю; агент внутрішнього догляду (попередньо водонасичений дрібний пористий заповнювач), що набуває особливої актуальності при будівництві доріг у складних кліматичних умовах Республіки Ірак.

Розроблено "Технологічний регламент влаштування монолітних цементобетонних покриттів і основ автомобільних доріг", який впроваджено ДП "Луганський облавтодор" ВАТ "Автомобільні дороги України". Результати дослідження апробовані та впроваджені будівельною компанією "Alfyafy" (Республіка Ірак, м. Вавилон) при будівництві ділянки автомобільної дороги сполученням "Babylon – Hashemite".

**Ключові слова:** дорожній цементобетон, самоущільнювальний бетон, комплекс модифікаторів, компенсована усадка, обмежене розширення, обмежена усадка, тріщиноутворення.

## АННОТАЦИЯ

**Маршди Косай Сахиб Ради. Модифицированный дорожный цементный бетон в условиях жаркого климата. – Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.05 – строительные материалы и изделия. – Украинский государственный университет железнодорожного транспорта МОН Украины, Харьков, 2015.

Диссертация посвящена решению важной задачи создания качественных дорожных покрытий на основе цементного бетона, повышения их строительнотехнических свойств и увеличения срока эксплуатации за счет применения в составе бетона комплекса органо-минеральных модификаторов, а также мероприятий по уходу за свежееотформованным бетоном, что приобретает особую актуальность при строительстве дорог в сложных климатических условиях Республики Ирак.

Осуществлено теоретическое и экспериментальное обоснование получения высококачественных дорожных цементных бетонов с компенсированной усадкой, эксплуатируемых в условиях сухого жаркого климата, за счет использования комплекса органо-минеральных модификаторов, который содержит активную минеральную добавку (тонкомолотый наполнитель); суперпластификатор с высоким водоредуцирующим эффектом; расширяющийся компонент на основе оксидов кальция и магния, полученный обжигом доломитизированного известняка; добавку, снижающую усадку бетона, на основе полипропиленгликоля; агент внутреннего ухода (предварительно водонасыщенный пористый заполнитель).

Определены области оптимальных составов бетонных смесей по содержанию комплексного модификатора и величине водоцементного отношения, обеспечивающие получение бетонных смесей с показателем подвижности по осадке стандартного конуса в пределах 1-4 см (или расплыву конуса в пределах 310-370 мм для СУБ), а также бетона с пределом прочности при сжатии в проектном возрасте не менее 55 МПа.

Показано, что комбинированное применение расширяющегося компонента на основе СаО и MgO, а также добавки, снижающей усадку (SRA), приводит к синергетическому эффекту уменьшения величины стесненной усадки и вероятности риска трещинообразования, который проявляется в еще большей степени при обеспечении внутреннего влажностного ухода за бетоном.

Разработан "Технологический регламент устройства монолитных цементобетонных покрытий и оснований автомобильных дорог", который внедрен ДП "Луганский облавтодор" ОАО "Автомобильные дороги Украины". Результаты исследования апробированы и внедрены строительной компанией "Alfyafy" (Республика Ирак, г. Вавилон) при строительстве участка автомобильной дороги сообщением "Babylon – Hashemite".

**Ключевые слова:** дорожный цементобетон, самоуплотняющийся бетон, комплекс модификаторов, компенсированная усадка, стесненное расширение, стесненная усадка, трещинообразование.

**ABSTRACT**

**Marshdi Qosai Sahib Radi. Modified road cement concrete under hot climate.**

– Manuscript.

The Thesis submitted for the scientific degree of Candidate of Technical Science on a speciality 05.23.05 – Building Materials and Products. – The Ukrainian State University of the Railway Transport of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2015.

Dissertation is devoted to production of high-performance automobile roads based on Portland cement concrete, improvement of their technical properties and extending the service life through the use of the complex of organic-mineral modifier which combines an active mineral additive (fine filler); high range water-reducing superplasticizer; expanding additive based on calcium and magnesium oxides obtained by calcinations of dolomite limestone; shrinkage reducing admixture based on polypropylene glycol; agent of internal curing (pre-wetted light weight aggregate). This problem is particularly relevant for the road construction industry in the difficult climatic conditions of the Republic of Iraq.

The technological regulations of organization of the monolithic concrete pavements and backgrounds of automobile roads were implemented by the enterprise "Lugansk Oblavtodor" of "Roads of Ukraine". Results of the study were tested and implemented by the construction company "Alfyafy" (The Republic of Iraq, Babylon) on the road section construction "Babylon – Hashemite".

**Keywords:** road cement concrete, self-compacting concrete, complex modifiers, compensated shrinkage, restrained expansion, restrained shrinkage, cracking.

Підписано до друку 11.11.2015р.

Формат 60 x 84 1/16. Папір офсетний.

Друк на різнографі. Умовн. друк. арк. 0,9. Тираж 100 прим. Зам. № 763

---

Надруковано у копії-центрі «МОДЕЛІСТ»  
(ФО-П Миронов М.В., Свідоцтво ВО4№022953)

М. Харків, вул. Червонопрапорна, 3 літер Б-1

Тел. 7-170-354

**[www.modelist.in.ua](http://www.modelist.in.ua)**