

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ

Кафедра промислового та цивільного будівництва

Кваліфікаційна робота / проект

II рівень вищої освіти (магістерський)

на тему «Підвищення експлуатаційних характеристик дорожніх і аеродромних цементобетонів»

Виконав: студент 2 курсу,
групи: 8.1929-пцб-з

спеціальності:

192- Будівництво та цивільна інженерія

освітньої програми 192.00.12 Промислове
і цивільне будівництво

спеціалізації: _____

Олейник Юрія Володимировича

Керівник доцент, к.т.н. П.П. Бичевий

Рецензент к.т.н. Данкевич Н.О.

Запоріжжя
2020

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
Від восьми графічних аркушів формату А1

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи магістра

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1	Чес розділ 1	<i>Ваш</i>	
Розділ 2	Бичевий П.П., проф. Г-РЧ	<i>Ваш</i>	
Розділ 3		<i>Ваш</i>	

7. Дата видачі завдання 01.10.2020

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Результати аналізу. Розділ 1	20.10.2020	
2	Розділ 2	12.11.2020	
3	Розділ 3. Графічні аркуші	30.11.2020	

Студент _____
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи (проекту) *Ваш* Бичевий П.П.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер *Ваш* Данкевич Н.О.
(підпис) (ініціали та прізвище)

ЗМІСТ

1.	АНАЛІЗ ФАКТОРІВ ВПЛИВУ НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ ДОРОЖНІХ І АЕРОДРОМНИХ ЦЕМЕНТОБЕТОНІВ.....
1.1	Систематизація факторів впливу на експлуатаційні властивості дорожніх і аеродромних цементобетонів.....
1.2	Аналіз факторів транспортних навантажень на функціонування дорожніх і аеродромних цементобетонів.....
1.3	Аналіз кліматичних факторів на функціонування дорожніх і аеродромних покриттів.....
1.4	Аналіз технологічних факторів на функціонування дорожніх і аеродромних покриттів.....
2	АНАЛІЗ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ СТРУКТУРИ І ВЛАСТИВОСТЕЙ ДОРОЖНІХ І АЕРОДРОМНИХ БЕТОНІВ І ВЛАСТИВОСТІ ВІД ЇХНІХ СКЛАДОВИХ.....
2.1	Аналіз залежностей властивостей дорожніх і аеродромних дорожніх покриттів від типу цементів.....
2.2	Аналіз впливу фактору заповнювачів на властивості дорожніх і аеродромних покриттів з цементобетонів.....
2.3	Аналіз впливу фактору модифікуючих добавок на структуру і властивості цементобетонів дорожніх і аеродорожніх покриттів.....
2.3.2	Аналіз впливу фактору гідрофобних добавок на властивості дорожніх і аеродромних бетонів.....
2.3.4.	Аналіз залежності структури і властивостей дорожніх і аеродромних цементобетонів від мінеральних модифікуючих добавок.....
2.4.	Аналіз залежностей структури і властивостей дорожніх і аеродромних цементобетонів від їхнього складу.....
3	ВИЗНАЧЕННЯ ЗАХОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДОРОЖНІХ І АЕРОДРОМНИХ ЦЕМЕНТОБЕТОНІВ....

3.1. Визначення заходів вибору складових для довговічних цементобетонів в дорожньому будівництві.....	
3.2. Визначення вибору цементів для бетонів дорожніх і аеродромних покриттів.....	
3.3 Визначення параметрів заповнювачів для бетонів дорожніх і аеродромних покриттів.....	
3.4. Визначення вибору модифікуючих добавок та складу дорожнього і аеродромного цементобетонів.....	
ВИСНОВКИ.....	
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	

ВСТУП

В умовах інтенсивного зростання авіа-та дорожнього руху і потреби всебічної економії ресурсів послідує будівництво та ремонтування покриттів дорожнього одягу потребує переорієнтації на вибір матеріалів для цього більш високих експлуатаційних характеристик.

Слід також врахувати, що поверхня покриттів перебуває під впливом багатьох факторів, які можуть бути розподілені на три групи.

Група експлуатаційних факторів викликає зношування поверхні, деформування, тріщиноутворення, зсуви, відриви зерен заповнювачів.

Група технологічних факторів являється причиною зниження фізико-механічних та хімічних властивостей із негативними наслідками на довговічність та надійність.

Група кліматичних факторів являється причиною корозійних процесів, розклинюючої дії ваги та її фазових переходів, вологих та теплових деформацій. В результаті зменшується міцність, тріщиностійкість, довговічність, та прискорюються інші руйнівні процеси.

На сьогодні альтернативними варіантами вибору в'язучих для матеріалу покриття являються бітум та цемент, тобто асфальтобетони та цементбетони. Їхнє порівняння може бути оцінено по декількома параметрами.

Бітум, як в'язуче переважно з імпортованої нафти, може бути віднесене до дефіцитних, а виготовлені на їхній основі до більш залежних від впливу та транспортних навантажень, кліматичних умов та особливо високих та низьких температур. В порівнянні з ними цементи, як основа дорожніх цементобетонів, мають потужну вітчизняну сировинну базу та здатні надати покриттям значно більшу довговічність.

Особливо перспективні можливості з'являються останнім часом, коли на вітчизняному ринку з'явилися добавки, призначені модифікування складу бетону у відповідності до особливостей впливу негативних факторів усіх видів.

Виявлення, аналіз та узагальнення залежностей цементобетонну від впливу технологічних, експлуатаційних та кліматичних факторів впливу являється основою ціленаправленого регулювання структур та властивостей у відповідності до експлуатаційних потреб.

Актуальність роботи. На нинішньому етапі дорожнього та аеродромного будівництва більш гостро постала потреба забезпечити галузь надійними та довговічними покриттями дорожнього одягу. При цьому головними орієнтирами вирішення проблеми залишається можливість використання доступними складовими та технологіями.

Аналіз впливу експлуатаційних, технологічних та кліматичних факторів, їхнє оцінювання привели до висновків про доцільність в сучасних умовах орієнтуватися на цементобетони. Такий вибір підсилюється здатністю бетонів змінювати властивості у широкому діапазоні показників вибором складових.

Для забезпечення достатнього рівня властивостей цементобетонам необхідно використовувати закономірності залежностей як від виду самих складових, так і від особливостей їхньої дії. Тому для цього завданням має бути виявити увесь можливий вибір потрібних компонентів, а також надійне оцінювання особливостей їхнього впливу.

Отримати результати надають можливість подальшого пошуку не тільки важливих взаємозалежностей «склад-властивості цементобетонну», але також знайти шляхи їхнього практичного використання.

Можливість виявлення шляхів покращення властивостей дорожніх і аеродромних цементобетонів підтверджує актуальність роботи.

Мета і завдання роботи. Метою роботи є наукове обґрунтування напрямків вдосконалення властивостей дорожніх і аеродромних цементобетонів на основі виявлення взаємозв'язків їхнього складу та властивостей з послідовними рекомендаціями їхнього практичного використання.

Для досягнення поставленої мети мають бути вирішені наступні завдання:

- аналіз, узагальнення та оцінювання впливу експлуатаційних, технологічних та кліматичних факторів на властивості цементобетону і їхню довговічність;

- виявлення і систематизація потенційних варіантів вибору складових, в тому числі модифікуючих добавок цементобетонів;

- оцінювання впливу складових на властивості цементобетонів з урахуванням їхньої здатності усунути або зменшити негативний вплив зовнішніх факторів на експлуатаційну придатність.

Об'єкт дослідження – дорожні і аеродромні цементобетонів.

Предмет дослідження – складові та їхні взаємозв'язки з властивостями цементобетонів.

Методи дослідження. Методологічною основою роботи:

- аналіз, узагальнення та оцінювання впливу експлуатаційних, технологічних та кліматичних факторів, на придатність бетонів до довготермінової роботи:

- визначення напрямків пошуку оптимальних варіантів усунення негативних наслідків на довговічність асфальтобетонів;

- оцінювання усіх можливих варіантів використання матеріалів, здатних забезпечити асфальтобетонам потрібні характеристики;

- визначення ступеню впливу усіх складових на властивості цементобетону з урахуванням закономірностей такого впливу;

- порівняння придатності усіх можливих варіантів задовольнити потребу виконання поставленої мети.

Наукове значення роботи полягає у виявленні та систематизації закономірностей впливу складових, в тому числі модифікуючих добавок, на властивості та визначенні перспективних напрямків розробок.

Практичне значення роботи – можливість використання запропонованих складових для виготовлення дорожніх і аеродромних цементобетонів.

1 АНАЛІЗ ФАКТОРІВ ВПЛИВУ НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ВЛАС- ТИВОСТІ ДОРОЖНІХ І АЕРОДРОМНИХ ЦЕМЕНТОБЕТОНІВ

1.1 Систематизація факторів впливу на експлуатаційні властивості дорожніх і аеродромних цементобетонів

Головною відмінністю цементобетонів в дорожніх і аеродромних покриттях являються складні умови їхньої експлуатації, які зумовлені залежністю від транспортних засобів та впливу кліматичних факторів.

Дія транспортних навантажень викликає напругу в цементобетоні в покритті. Такі напруження від транспортних коліс передаються від зерна до зерна по площі контакту. Виникає тиск, тертя, зміна величини зчеплення між зернами з різними наслідками на експлуатаційну придатність дорожнього покриття, які можуть проявлятися в тріщинах утвореннях, зношуванні та деформаціях поверхні, вибоїнах, відривах зерен заповнювачів.

Умови експлуатації визначаються також діями кліматичних факторів, в тому числі змінами температур, дії атмосферних опадів, низьких температур, мінералізованого водного середовища. Названі фактори можуть викликати напруження деформації, зміни структури бетону.

Наведений перелік факторів, які формують умови експлуатації дорожнього покриття в систематизованому вигляді наведені на рисунку 1.1.

Як видно з представленої структурної схеми, багатофакторне формування умов експлуатації дорожнього покриття потребує їхнього гранично можливого врахування при виборі складових та складу асфальтобетонів.

Отже, цементобетон є матеріал, який призначений для улаштування дорожнього покриття та який в достатній мірі відповідає особливостям експлуатації в умовах інтенсивної поперемінної динамічної та статичної дії транспортних засобів, коливань температур і зволоженості у широкому діапазоні значень.

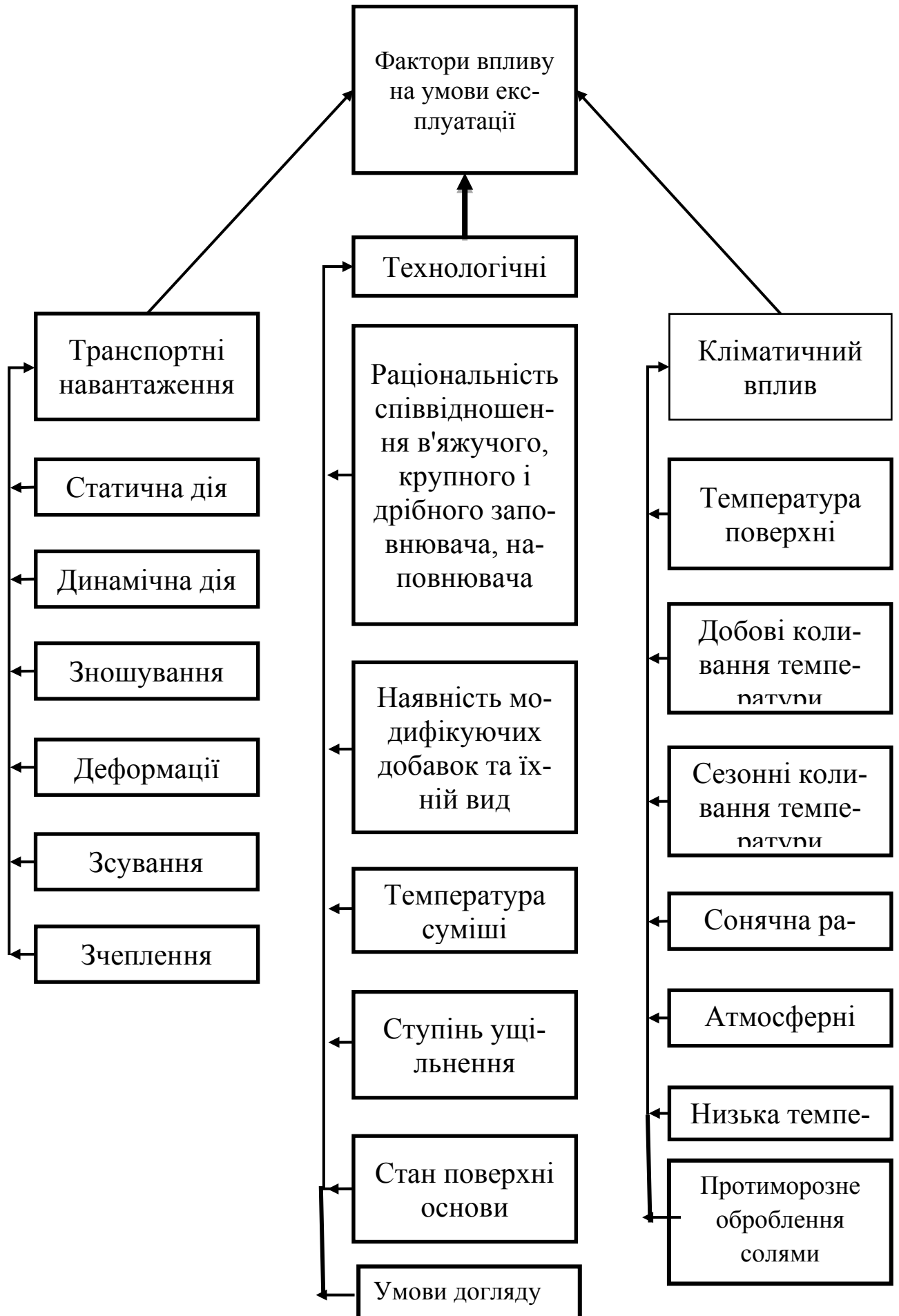


Рисунок 1.1 – Структурна схема факторів впливу на цементобетони верхнього шару дорожнього покриття.

Названі умови експлуатації вказують на необхідність належної здатності складових мати достатню силу зчеплення з в'язучим мінеральних зерен за рахунок відповідної адгезії клеючого компонента та його довготермінової стабільності.

1.2 Аналіз факторів транспортних навантажень на функціонування дорожніх і аеродромних цементобетонів

Бетонні покриття автодоріг та злітних аеродромних смуг перебувають в стані багаторазово повторних статичних та динамічних навантажень від транспортних засобів.

З урахуванням характерних механічних дій бетони мають певну механічну міцність, яка визначає їхню здатність протистояти діючим зусиллям без руйнування. Процеси руйнування пов'язані з розвитком мікротріщин в місцях концентрації внутрішніх напружень, що приводить до поступового послаблення структури та руйнування матеріалу.

Відносно бетону для дорожніх та аеродромних покриттів слід враховувати, що конструкція працює на згін як плита на гнучкій основі, в результаті чого виникають розтягуючі напруження. Тому що розтягуючі напруження більш характерні для дорожніх і аеродромних бетонів та їхня величина може в 10...12 і більше разів впливати на стабільність (придатність) покриттів, такі показники відіграють домінуючу роль в оцінюванні механічних властивостей. Міцність при стиску являється другорядною. При цьому слід вважати, що міцність при розтягуванні змінюється більшою мірою, ніж при стисненні в залежності від наявності мікротріщин та інших дефектів структури бетону. Тому фактор механічних навантажень, особливо динамічних, потребує особливих заходів по забезпеченню бездефектної структури.

Фактор механічних навантажень необхідно враховувати з позиції деформування бетону в покриттях. Так як бетон являється пружньо-пластичним матеріалом, то в результаті цього при деякій тривалості дії меха-

нічних навантажень появляються пластичні деформації крім пружних. Якщо в деякий час усунути навантаження, то деформація бетону зменшиться на величину, яка становить початкову пружну деформацію. Потім відбувається повільне відновлення деякої частини миттєво зворотних деформацій. Пружні деформації характеризуються повною пружною деформацією та модулем пружності.

Модуль пружності характеризується не тільки міцністю матеріала, а також його структурою, властивостями піску, щебеню.

Залежність модуля пружності, як визначального фактору деформативності бетону, від величини внутрішньої напруги представлена на рисунку 1,2 [3]. Як видно, величина внутрішніх напружень. Як долі граничної міцності. Якщо міцність бетону підтверджується, то величина деформації, що особливо важливо для бетонів, що перебувають під дією значних механічних навантажень.

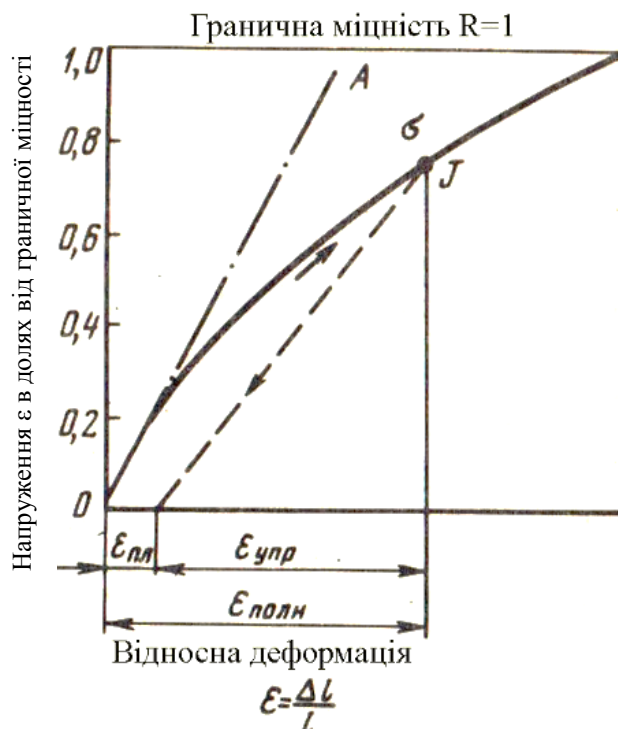


Рисунок 1.2 – Крива деформування бетону: $\epsilon_{повн}$, $\epsilon_{пр}$, $\epsilon_{пл}$ – відносно повна, пружна і пластична деформації.

Дорожні та аеродромні покриття сприймають багатократні перемінні навантаження, що неодмінно викликає втомлюваність міцності бетону, тобто довготривалої здатності чинити опір таким діям. Такі навантаження багатозових перемінних дій та перемінних деформацій розхитують структуру бетону, в результаті чого руйнується при більш низьких напруженнях, ніж від одноразового навантаження. На рисунку 1.3 [3] показано взаємозв'язок між величиною руйнуючої напруги $\sigma_{пр}$ та кількістю циклів перемінних навантажень N , які дають на бетон його руйнування.

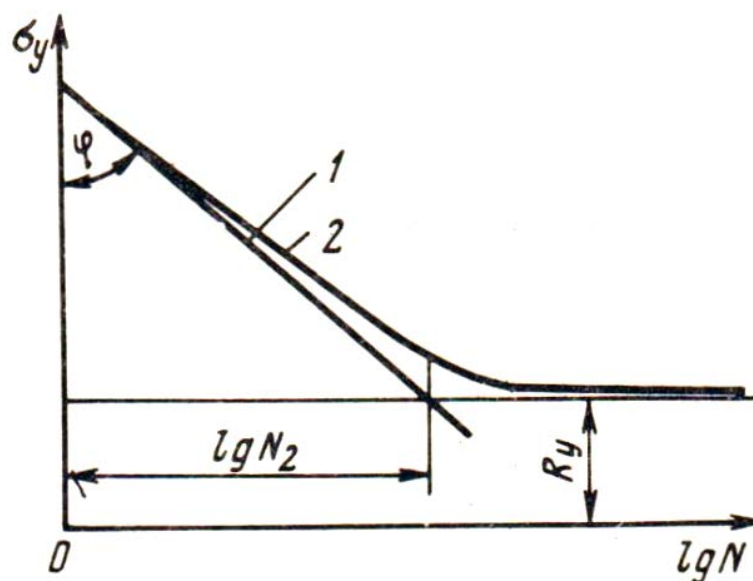


Рисунок 1.3 – Схема залежності втомлюваної міцності бетону $\sigma_{пр}$ від кількості циклів навантажень: 1 – дотична кривої втомлюваності, 2 – крива втомлюваності.

Як видно, руйнуюча величина напружень настає після критичної кількості циклів поперемінних навантажень. Якщо $\sigma_{пр} = R_t$ (де R_t – міцність, яка характеризує однократне руйнування бетону при швидкості навантаження, рівній швидкості зростання напруги в межах одного циклу), то бетон руйнується за один цикл. При зменшенні величини $\sigma_{пр}$ зростає кількість циклів навантаження N до руйнування бетону.

Якщо $\sigma_{пр} = R_{пр}$ (де $R_{пр}$ – фізична межа втомлюваності, при якій бетон практично не руйнується), то бетон не тільки не зруйнується при циклічному

навантаженні, но має місце деяке зміцнення, зумовлене мікроскопічними деформаціями структури, зменшуючи ми концентрацію напружень в бетоні.

Так як міцність втомлюваності і, відповідно, довговічність пов'язані з величиною внутрішніх напружень, то така залежність вимагає пошуку заходів по забезпеченню максимально можливої міцності бетону.

Зношуваність бетону характеризується його здатність не руйнуватися в результаті сумісної дії тертя та динамічної дії, що має місце при експлуатації дорожніх та злітно-посадочних аеродромних покриттів. Наслідками зношуваності можуть бути не тільки стирання поверхні, але також відриви зерен з утворенням вибоїн, подрібнень та інших дефектів.

Суттєвий вплив на зношуваність як і на міцність бетону в цілому відіграє зчеплення зерен заповнювачів з утвореним цементним каменем, що потребує врахування усіх факторів, які зумовлюють силу прилипання в контактних зонах «зерна заповнювачів – цементний камінь».

1.3 Аналіз кліматичних факторів на функціонування дорожніх і аеродромних покриттів

Кліматичні умови являються фактором, який зумовлює формування структури і властивостей на усіх етапах виготовлення та експлуатації в дорожніх та аеродромних покриттів.

В період улаштування бетонних покриттів температурно-вологі умови впливають на процеси гідратації цементу, терміни твердіння, що потребує відповідного догляду для забезпечення потрібної якості.

На стадії експлуатації бетон знаходиться в комплексному впливу навколишнього середовища: води, низьких температур, соляних розчинів, використовуваних для боротьби з голольодом.

Головною причиною руйнування бетону при дії води та низьких температур являється те, що на глибині 10...12 мм від поверхні відбувається викристалізування льоду і гідратів солей. Розширення льоду, утвореного із роз-

чинів солей, складає 1,5...3% його початкового об'єму, в той час як для прісного льоду таке розширення не перевищує 0,1%. На структуру льоду впливає простір, в якому він утворюється, тобто характер пористості бетону.

Зовнішнє середовище визначає одну з головних властивостей дорожнього та аеродромного бетонів – їхню морозостійкість і, відповідно, довговічність. В природних умовах знакоперемінна температура при багаторазовому заморожуванні і відтаюванні і відтаюванні, що супроводжується водо насиченням в умовах атмосферних осаджень, являється причиною збільшення об'єму води в порах бетон на 9...10%, в результаті чого утворюється тиск на стінки пор і в бетоні виникають значні внутрішні напруження. Багаторазове повторення фазових переходів води призводить до поступової втрати міцності структури бетону і його руйнуванню.

Знакоперемінні коливання температури викликають певний вплив на виникнення також внутрішніх напружень, які зумовлені різницею температурних коефіцієнтів лінійного розширення заповнювачів і утвореного цементного каменю в бетоні, а також температурно- вологим інгредієнтом як самих складових, так і в різних шарах матеріалу.

Руйнування від внутрішніх напружень може виникнути в тих випадках, коли пори в бетоні будуть заповнені водою не менше ніж на 85...90% їхнього загального об'єму. В звичайних умовах експлуатації такого водопоглинання не спостерігається, але при замерзанні бетону в процесі його переміщення від поверхневих до глибинних шарів утворюється температурний градієнт, в результаті чого волога із більш теплих, внутрішніх зон безперервно перемішується до більш холодних зовнішніх. Тим самим утворюються умови для насичення пор бетону в зонах замерзання та для руйнівної дії утвореного льоду в таких поверхневих шарах.

Названі умови морозостійкості вказують на можливі напрямки попередження низької морозостійкості бетонів такого типу.

Інший фактор кліматичного впливу пов'язаний з корозією бетону, тобто його здатністю протягом довгих термінів зберігати в умовах дії водного

середовища потрібні структурні і фізико-механічні властивості які забезпечують нормальну роботу покриттів.

По відношенню до дорожніх і аеродромних бетонів мають місце фізичний та хімічний корозійні процеси. Фізичні корозійні процеси крім багатократного поперемінного заморожування та відтаювання відносяться поперемінні багаторазові зволоження та висихання бетону в умовах позитивних температур; капілярне всмоктування з переміщенням вологи в бетоні з наявними солями та відкладені їх в порах з розвитком значного внутрішнього напруження і тиску на стінки пор; дія на бетон знакоперемінних температур, які викликають температурні деформації певного градієнту.

Хімічні корозії в складі бетону підлягають компоненти цементного каменю, на матеріал діють зовнішнє середовище, прісні і мінералізовані води, сонячна радіація.

В залежності від ступеню мінералізації водного середовища корозійний процес може бути пов'язаний з розчиненням складових цементного каменю та винесенням продуктів розчинення з маси бетону (корозія виду по В.М. Москвіну) [4]. Найбільш легкорозчинною складовою цементного каменю являється гідроксид кальцію, що потребує його обмеження в новоутворених продуктах гідратації цементу. Якщо має місце розчинення та вимивання таких продуктів, то відбувається збільшення пористості і відповідно, погіршення структури та усіх її властивостей. Вимивання гідроксиду кальцію $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в кількості 15...30% загального вмісту в цементному камені зумовлює зниження його міцності на 40...50%.

Якщо на бетон діє мінералі зона вода в результаті боротьби з голольдом, то відбувається взаємодія гідроксидів кальцію цементного каменю та солей з утворенням легкорозчинних продуктів (корозія II виду). Новоутворені легкорозчинні солі не мають в'язучих властивостей, являються маломіцними, та вимиваються з каменю з усіма негативними наслідками.

Наприклад, наявність солей NaCl призводить до утворення легкорозчинних хлористого кальцію і гідроксиду натрію:



Руйнують цементний камінь також масла, вміщуючі кислоти жирного ряду.

Умови експлуатації бетонів дорожніх і аеродромних покриттів зумовлюють періодичне зволоження осадовими водами та висихання в окремі добові та сезонні періоди. В результаті зміни зволоженості бетони мають зміни об'єму.

Якщо бетон знаходиться у вологому середовищі, то відбувається поступове збільшення його об'єму, тобто набухання. При зменшенні зволоженості проходить зменшення об'єму, тобто, усадка.

На рисунку 1.4 [2] представлена схема усадки при поперемінних зволоженні та висиханні.

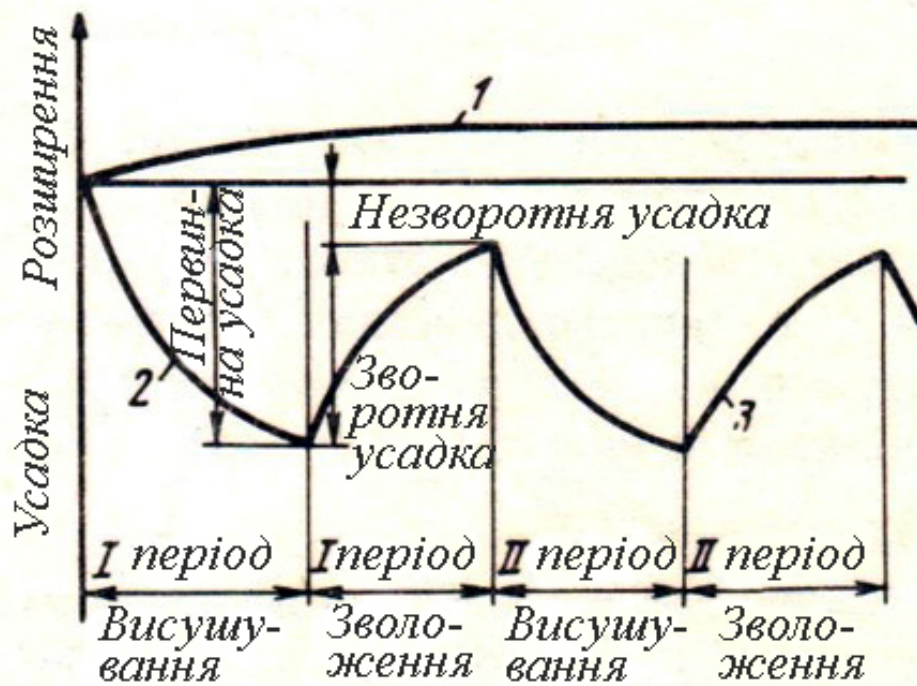


Рисунок 1.4 – Схема усадки бетону під час почергового зволоження та висихання: 1- розширення бетону в постійному зволоженому стані; 2- усадка бетону при висиханні; 3 – усадка і розширення бетону при почергових висиханні і зволоженні.

Усадка бетону відбувається в два етапи. Первинна відбувається в результаті випаровування надлишку води після гідратації, а також можливою втратою через опалубку або інші джерела, а для дорожніх покриттів – поглинанням основного дорожнього одягу. Вторинна усадка відбувається в про-

цесі твердіння і висихання бетону. Такий вид усадки зворотній, так як при послідуєчому зволоженні бетон розширюється. Розмір і її розвиток залежить від багатьох факторів, такі формують структуру, а також навколишнього середовища.

Орієнтовно коефіцієнт усадки для дорожніх бетонів може бути 0,15мм на 1м.

Почергові набухання та усадка бетону, тобто його деформація у зволоженому стані, можуть розхитувати структуру з послідуєчим її послабленням. В результаті можуть бути негативні наслідки у вигляді тріщиноутворень, відриву зерен зоповнювачів та утворення вибоїн, лушення поверхні покриття.

Вплив водного середовища різного ступеню агресивності являється важливим фактором, який визначає експлуатаційну довговічність бетону. При водонасиченні міцність бетону знижується в результаті інтенсивного мікротріщиноутворення при адсорбції твердою фазою полярної рідини, дії ефекту Ребіндера та вимивання складових з цементного каменю.

1.4 Аналіз технологічних факторів на функціонування дорожніх і аеродромних покриттів

Як виявлено результатами визначення впливу транспортних засобів та кліматичних впливів на стабільність властивостей бетонів автомобільних і аеродромних покриттів, головними умовами довготермінової незмінності структури і властивостей являються максимально можлива міцність та мінімальна пористість, з якими пов'язаний вплив негативних факторів.

Потрібний рівень механічних властивостей, структурних характеристик та їхньою довготермінову стабільність мають забезпечити технологічні заходи.

Не дотриманність умов твердіння бетону на початковому етапі, особливо для монолітного покриттів, призводить до інтенсивного проходження

масообмінних процесів, зумовлених градієнтами температури або вологості, можливий вплив обох таких факторів. В результаті вода переміщується з більш глибоких шарів до поверхні за таких умов найбільшою мірою руйнуються поверхневі шари, тому що вода в результаті переміщення до поверхні утворює шляхи в масиві бетону та утворює в розчинній частині нові пори відкритого типу або розширює існуючі. В поверхневих зонах має місце відносно найбільше переміщень, що призводить до виникнення більшого числа шляхів та пор. Утворена пористість відноситься до найбільш небезпечної, тому що пори в цьому випадку мають відкритий характер та можуть з'єднуватися між собою з виходом на поверхню. Як результат, пори являються своєрідними акумуляторами осадкових вод, в найбільшій мірі заповнені водою з її фазовими переходами при низьких температурах та силовою дією на стінки каналів, яка поєднується з корозійною.

Тенденції до збільшення інтенсивності руху на автомобільних дорогах загального користування та навантажень на вісь транспортних засобів, а також зростання авіаперевезень змушує орієнтуватися на науково-обґрунтованих методів з забезпечення довговічності існуючої та розвитку нових транспортних мереж України.

Надання відповідного стану дорожнім та аеродромним покриттям згідно вимог транспортних потоків зможе забезпечити потрібну швидкість руху, зменшити зношуваність поверхні і витрат на їхню придатність, буде сприяти підвищенню рівня безпеки руху та скороченню дорожньо-транспортних пригод.

Одним з альтернативних напрямків вирішення таких задач являється будівництво доріг із жорстким цементобетонним покриттям.

В довгостроковій перспективі, тобто на 10...20 років являється перехід на цементобетонні варіанти, які в порівнянні з асфальтобетонними здатні сприймати більші навантаження і тим самим мати додаткову соціально-економічну ефективність.

Для забезпечення потрібних експлуатаційних характеристик

встановлені стандартні вимоги як до складових, так і до бетонних сумішей [1]. Матеріал покриття потрібно призначати виходячи з транспортно-експлуатаційних вимог, інтенсивності дорожнього руху та складу транспортних засобів в потоці, кліматичних умов, забезпеченості місцевими будівельними матеріалами.

Для цементобетонів стандартними вимогами [1] встановлені терміни експлуатації 18...23 роки, в той час як для асфальтобетонів максимальні строки не перевищують 12...13 років. Такі вимоги зумовлюють необхідність вибору складових та умов формування потрібних структурних, фізико-механічних та хімічних властивостей.

В таблиці 1.1 наведені показники міцності бетону для найбільш відповідальних дорожніх покриттів [1].

Таблиця 1.1 – Мінімальний проектний клас бетону для цементобетонних покриттів

Конструктивний шар дорожнього одягу	Категорія дороги	Інтенсивність розрахункового навантаження прив.авт./добу	Мінімальні проектні класи (марки) за міцністю	
			на розтяг при згині Bbtb (Ptb)	На стиск В(м)
Монолітне одношарове покриття або верхній шар двошарового покриття більше	I	Більше 3000	4,5 (60)	40 (500)
	I - б	Більше 2000	4,4 (55)	35 (450)
	II, III	Більше 1000до2000	4,0 (50)	30 (400)
	IV	Менше 1000	3,6 (45)	25 (300)

Стандарт встановлює вимоги щодо міцності бетону на розтягування при згині, так як покриття працює у відповідності до плити на гнучкій основі.

Довговічність бетону забезпечується незмінністю структурних характеристик і, відповідно, фізико-механічних та хімічних показників з урахуванням особливих умов роботи дорожнього покриття, що потребує кваліфікованого підходу до вибору складових та їхнього вмісту в бетонній суміші.

Стабільність характеристик бетону в експлуатаційних умовах залежить багато в чому від пористості структури, яка зумовлена величиною

водоцементної потреби. Така величина диктується необхідністю забезпечити потрібну легкоукладальність бетонної суміші. Стандарт [1] встановлює необхідну величину легкоукладальності (табл. 1.2)

Таблиця 1.2 – Показники легкоукладальності бетонної суміші

Механізми для укладення бетонної суміші	Легкоукладальність	
	Рухомість, см	Жорсткість, с
Бетоноукладач на колісно-рейковому ході	Від 1 до 3 включно	Від 8 до 10 включно
Бетоноукладач з повзною опалубкою при швидкості руху м/хв.:	Від 1 до 3 включно	Від 8 до 10 включно
- до 2,0		
- від 2,0 до 2,5 включно	Від 2 до 4 включно	Від 5 до 8 включно
- від 2,5 до 3,0 включно	Від 3 до 5 включно	Від 3 до 5 включно
Вібратор та віброрейки	Від 3 до 5 включно	Від 3 до 5 включно
Віброкаток та інше аналогічне обладнання		Від 40 до 100 включно

Регламентування показників легкоукладальності спрямовано на обмеження вмісту води в бетонній суміші як фактору утворення пор в структурі бетону. Сформована структура працює в умовах кліматичного та транспортного впливу, урахування яких має бути враховано при виборі заходів для отримання оптимальних структур з довготривалою стабільністю.

Довговічність та стабільність цементобетону залежить від його якості, яка визначається врахуваннями складу, вибором і вмістом компонентів, технологічними параметрами на усіх стадіях приготування та формування покриття.

Основу цементобетонів становлять портландцемент які за рахунок взаємодії з водою утворюють спочатку желеподібні продукти гідратації та які виконують клейову роль, а після твердіння міцно зв'язують зерна бетонної суміші в моноліт. Такі зміни характеризуються погіршенням структури та переходом до розтріскування, крихкості, зношуванням поверхні, відривом зерен заповнювачів, утворенням вибоїн та іншими пошкодженнями і деформаціями.

Наведені умови функціонування дорожнього та аеродромного бетону вказують, що пориста структура має наслідком не тільки зменшення міцності, але також такі показники, як водонепроникність, морозо- та корозійна стійкість.

Пористість структури бетону має наслідком не тільки зменшення міцності, але також такі показники, як водонепроникність, морозо- та корозійна стійкість, захисна здатність по відношенню до сталеві арматури.

Пористий бетон може знаходитися в стані підвищеного водо насичення, наслідком чого будуть процеси руйнування структури в результаті розчинення складових цементного каменю та його руйнування як наслідок розпушування в разі традиційних вибору компонентів та технологій загальна пористість та кількість відкритих пор може збільшуватись.

2 АНАЛІЗ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ СТРУКТУРИ І ВЛАСТИВОСТЕЙ ДОРОЖНІХ І АЕРОДРОМНИХ БЕТОНІВ І ВЛАСТИВОСТІ ВІД ЇХНІХ СКЛАДОВИХ

2.1 Аналіз залежностей властивостей дорожніх і аеродромних дорожніх покриттів від типу цементів

Бетоні належать до композиційних матеріалів, у яких кожна складова призначена підсилювати дію іншої, що надає оптимальних значень усій композиційній структурі.

Цементи як компонент, що забезпечує утворення клейової зв'язки між зернами заповнювачів і тим самим міцність в результаті гідратації. Вид та кількість цементу зумовлюють структуру на склад утворених продуктів, які впливають не тільки на міцність, але також на такі важливі для бетонів даного призначення як морозостійкість та корозостійкість.

Властивості цементів та бетонів зумовлені вмістом двох головних мінералів цементного зерна-аліту $3\text{CaO} \times \text{SiO}_2$ та трьох кальцієвого алюмінату $3\text{CaO} \times \text{Al}_2\text{O}_3$. В залежності їхнього вмісту змінюються терміни тужавлення і твердіння та стійкість в кліматичних умовах. Вид і кількість активних мінеральних добавок теж впливають на зміну структурних і показників властивостей.

При виборі цементу слід враховувати, що збільшення вмісту в цементі кількості активних мінеральних добавок більше 10% підвищується водостійкість бетону, але зменшується морозостійкість.

Для дорожніх і аеродромних бетонів рекомендують використовувати цементи марок ПЦ- II А/ I або ПЦ-500- II Я/ I , які мають нормований склад з вмістом трьохкальцієвого силікату $\text{C}_3\text{A} < 8\%$. Як активна мінеральна добавка може бути використаний гранульований доменний шлак в кількості до 15%.

Рекомендовані види та характеристики портландцементів наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Види портландцементів для бетонів дорожнього і аеродромного призначення

№ п/п	Тип портландцементу	Вміст мінералів, %	Характеристика		
			марка		
1	ПЦ - I – 400 (300...600) P_пл (гф)	< 6,0	M300; M400; M500; M550; M600;		
2	ПЦ - II/A – III - (400...600) P_пл (гф)	6...20%	M300... M600		
3					

Портландцементи в залежності від вмісту аліту C_3S , трьохкальцієвого алюмінату та активних мінеральних добавок змінюють міцність, водостійкість та морозостійкість в протилежних напрямках, що вимагає пошуку оптимального поєднання усіх важливих характеристик.

Характеристики морозостійкості і водостійкості бетону можливо прослідкувати, виходячі з функції в'язучої речовини в формуванні структури та її властивостей, які являються певною мірою залежними від структури і властивостей бетонної суміші як одного з факторів впливу. Такі взаємозв'язки достатньо деталізовано розглянуті [2], так як функції в'язучого проявляються в поєднанні з водою змішування, то її об'єм в бетонній суміші являється достатньо, або навіть найважливішим фактором, який визначає властивості бетонної суміші та бетону.

Найбільший вплив на властивості бетонної суміші здійснює вміст води, який має бути оптимальним. В разі недостатньої кількості води формується бетонна суміш з незадовільними показниками легкоукладальності та оптимальна кількість води, тобто водопотреба легкоукладальністю або пластичністю бетонної суміші і практично не залежить від витрат цементу в межах 250...450 кг/м³. Водопотреба бетонної суміші ілюструється графіком рисунка 2.5

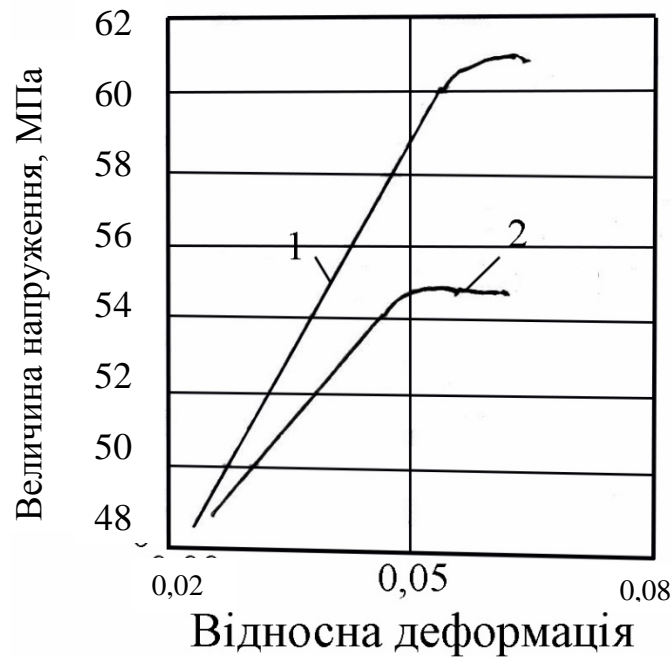


Рисунок 2.5 – Залежність легкоукладальності бетонної суміші від товщини розчинної плівки: 1- крупнозернистий пісок; 2 – середньозернистий пісок; 3 – дрібнозернистий пісок; 4 – цементне тісто

Надлишок вільної води в бетонній суміші викликає розсування твердих зерен і потовщення водних оболонок на їхній поверхні. При цьому сили молекулярного зчеплення значно слабшають, сили капілярної дії зникають і в'язкість цементного тіста, а з нею і бетонної суміші швидко падає.

Для кожної бетонної суміші має місце свій верхній граничний вміст вільної води, при якому за умови достатньої рухомості бетонної суміші зберігається все ще її зв'язність і володіє властивостями пластичної маси. Таку межу називають водоутримуючою здатністю бетонної суміші ($V_{ц}$), яка повинна задовольняти наступним умовам:

$$\frac{V - V_{п} - V_{щ}}{Ц} < 1,65 \text{ НГ} \quad (2.1)$$

Де V , $Ц$ – витрати води і цементу на 1 м^3 бетону; $V_{п}$, $V_{щ}$ – витрати води, утримуваної піском і щебенем.

Негативна роль надмірної кількості води зводиться до того, що вона як більш легкий компонент підіймається наверх, насичуючі верхні шари бе-

тону і надає йому більшу рихлість і меншу міцність.

Під кусками крупного заповнювача утворюються водяні пустоти, які потім перетворюються в повітряні та зменшують поверхню контакту цементного каменю із заповнювачами та послаблює зчеплення між ними.

Головною структуроутворюючою складовою бетонної суміші являється цементне тісто, яке як дисперсна система має високорозвинену поверхню розділення фаз. Такі явища впливають на кількість адсорбційно зв'язаної води та розвиток міжмолекулярних сил зчеплення між цементними частками, які підвищують ступінь зв'язування системи.

В'язкість цементного тіста залежать від концентрації цементних зерен у водяній суспензії, проміжком часу з моменту замішування цементу водою і температури суміші.

Якщо вміст цементного тіста в бетонній суміші становить кількість, достатньо для утворення суцільного середовища, в якій зерна дрібного і крупного заповнювачів розміщені таким, що вони не стикаються одне з одним, бетонна суміш набуває стан в'язкопластичного матеріалу. Пластичні бетонні суміші проміжні положення між рідкими і твердими матеріалами. По мірі збільшення об'єму цементного тіста зростає товщина прошарків між зернами заповнювачів і полегшується їхнє взаємне переміщення при перемішуванні та ущільненні мінімальний об'єм цементного тіста, який потрібний для покриття зерен заповнювачів і заповнення пустот між ними, становить 240...270 кг/м³ бетонної суміші.

Легкоукладальність бетонної суміші залежить також від виду цементу. Водопотреба бетонної суміші зростає при наявності в цементі активних мінеральних добавок, таких як трепел, діатоміт, доменні шлаки, та інші. До таких цементів належать пуцолановий, шлакопортландцемент. Цементи без мінеральних добавок, при мінімальних значеннях показників крутості мають меншу ваодопотребу, що покращує легкоукладальність суміші.

Залежність властивостей бетонних сумішей від їхніх складових показна на рисунку 2.6 [2]

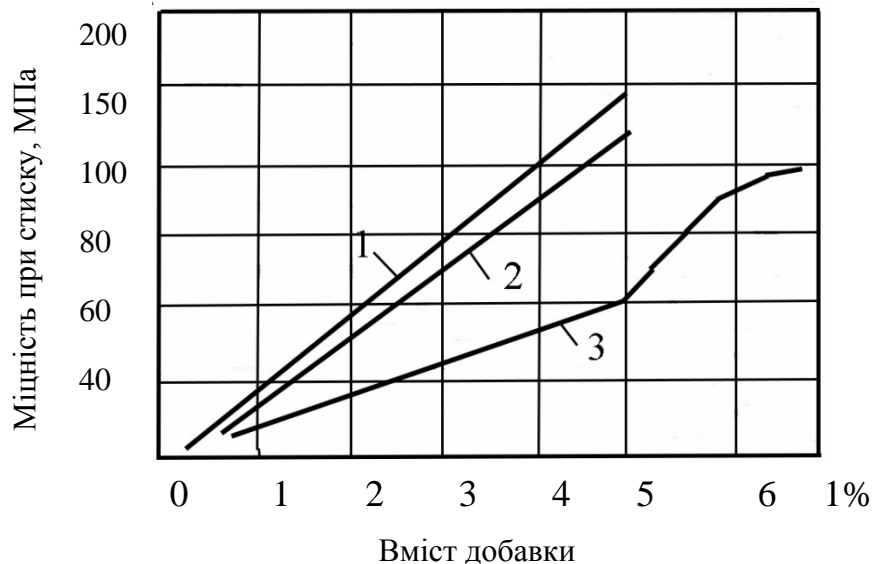


Рисунок 2.6 – Залежність водопотреби бетонної суміші виготовленої з цементу, піску середньої крупності (водопотреба > %) і гравію: а – рухливі суміші; б – жорсткі суміші; 1 – найбільша фракція гравію 10мм; 2 – теж 20мм; 3 – теж 40мм; 4 – теж 50мм

Водопотреба бетонних сумішей зростає в залежності від зменшення розмірів зерен крупного заповнювача, як результат падіння ступеню заповнення об'єму бетонної суміші великими кусками та їхнього заміщення розчинною складовою. Але при цьому необхідно орієнтуватися на співвідношення води і цементу, яке в кінцевому підсумку визначає усі фізико-механічні, хімічні та економічні показники.

Оптимальне водоцементне відношення, при якому міцність бетону найбільша, визначається умовами легкоукладальності бетонної суміші. При звичайних умовах ущільнення вібруванням оптимально водоцементне відношення в/ц знаходиться в межах 0,4...0,5, а в разі підсиленого ущільнення вібропресуванням або віброштампуванням оптимум в/ц знаходиться в межах 0,3...0,4. Надлишок води в бетонній суміші призводить до утворення вільних зон в результаті видалення таких надлишків із твердіючих новоутворених гідратних сполук у вигляді цементного каменю. Все це призводить до появи пористості величина якої зумовлена водовмістом цементного тіста. Наслідком надлишків води та утвореної пористості

являється зниження міцності.

Отже, вода в бетонній суміші відіграє двояку роль . На етапах приготування та укладання в опалубку і процесах гідrataції цементу вода відіграє позитивну роль. В процесах гідrataції проявляється структуроутворююча роль, наслідки якої сильно залежить від кількості води замішування. Після закінчення процесів гідrataції та по мірі видалення проявляється дефектоутворююча роль води замішування.

Наявність двояких ролей води в складі бетонної суміші зумовлює визначає заходи по усуненню впливу негативного фактору як покращення структури і властивостей бетону.

До головних характеристик цементу належить міцність цементного каменю, яка являється його активністю і яка використовують для позначення марки. Ці показники визначають не тільки міцність бетону, але і водопотребу. Залежність між активністю і водопотребує ілюструється графіками рисунка 2.7

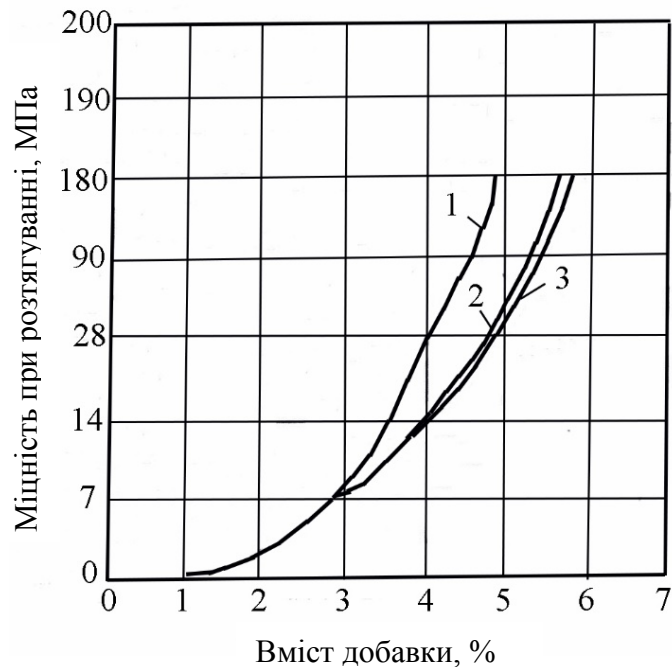


Рисунок 2.7 – Залежність міцності бетону R_c від активності цементу R_c і водоцементного відношення.

Крива залежності міцності має чітко виражену область, яка приходить-ся на певні значення водоцементного відношення в межах 0,2...0,3. Якщо бе-

тонна суміш сильно щільнена, тоді область максимуму зміщується в межі значень 0,2...0,3. Наведені залежності вказують на вплив кількості води на структуру і міцність утвореного цементного каменю, про що свідчать сильно падаючі гілки графічних залежностей. Пояснення наведеним закономірностям знаходимо в зміні пористості цементного каменю, що можливо визначити за результатами розрахунків такого показника в залежності від зміни вмісту води в цементному тісті.

Використання цементів, тобто портландцементів різних видів, базується на їхній здатності взаємодіяти з водою (процеси гідратації) та утворювати відповідні продукти гідратації. Новоутворені гідратні сполуки послідовно переходять від первісного гелеподібного до кам'яноподібного стану і утворюють цементний камінь. В цьому проявляється в'язуча (цементуюча, «клейова») роль кожного виду цементу, яка забезпечує з'єднання усіх складових в монолітний стан.

При виборі портландцементу для дорожніх бетонів визначальними показниками являються їхній мінеральний, зерновий та речовинний склади.

Мінеральний склад зумовлює, перш за все, кількість утвореного гідроксиду кальцію $\text{Ca}(\text{OH})_2$, який за рахунок аліту $3\text{CaO} \times \text{SiO}_2$ (C_3S) в тричі перевищує продукт беліту $2\text{Ca}_2 \times \text{SiO}_2$ (C_2S). Гідроксид кальцію має порівняно з іншими утвореннями являється найбільш легкорозчинним, що зумовлює низьку корозійну стійкість, що особливо важливо для дорожніх бетонів.

Інший мінерал трьохкальцієвий алюмінат $3\text{CaO} \times \text{Al}_2\text{O}_3$ (C_3A) теж має негативний вплив і його кількість в складі портландцементу повинна бути обмеженою до 8%.

Речовий склад портландцементів може включати різні добавки, серед яких для дорожнього призначення найбільш суттєве значення мають мінеральні добавки.

Мінеральні добавки в складі портландцементу виконують певну функцію з урахуванням утворених продуктів гідратації, серед яких крім гідросилікатів (C S H), гідроалюмінатів (C S A) кальцію та іншими гідратне утво-

рення знижує стійкість цементного каменю в слабомінералізованих водах, характерно для умов експлуатації дорожніх покриттів. Підвищити водостійкість цементного каменю можливо за рахунок включення в цемент добавок, які вміщують кремнезем і глинозем.

Мінеральні добавки надають портландцементу підвищену водостійкість завдяки взаємодії активного кремнезему і глинозему $\text{Ca}(\text{OH})_2$ та утворенню нерозчинних гідролікатів і гідроалюмінатів кальцію (C S H і $\text{C}_3 \text{AH}$).

Активні мінеральні добавки являють собою природні або штучні матеріали, підсилюючі гідравлічні властивості мінеральних в'язучих. Активною складовою мінеральних добавок являється аморфний кремнезем, алюмосилікати, низькоосновні силікати і алюмінати кальцію.

В залежності від хімічного складу активні мінеральні добавки поділяються на кислі (із модулем $M < 1$) і основні (модуль основності $M > 1$). Модуль являє собою відношення суми грам-молекул основних оксидів CaO і MgO до суми кислих SiO_2 і Al_2O_3 .

Основні активні добавки в порошкоподібному стані при замішуванні з водою здатні тужавіти і твердіти. Кислі мінеральні добавки самостійно твердіти не здатні і набувають таку здатність при внесенні до їхнього складу збуджувачів, наприклад, повітряного вапна, гіпсу, тощо.

До природних активних мінеральних добавок належать осадові породи-трепел, діатоміти, опока, у яких вміст аморфного кремнезему може становити відповідно, 90...95 та 80%. Названі речовини належать до осадових. Групу добавок вулканічного походження становлять вулканічний попіл, вулканічні туфи, які вміщують багато вулканічного скла; пемза з вмістом аморфного кремнезему і глинозему до 90%.

Звичайно, до складу кожного типу цементу можуть бути включені пластифікуючі або гідрофобізуючі добавки для цілеспрямованої зміни властивостей бетонних сумішей та бетонів.

При виборі цементу для дорожніх і аеродромних бетонів враховують одночасно вплив на увесь комплекс властивостей : міцність при стиску та

розтягуванні при згині, адгезією із зернами заповнювачів, морозо – і корозійну стійкість. При цьому домінуючий вплив на усі показники має пористість, а на морозо – і корозійну стійкість- наявність та величина вмісту активних мінеральних добавок.

Відомо [2,4,5], що включення до складу цементу (або бетону) активних мінеральних добавок сприяє підвищенню корозійної стійкості завдяки перетворенню вільного гідроксиду кальцію в труднорозчинний гідросилікати кальцію. При цьому морозостійкість змінюється в зворотньому напрямку, тобто погіршується.

З урахуванням наведених залежностей необхідно розглянути дію інших факторів, які здатні регулювати структуру і властивостей бетонних сумішей та бетонів.

До штучних активних мінеральних добавок належать переважно промислові відходи, наприклад, гранульовані доменні шлаки, золи від спалювання бурового вугілля, сиптоф-відходи заводів виробництва алюмінію, дегідратована при температурі 650...800°C; цемянка-молота кераміка.

Активність мінеральної добавки крім доменних шлаків, оцінюється по їхній здатності взаємодіяти з гідроксидом кальцію в нормальних умовах. Оцінювання активності виконують за показниками величин. Зменшення вмісту вапна у вапняному розчині в результаті поглинання із вапняного розчину протягом 30 діб. Такі показники можуть бути: для тепла, діатоміту і опоки не менше 150мг СаО поглинутого ізвапняного розчину 1 гр добавки для туфа, пемзи такий показник становить не менше 50мг СаО; для кремнеземних відходів – не менш 200мг СаО; для опалених глин, паливних зол і шлаків – 50 мг СаО. Добавки з активністю менше 50 мг СаО відносяться до інертних.

Результатом кремнеземистої складової активних мінеральних добавок і гідроксиду кальцію є утворення низькоосновних гідросилікатів кальцію:



Така взаємодія приходить повільно при твердінні цементу у вологих умовах, а утворений гідросилікат кальцію являється труднорозчинним, що надає корозійної стійкості цементному каменю і бетону в цілому.

В таблиці 2.1 наведені характеристики основним видам цементів [4,6]

Таблиця 2.1 – Характеристики портландцементів

№ п/п	Тип цементу	Активність (марка)	Вид добавки	Вміст добавки, %
1	ПЦ - I	М 300; М 400; М 500; М 550; М 600;	Мінеральна	0...5
2	ПЦ - I I /А	М 300; М 400; М 500; М 550; М 600;	ЗВ ТЕС	6...20
3	ПЦ - I I /Б	М 300; М 400; М 500; М 550; М 600;	ЗВ ТЕС, вапняк	21...35
4	ПЦ - I I I	М 300; М 400; М 500;	Доменний шлак	36...80
5	ПЦ - IV	М 300; М 400; М 500;	Пуцоланова	21...55
6	ПЦ - V/A		Доменний шлак, ЗВ	18...40, ДШ 10...20 ЗВ ТЕС
7	ПЦ - V/B		Доменний шлак, ЗВ	41...60, ДШ 20...40 ЗВ ТЕС

Представлені в таблиці типи портландцементів мають вміст різних видів активних мінеральних добавок і їхня величина змінюється в широкому діапазоні.

2.2 Аналіз впливу фактору заповнювачів на властивості дорожніх і аеродромних покриттів з цементобетонів

Дрібний та крупний заповнювачі оцінюють як важливий фактор формування структури та властивостей бетону, а також його економічних показників. Вибір заповнювачів на основі показників їхніх властивостей, мінерального складу, гранулометрії, форми зерна, стану поверхні становить важливу умову виготовлення бетонів довговічної експлуатації та надійності.

Як крупний заповнювач в дорожніх і аеродромних бетонах використовують щебінь із гірських порід, відходів гірничозбагачувальних підприємств.

емств та іншої технологічної сировини після їхнього подрібнення.

Вибір крупного заповнювача регламентується вимогами стандартів.

Згідно стандартних вимог якість крупного заповнювача регламентується такими показниками: зерновий склад; форма зерна; міцність, вміст слабих зерен; вміст пиловидних і глинистих забруднювачів; морозостійкість; петрографічна характеристика; істинна, середня та насипна густина; пористість зерен; пустотність; водопоглинання.

Зерновий склад або гранулометрія щебеню для бетонів наведений в таблиці 2.2 в залежності від максимальної крупності зерен.

Таблиця 2.2 – Гранулометрія крупного заповнювача (рекомендована)

№ п/п	Найбільша крупність заповнювача, мм	Вміст фракції, мм, в заповнювачах, %		
		Від 5 до 10мм	Від 10 до 20мм	Від 20 до 40мм
1	20	25...40	60...75	-
2	40	15...25	20...35	40...55

Від зернового складу залежить пустотність щебеню і, відповідно, витрат цементу в бетоні. Пустотність щебеню залежить також від форми зерен і збільшується при зростанні вмісту зерен пластинчатої і голчатої форм.

В залежності від вмісту в щебені зерен пластинчатої і голчатої форм крупний заповнювач поділяється на три групи: кубовидна (до 15%); покращеної (15...25%); звичайний (25...35%).

Для формування щільних сумішей з покращеними технологічними властивостями рекомендують використовувати щебінь з пустотністю не більше 45% та вмістом зерен пластичної і голчатої форм до 25%. Граничний розмір зерен щебеню при цьому має становити не більше $\frac{1}{4}$ мінімальної товщини дорожнього або аеродромного покриття. В бетонах такого призначення найбільший розмір щебеню становить 40, 20 мм і в окремих випусках – 10мм. Тим самим досягається покращення структури бетону і збільшується його міцність при згині і розтягуванні.

Деякі вимоги до крупного заповнювача представлені в таблиці 2.3

Таблиця 2.3 – Характеристика крупних заповнювачів бетону

№ п/п	Призначення бетону	Марка міцності, МПа		
		щебінь		Гравій і щебень з гравію
1	Одношарові покриття і верхній шар двохшарових покриттів	120	80	ДР 8
2	Нижній шар двохшарових покриттів	80	60	ДР 12
3	Основи капітальних покриттів	80	30	ДР 16

При взаємодії цементного (тіста) з поверхнею зерен щебеню проходять фізико – хімічні процеси, які зумовлюють міцність зчеплення і тим самим визначають міцність бетону, особливо при розтягуванні.

Механізм формування структури бетону включає утворення жорсткого каркасу із зерен дрібного і крупного заповнювачів, які розсунуті прошарками спочатку цементного тіста, а потім-утвореного цементного каменю. Властивості і експлуатаційна довговічність бетону залежить від щільності, яка забезпечує зчеплення цементного каменю і зерен заповнювачів. Характер зчеплення визначається мінералогічним і петрографічним складами заповнювачів, характером поверхні, взаємодією з новоутвореннями гідратуючого цементу.

Між гідратуючим цементом і поверхнею зерен утворюється своєрідна «зона контакту», яка являє собою мікрооб'єм біля поверхні розділення цементний камінь-заповнювач. Тобто, сюди входять поверхневий шар заповнювача, прилеглий шар цементного каменю та границю розділу між ними.

Зона контакту між поверхнями зерна заповнювача і цементним каменем зазвичай виявляється самим і тому вирішальним місцем, яке визначає властивості бетону загалом. При руйнуванні у бетоні виявляються характерні ділянки, які точно повторюють форму контактованої поверхні зерен. При відокремленні зерен заповнювача від цементного каменю значна частина поверхні не має слідів цементного каменю, що вказує на низьке зчеплення заповнювача і цементного каменю.

Завідси видно, що для покращення фізико-механічних властивостей

бетону і його довговічності необхідно, перш за все, підвищити адгезію зчеплення цементного каменю із зернами заповнювача як самим слабким місцем в структурі бетону.

Підвищене зчеплення забезпечують свіжеподрібнений чистий щебінь з вапняків і металургійних шлаків, щебінь з порід тонкопористої структури міцність зчеплення з цементним каменем підвищується. Покращенню зчеплення сприяє підвищення шорсткості, зменшення зім'ятих ділянок поверхні.

За показниками міцності щебінь повинен приблизно в два рази перевищувати міцність бетону $R_{ct}30$ МПа і вище. При цьому водопоглинання щебеню не повинне перевищувати 3%. Якщо бетон не буде підлягати заморожуванню, водопоглинання щебеню допускається 5%. Для бетонів $R_u = 30$ МПа і нижче міцність щебеню повинна перевищувати такий показник в 1,5 рази. Для дорожніх і аеродромних бетонів, які в покриттях сприймають згинаючі і розтягуючі навантаження визначають міцність щебеню при розтягуванні, яка повинна в 1,5...2,0 рази вище, ніж у бетона.

Стосовно вибору крупного заповнювача достатньої міцності розглянуті можливі заходи по використанню пористого щебеню.

Бетони на пористих заповнювачах мають достатньо високу міцність порівняно з міцністю заповнювача. Позитивний вплив пористих заповнювачів частіше всього пояснюється процесами самовакуумування його зерен [7]. Вони відіграють роль своєрідних «насосів», які забирають воду з цементного тіста, в результаті чого розчинна складова бетону ущільнюється. При подальшому твердінні волога, що акумульована зернами заповнювача і покращує процес гідратації цементу. Завдяки самовакуумуванню бетон на пористому заповнювачі в порівнянні з бетоном на гранітному щебені також менш схильний до седиментаційних процесів. За даними [8] самовакуумування також підвищує хімічну стійкість бетонів. У роботі [9] при використанні заповнювачів з низькоміцними показниками і витрати цементу від 250 до 450 кг\м³ були отримані бетони з міцністю при стиску 25...458МПа при водостійкості 0,98...1,0.

Після хвилини перемішування цементної суспензії у змішувач подавався щебінь (пористий), який далі обробляється даною суспензією протягом 1-Г хв. Далі в змішувач подавався пісок і решта цементу. Загальний час перемішування складів 5...6 хв, що лише на хвилину довше, ніж приготування суміші традиційним способом.

Модифіковані мікрокремнеземом і С-3 керамзитобетони мали міцність при стиску до W12.

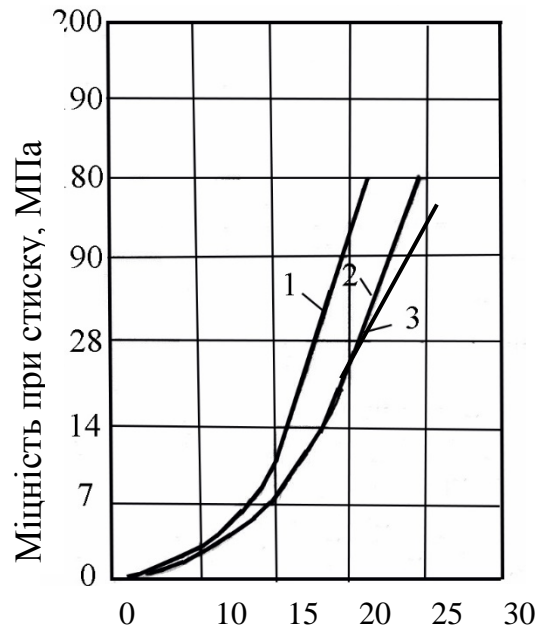


Рисунок 2.7 – Вплив кількості портландцементу та виду заповнювачів на міцність бетонів при стиску: - склади на карбонатному щебені; - склади на гранітному щебені.

По мірі збільшення вмісту цементу різниця міцності бетонів на різних заповнювачах зменшується до 5%. Це можна пояснити кращою роботою пористого заповнювача у «жирних» сумішах з великою кількістю цементу, також при зростанні кількості в'язучого згідно з принципами підбору складу дещо знижується частка крупного заповнювача в суміші та зростає розсунення його зерен.

Міцність бетонів на розтяг несуттєво залежить від виду застосованого щебеню. Це можна пояснити тим, що вапняк є доволі пористим

заповнювачем, через що проявляє ефект «самовакуумування»: тобто адгезія між розчинною частиною бетону і заповнювачем покращується, що в першу чергу відображається на величині міцності на розтяг.

Можливим ефектом можна вважати, що міцність бетонів на обробленому цементною суспензією вапняка щебені була на 4-5МПа вища за міцність....Тобто за рахунок зміни технології приготування бетону на пористому заповнювачі відчутно збільшується міцність матеріалу. Цей ефект пояснюється зміцненням поверхневого шару крупного заповнювача та перехідні зони між заповнювачем і розчинною частиною бетону.

Попереднє оброблення пористого щебеню цементною суспензією дозволяє підвищити міцність бетону при стиску в середньому на 5МПа тобто попередня обробка є ефективним технологічним прийомом підвищення якості бетонів, що відкриває перспективи розширення сировинної бази крупних заповнювачів, в тому числі з техногенних видів.

В щебені обмежується вміст пилювато-глинистих часток – не більше 1% та шкідливих домішок у вигляді сірчанних і сірчаноокислих з'єднань, які кородують цементний камінь, та органічних часток, які теж руйнують бетон.

В якості дрібних заповнювачів використовують природні та штучні піски у вигляді відсівів камнеобробітку та інші подрібнені продукти, які відповідають вимогам стандартів ДСТУ.

Піски можуть бути крупні, середні, легкі. Вибір пісків для бетону проводять за показниками зернового складу, модуля крупності, вмісту пилевидних і глинистих часток, петрографічному складу, в тому числі шкідливих домішок, включаючи органічні та потенційно реакційноздатних порід і мінералів.

В разі використання пісків, отриманих шляхом подріблення, їхню якість оцінюють межею міцності матеріалу, з якого виготовляють такі піски, в насиченому водою стані. Кращими за показниками якості вважають кварцеві піски, які частіше використовують для виготовлення бетонів.

Зерновий склад піску визначають просіюванням крізь стандартний набір сит з отворами 5; 2,5; 1,25; 0,63; 0,315; 0,16 мм. Для оцінювання зернового складу використовують показник модулю крупності як показника суми повних залишків на ситих в безрозмірному вираженні (суму у відсотковому обчисленні, поділену на 100%). Показники модуля крупності наведені в таблиці 2.4.[8,10]

Таблиця 2.4 – Показники крупності пісків.

№ з.р.	Група пісків	Повний залишок на ситі 0,630, % по масі	Модуль крупності, Мк
1	Підвищеної крупності	Від 65 до 75	Від 3,0 до 3,5
2	Крупний	Від 45 до 65	Від 2,5 до 3,0
3	Середній	Від 30 до 45	Від 2,0 до 2,5
4	Мілкий	Від 10- до 30	Від 1,5 до 2,0
5	Дуже мілкий	До 10	Від 1,0 до 1,5

В бетонах дорожніх і аеродромних покриттів класу В30 рекомендується використовувати піски з модулем крупності від 1,5 до 2,0, у яких вміст зерен розміром 0,16 мм становить до 20%, а пилюватих і глинистих часток – не більше 3% по масі.

Зерновий склад піску за результатами розсіювання на стандартних ситах та обчислення повних залишків і нанесених на графік кривих розсіювання, повинен знаходитися в області рекомендованих величин (область рекомендованої крупності заштрихована на графіках, яка охоплює допустимі граничні коливання зернового складу). Якщо піски не відповідають рекомендованим, в мілкий пісок добавляють відповідну кількість крупного природного або подрібнених гірських порід (техногенної сировини). В крупний пісок для пониження модуля крупності добавляють мілкий пісок. Використання пісків, отриманих подрібненням гірських порід або інших матеріалів, можливе за умови забезпечення потрібної легкоукладальності бетонної суміші без перевитрат цементу. Важлива характеристика пісків – водопотреба, тобто здатність утримувати визначену кількість води на поверхні зерен та міжзернових порах. Водопотреба як сумарний показник якості знаходяться в межах 3...6%

для пісків середньої крупності (для крупнозернистих – 4...6%, для мілкозернистих – 8...10%).

Наявність в пісках органічних домішок погіршує якість пісків. Тому їхній вміст обмежуються величиною 1...3 % слюди, не більше 1,5% гіпсу, не більше 3% пилюватих і глинистих. Якщо річкові або морські піски вміщують домішки органічні, гравію або глини, їх потрібно просіювати та промивати.

Використання місцевих дрібнозернистих пісків із підвищеною питомою поверхнею і пустотністю пов'язано з великою витратою цементу. З урахуванням визначального впливу адгезійного зв'язку між зернами заповнювачів та цементним пропонуються [11] заходи по управлінню процесами активації контактоутворення зон прилягання.

Довговічність бетонів залежить від щільності структури, яку забезпечують багато заходів, в тому числі зчеплення утвореного цементного каменю з поверхнею зерен заповнювачів. Величина зчеплення визначається мінералогічним складом заповнювачів, стану їхньої поверхні, взаємодію з новоутвореним цементним каменем. В процесі взаємодії включаються поверхневий шар заповнювачів, прилеглий шар цементного каменю та границя розділу між ними.

Зона контакту між зернами заповнювачів і цементним каменем зазвичай виявляється найбільш вирішальним фактором, який визначає властивості бетону в цілому. При руйнуванні бетонів виявляються ділянки поверхні, які відповідають формі і конфігурації зерна та її поверхні. При відокремленні зерен заповнювачів від цементного каменю значна частина поверхні не має слідів утвореного цементного каменю, що свідчить про слабкому зчепленню та характеризує поверхню контакту як найбільш слабку ділянку в структурі бетону.

Для виготовлення довговічних бетонів потрібно управляти процесами утворення контактів шляхом створення таких умов, які призводили б до цілеспрямованого структуроутворення і формуванні міцної, водо- і морозостійкої структури.

В процесах структуроутворення та формування її властивостей значне місце займають складові – змочування та адсорбцію як первісні при забезпеченні утворення адгезійних контактів між зернами заповнювачів та утвореними гідратними з'єднаннями. Їхня величина певною мірою залежить від адсорбційних та електроповерхових властивостей зерен заповнювачів та властивостей в'язучого. Такі властивості визначають особливості зон контактування та структури матеріалу в цілому.

Якщо пісок дрібний заповнювач представлений зернами кварцу, то вони нерідко покриті налітами нашаруваннями полімінеральних з'єднань. Крім потенційновизначаючими атомними групуваннями матеріалів поверхні зерен піску, полімінеральні комплекси впливають на величину потенціалу. Являючись показником електричного потенціалу мінералів, які складають пісок, потенціал являє собою інтегральну характеристику, яку складають різні співвідношення різних величин поверхні зерен визначеного знаку, площ, зайнятих мінералами поверхні заповнювачів і полімінеральних комплексів.

Гідраційна здатність поверхні кварці визначається кремнекисневих тетраєдрів поверхневого шару, які не повністю зв'язані із зовнішнього структурою. Атоми кремнекисневих тетраєдрів, які виходять на поверхню зерна, з'єднані з атомами водню і утворюють гідроксильні групи. Така будова поверхні кварцевих зерен визначає його електростатичних потенціал при контакті з водою. Гідроксильні групи частково дисоціюють, постачаючи до водної фази іони водню. Поверхня при цьому заряджається від'ємно, в результаті чого на поверхні кварцевого зерна адсорбуються переважно позитивно заряджені продукти гідратні цементу-гідросилікати та гідросульфатомінерали кальцію. Якщо відбувається перезарядження поверхні кварцу, тоді забезпечується коагуляція негативно заряджених гелевих часток гідросилікатів. Розміри таких часток замилі в порівнянні кристалогідратами меші і завдяки цьому забезпечують щільну структуру в зона контакту. При взаємодії протилежно заряджених часток можливо відбуватися їхня коагуляція, яка зумовлена взаємодією. Найбільш повна коагуляція відбувається при взаємній нейтралі-

зації заряджених часток. Тому забезпечення щільного контакту утворених гідратних продуктів із заповнювачами можливо забезпечити за рахунок утворення на поверхні зарядів протилежних знаків. Перезарядження поверхні кварцу можливо досягти шляхом її змочування розчинами електролітів, які вміщують іони полівалентних металів. Оптимальна концентрація може визначатися на основі оцінки величини електростатичного потенціалу.

Фізико-хімічна активація поверхні зерен як засіб забезпечення довговічності бетону можлива обробіткою розчином хлориду алюмінію для утворення умов формування щільної зони контакту з продуктами гідратації.

Рідкозубов А.А.[11] наводить зміну потенціалу при обробленні піску розчином хлориду алюмінію в порівнянні з водою (таблиця 2.5).

Таблиця 2.5 - Вплив дисперсного середовища на величину потенціалу поверхні кварцового піску.

Матеріал	Дисперсне середовище	Потенціал	
Кварц	Дисцильована вода (рН=0,9)	- 80	
Митний пісок		- 64,3	
Пісок		- 6,0	F175
Пісок	Водопровідна вода (рН=7,0)	- 45,7	F150
Митний пісок	Розчин хлориду алюмінію (рН=5,0)	+ 44	F200

Збільшення морозостійкості пов'язане з тим, що активація заповнювача призводить до ущільнення зони контакту утворених гідратних сполук із заповнювачем і тим самим до збільшення міцності зчеплення.

2.3 Аналіз впливу фактору модифікуючих добавок на структуру і властивості цементобетонів дорожніх і аеродорожніх покриттів

Результати аналізу особливостей впливу цементів і заповнювачів на властивості бетону показали їхню граничну здатність надати відповідні показники. Подальше підвищення властивостей надають органічні та мінеральні модифікуючі добавки.

Роль модифікуючих добавок детально розглянута в багатьох наукових

працях, в яких надана інформація та вплив модифікаторів на регулювання властивостей бетону.

Возний С.П. [12] наводить перелік вимог як мають задовольняти потреби:

- хімічні добавки, які підвищують водостійкість, морозостійкість, знижуючих пористість, повинні бути достатньо ефективними для того, щоб при достатньо малих дозах вони знижували капілярний підсос водопоглинання бетонів дорожніх покриттів;

- дія добавки була довготерміновою;

- добавки в оптимальній кількості і концентрації не повинні негативно впливати на інші властивості цементобетонного покриття доріг;

- добавки повинні бути нетоксичними, доступними і економічними, а їхнє використання в дорожньому будівництві повинно бути простим, технологічним і обґрунтованим.

Роль модифікуючих добавок спрямована на регулювання структури бетону в напрямку зміни його пористості як запобіжника водопроникності в умовах систематичного впливу води різної перемінності. Суть в тім, що в цементобетонах пористість зумовлена залишками повітря після ущільнення та утвореними порами в цементному камені в процесах гідратації в'язучого. Дрібні пори в цементному камені, які виникли в результаті зайвої води заміш та явищ усадки, являються каналами переміщення рідкої фази, добре з'єднані між собою та являються головними каналами при фільтрації води. Наслідки – зменшення міцності як в початковий період, так і в послідуочій експлуатації в результаті поперемінних заморожування і відтаювання, зволоження і висихання, корозії та розклинюючої дії на структуру цементобетону.

Хімічні добавки являються головними структури і властивостей цементобетону за рахунок зменшення парового простору та впливу на льодоутворення в порах при заморожуванні і відтаюванні льоду. Для таких цілей найбільш придатні модифікатори комплексної дії, до складу яких входить суперпластифікатор із фазоутворюючою функцією та електроліти.

Функцією значного пониження температури утворення льоду та зміни коефіцієнту об'ємного розширення.

В результаті дії таких комплексних добавок утворюється стабільна морозостійка структура меншої пористості та меншого розміру пор, менших усадочних явищ, підвищується міцність та розтягуваність, зменшується водонепроникність з усіма її негативними наслідками.

В будівельній практиці відомі багато хімічних модифікуючих добавок як вітчизняного виготовлення, також і зарубіжного. Вони мають різну ефективність та різну, хоча і високу, вартість. Більшість відомих модифікуючих добавок мають значну вартість дефіцитні, для них відсутня достатня сировинна база. У зв'язку з названих постає завдання деталізованого аналізу їхньої ефективності та пошуку їхньої заміни менш дефіцитними, в тому числі з можливою заміною відходами або продуктами промислових виробництв.

Відомий варіант [12] використання продукт мікробіологічного оброблення відходу цукрової промисловості, так званої післядріжжевої барди, та перетворення її в новий продукт, яка іменується метанова бражка та позначається як «МБ». Оптимальна величина такої добавки становить 0,3% по масі цементу. Ефективність дії «МБ» представлена в таблиці 2.5 за даними [12].

Таблиця 2.5 - Фізико-механічні властивості цементного каменю

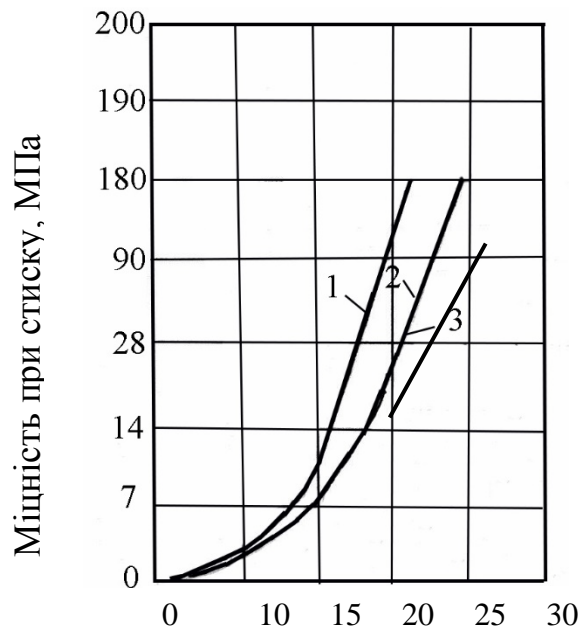
Тип та кількість добавки	Нормальна густина, В/ц, %	Кількість води замішування, л	Розплив конуса, мм	Строки тужавлення, хв		Міцність при стуску у віці, МПа		
				поч	кінець	7	4	28
-	26,25	105	148	375	535	51	65	67
МБ – 0,3	25,25	93	207	400	620	90	95	99
МБ – 0,6	20,25	81	225	373	640	58	72	91

Рухомість бетонної суміші зростає на 40%, кількість води замішування скорочується на 12%, міцність підвищується на 40%.

Стверджується (5), що для виготовлення високоміцних дорожніх бетонів слід використовувати ефективні суперпластифікуючі добавки із повіт-

ривлягуючими або газотворючими добавками з водоредуючим ефектом більше 25%. В результаті значно зменшуються витрати цементу та водоцементної потреби, що забезпечує зниження капілярної пористості та підвищення морозостійкості і довговічності цементобетону.

Для цього розглянута модифікуюча добавка комплексного складу та комплексної дії Д2. До її складу входить суперпластифікатор, гідрофобізатор, піногасник і аерант. Використання аерант обумовлено тим, що об'єм залученого повітря в бетонну суміш для одношарових або верхнього шару двошарових дорожніх покриттів повинен забезпечуватися величиною 5...7%, а для нижніх шарів двошарового покриття – 3...5%. В результаті цілеспрямованого підбору компонентів та їхнього співвідношення така комплексна добавка забезпечує рухомість бетонної суміші не менше 120 хв, суттєве зростання показників міцності, водопонепроникненості, морозостійкості. На рисунку 2.8 показана залежність величини деформації від напруження [13].



Діаграма «напруження – відносна деформація». 1 – бездобавочний цементобетон. 2 – модифікований бетон добавкою Д2

Міцність бетону з добавкою Д2 зростає до 65 МПа, тобто майже в 1,7 разів. Для забезпечення міцності і тріщиностійкості цементобетонів в умовах

складного напруженого стану запропоновано (б) модифікування структури хімічними добавками комплексної дії ШАГ. Добавка спроможна формувати малопористу структуру за зменшеним вмістом капілярних пор, збільшенням замкнених сферичних, рівномірно розташованих пор. Результатом являється збільшення в'язкості руйнування та покращення тріщиностійкості.

Розглянуто вплив добавок МПДКи та добавки в складі вапно, МПДКи та ЛСТ на фізико-механічні властивості та морозостійкість бетону. Добавки дозволяють знизити водопотребу цементного тіста та підвищити морозостійкість бетону на 100 циклів і міцність при стиску на 20...25% в порівнянні з бездобавочним.

С.М.Толмачов [14] надає достатньо деталізований аналіз дії різних модифікуючих добавок, що дозволяє виявити їхню порівняльну ефективність. Вихідною тезою оцінювання роботопридатності цементобетонів являється оцінка їхньої роботопридатності як пружньопластичного матеріалу, який працює в умовах циклічної дії динамічних та кліматичних факторів і довговічність якого зумовлена величиною пористості структури.

Відзначається, що дорожній бетон на відміну від звичайного являється малощербневим, що зумовлює збільшення коефіцієнту розсування зерен. Тому між зернами знаходиться порівняльно більша доля утвореного цементного каменю і по такій причині до структури цементного каменю висуваються більші вимоги. Звідси, для дорожніх цементобетонів обов'язковим являється використання пластифікуючих або комплексних добавок пластифікатора та повітрявтягуючого компонента.

Для порівняння прийняті комплексні добавки «Релаксол 3.3» і «Релаксол-Макс», суперпластифікатори С-3 і С-7, пластифікатор форматно-спортивний ПФС. Вплив названих добавок на однорідність сумішей (рухливість суміші за показником осідання конусу ОК, см) наведено в таблиці 2.6

Таблиця 2.6 - Розшаровуваність бетонних сумішей в залежності від модифікуючих добавок.

Показник	Добавка											
	-	-	ПФС		СП-7м		С-3		Релаксол 3.3		Релаксол-Макс	
ОК, см	6-8	3-4	8-10	3-4	8-10	3-4	8-10	3-4	8-10	3-4	8-10	3-4
Міцність, %	12	4	8	2	4	0	4	0	4	0	2	0

З наведених даних слідує, що розшаровуваність суміші знижується в 1,5...3 рази завдяки включених суперпластифікаторів, особливо покращує «Релаксол-Макс».

Головний результат впливу модифікуючих добавок проявляється в зростанні міцності при згині (табл. 2.7).

Відносно високорухливих сумішей більшою мірою в разі використання СП-7 та С-3, які забезпечують зростання міцності на 30 і 25% відповідно. Дещо менше зростання міцності бетонів з добавками ПФС і «Релаксол» (на рівні 20%). Такі результати пов'язані із зменшенням зони контакту цементного каменю і поверхні заповнювача, що впливає на міцність бетону при згині. Завдяки цьому приріст міцності при згині, а при стиску – 41...44% та 44-48% відповідно з добавками СП-7, СП-3 і «Релаксол 3.3». приблизно ідентичне зростання міцності при стисканні тазгині вказує на покращення однорідності структури завдяки впливу добавок. При цьому міцність бетону при згині з добавками «Релаксол 3.3» майже відповідає показником міцності бетону із суперпластифікаторами.

Таблиця 2.7- Вплив добавок на властивості бетону

Добавки	Вміст від маси цементу, %	ОК, см	Міцність бетону	
			R згину	R ст
-	-	3,5	4,20	31,4
ПФС	0,6	2,0	5,66	40,8
ПФС	0,6	10,0	5,12	30,9
СП-7	0,7	2,0	6,17	48,7
СП-7	0,7	14,0	5,55	33,6
С-3	0,7	3,5	6,05	49,5
С-3	0,7	16,0	5,32	31,0
«Релаксол-3.3»	0,7	3,0	6,03	46,5
«Релаксол-3.3»	0,7	12,0	5,15	32,3
«Релаксол-Макс»	2,0	3,5	5,65	44,2
«Релаксол-Макс»	2,0	10,0	4,89	33,7

Для структури та властивостей бетону важливою умовою являється попередження обезводнення в процесі твердіння, що може знизити міцність в 2...2,5 рази та морозостійкість – в 1,5...2,0 рази в разі втрати 50...65% води замішування.

Використання комплексних добавок «Релаксол», СП-7, С-3 з прискорювачами твердіння знижує витрати води в 1,5...2,0 рази (табл.2.8).

Таблиця 2.8 - Втрати води бетонами в залежності від добавок

Добавка	Втрати води, г/см ³ , діб				
	1	2	3	4	5
-	0,26	0,32	0,38	0,42	0,44
ПФС	0,21	0,25	0,3	0,33	0,37
СП-7	0,17	0,23	0,26	0,23	-,31
С-3	0,16	0,21	0,26	0,28	0,30
«Релаксол 3.3»	0,18	0,23	0,28	0,31	0,32
«Релаксол-Макс»	0,11	0,16	0,19	0,21	0,23

З таблиці видно, що найкращі результати надає добавка «Релаксол-Макс». Ще одна перевага крім значно менших втрат – рівномірний розвиток процесу обезводнення, що надає змогу рівномірному формуванню більш щільної та дрібнопористої структури.

Використання модифікуючих добавок надає можливість використовувати портландцементи з домішками доменного шлаку, зокрема ПЦ ІІ/А-Ш-400 та ПЦ ІІ/Б-Ш-400, які містять відповідно 15 і 36% шлаку.

Залежність міцності бетону від типу цементу та модифікуючих добавок наведена в таблиці 2.9

Як показують табличні дані, мають місце тенденції зростання міцності бетону при використанні цементів з незначним вмістом шлаку для усіх добавок. Кращі показники надають «Релаксол 3.3» та С-3.

Збільшення вмісту шлаку в цементі міцність бетону із суперпластифікаторами та пластифікатором ПФС дещо знижується. На відміну від них «Релаксол 3.3» має лужний характер, в той час як інші мають нейтральний.

Таблиця 2.9 - Кінетика зростання міцності бетону в залежності від типу цементу та модифікуючих добавок [14]

Добавка	Тип цементу	Міцність бетону, МПа, діб					
		При згині			При стиску		
		3	7	28	3	7	28
Еталон	ПЦ П/А-Ш-400	2,41	3,31	4,29	15,7	22,9	31,4
«Релаксол 3.3»		3,51	4,58	6,03	26,4	33,9	46,5
ПФС		1,75	4,24	5,66	21,6	23,4	40,8
СП-7		9,7	4,89	6,17	26,3	34,0	48,7
С-3		3,81	4,72	6,05	27,8	35,8	49,5
Еталон	ПЦ П/Б-Ш-400	1,77	2,65	4,07	12,9	19,5	28,7
«Релаксол 3.3»		3,36	4,76	6,1	26,7	35,0	46,1
ПФС		2,92	3,64	5,21	18,0	25,8	36,8
СП-7		2,77	4,0	5,89	20,6	29,3	42,9
С-3		2,81	3,91	5,61	19,2	27,5	42,0

Наявність лужного середовища в добавці «Релаксол 3.3» сприяє більш інтенсивному твердінню шлакової складової ПЦ П/Б-Ш-400 та зміцненню, що характеризується більш високими показниками міцності.

Наведені показники міцності при згині бетонів з добавками «Релаксолу» надають певні переваги таким добавкам в разі роботи в дорожніх покриттях. Інша перевага – можливість використовувати цементи з відносно більшим вмістом доменного шлаку.

Важливим результатом дії добавок являється покращення морозостійкості (табл.2.10).

Таблиця 2.10 - Морозостійкість дорожніх бетонів в залежності від модифікуючих добавок [13]

Добавка	Коефіцієнт морозостійкості при кількості циклів заморожування (-50°C) – відтаювання (+18°C)			
	10	20	37	55
-	0,93	-	-	-
«Релаксол 3.3»	1,04	1,01	0,95	0,85
«Релаксол-Макс»	1,02	0,97	0,94	0,8
ПФС	1,03	0,96	0,81	-
СП-7	1,06	1,00	0,94	0,84
С-3	1,05	0,98	0,95	0,8

Достатньо високу морозостійкість мають бетони з добавками «Релаксол», СП-7 та С-3. В цьому проявляється головна причина – утворення щільної макро- і мікроструктури з міцною зоною контактів та низькою пористістю.

Як наслідок щільної структури бетонів являються також показники водопоглинання і водонепроникності (табл.2.11).

Таблиця 2.11 - Показники якості бетонів в залежності від виду модифікуючої добавки [14]

Добавка	Стираність, г/см ²		Водопоглинання,%	Водонепроникність
	сухі	Вологі		
-	0,37	1,08	6,1	W2
«Релаксол-Макс»	0,38	0,61	2,9	W8
ПФС	0,45	0,74	4,1	W4
СП-7	0,41	0,68	3,7	W6
С-3	0,43	0,68	3,6	W6

Головна перевага бетонів з модифікуючими добавками проявляється майже за усіма показниками, які надзвичайно важливі для дорожніх покриттів. Зношуваність або стиранність майже в два рази менша в порівнянні з бетонами бездобавочними у вологому стані. Водопоглинання знижується теж майже в два рази, а марка по водонепроникності підвищується в 2...4 рази. Покращення водонепроникності та зменшення водопоглинання особливо показово для добавки «Релаксол-Макс», що свідчить про її належну кольматуючу здатність.

Для дорожніх цементобетонів мають місце інші модифікуючі добавки системи «Релаксол» - «Релаксол Универсам Вм», «Релаксол Универсам Б», «Релаксол Супер м», які здатні суттєво покращити структури і, відповідно, комплекс експлуатаційних властивостей (табл. 2.12).

Як видно з таблиці, цементобетони з модифікуючими добавками системи «Релаксол» проявляють здатність забезпечити властивості, які в найбільшій мірі можуть забезпечити довговічність дорожніх і аеродорожніх пок-

риттів в умовах комплексної дії механічних, кламатичних, агресивних факторів, а також з урахуванням їхньої циклічності.

Водовитрати в п'ятиденний термін можуть бути знижені в 1,5...1,9 разів, що може позитивно вплинути на структуроутворення за рахунок належних умов гідратації цементу. важливим являється збільшення міцності при згині із 4,29 до 6,1 МПа і тим самим попередити тріщиноутворення. При цьому морозостійкість зростає в 2,0...3,0 рази, а водонепроникність – в 2-а і більше разів.

Таблиця 2.12 - Властивості дорожніх цементобетонів з добавками системою «Релаксол»

Добавки	Дозування, % маси цементу	Середня густина, кг/м ³	Втрати вологості, г/см ² після 5 діб	Міцність при згині, МПа у віці 28 діб	Міцність при стиску, МПа після 28 діб	Морозостійкість, F	Водонепроникність, W
Еталон	-	2320	0,44	2,8	31,4	100	2...4
Універсал Б	1,2-1,8	2375	0,32	6,03	46,5	200	4...6
Універсал БМ	3,0-4,0	2410	0,23	6,11	48,5	300	8...10
Супер М	0,6-1,0	2390				250	6...9

2.3.2 Аналіз впливу фактору гідрофобних добавок на властивості дорожніх і аеродромних бетонів

Визначена [2+Д+Ципкіна] необхідність підвищення довговічності бетонів дорожніх покриттів їхньою гідрофобізацією, що не тільки знижує фізико-механічні властивості, але підвищують стійкість проти корозійної дії розчинів хлористих солей, та навіть атмосферної води, протидією поперемінним заморожуванню і відтаюванню, зволоженню і висиханню.

Достатньо ефективними являються гідрофобні добавки, які дозволя-

ють суттєво підвищити водостійкість і водонепроникність, морозостійкість і корозійну стійкість бетону при багаторазовому і відтаюванні в агресивних розчинах без пониження фізико-механічних показників.

До таких добавок в сучасних дорожніх бетонах відносяться органосілоксани, органополісілоксани, політелієнгідросілоксани, гексагідлани, метилвінілтриетоксисилани, тетраксієтилендіамін, етилсілікати. Але найбільше в дорожньому будівництві знайшли гідрофобізуючі традиційні добавки ГКЖ-94 та її модифіковані варіанти. Кількість добавок знаходиться в широкому діапазоні значень від 0,01...1% до 1...5%.

Возний С.П. [12] наводить порівняльні характеристики цементнобетонів з включенням до його складу двох гідрофобізуючих речовин – ГКЖ-94 (поліетилєнгідросілоксан) та АДЕ-3 (дієтиленамінометилтриетилксілан).

На рисунках 2.9...2.11 представлені графічні залежності фізико-механічних властивостей цементобетону в залежності від величини та виду добавки.

Позитивний вплив добавок проявляється в зростанні міцності на 11...15% при стиску, а модуль пружності зменшується на 3...10 %, що надає можливість прогнозувати підвищення тріщиностійкості покриття. Виявлені також співвідношення таких характеристик, що надають змогу надати висновки відносно якості структури бетону, зокрема показники співвідношення міцності при стиску та розтягуванні $R_{ст}/R_{ор}$. Зростання величини співвідношення вказує на погіршення однорідності і якості бетону.

Вважається [12], що гідрофобізація дозволяє частково перерозподілити концентрацію напружень не тільки в процесі структуроутворення бетону, але і під час його навантажень. Про це вказують показники міцності цементобетону при стиску та розтягуванні при згині. На основі таких взаємозв'язків можливо прогнозувати підвищення зчеплення розчину із зернами заповнювачів в залежності від появи тріщиноутворення (таблиця 2.15).

Завдяки зміні характеристик структур і розмірів пор надається можливість підвищити щільність і однорідність, міцність на осьове розтягування, зменшити усадку, яка зумовлює підвищення тріщиностійкості та довговіч-

ність цементобетонних покриттів завдяки гідрофобним добавкам. Граничні показники мікротріщиноутворення в бетоні в процесі навантажень покращуються в бетонах з гідрофобними добавками покращуються в порівнянні з бездобавочними.

Областю умовної пружності роботи бетону слід вважати час від початку навантаження до напруження, при якому утворюються перші мікротріщини в контактній зоні поверхонь зчеплення цементного каменю із заповнювачем. При цьому границя пружної роботи відповідає найбільшому скороченню часу проходження ультразвуку при такому методі визначень. В разі подальшого зростання навантаження мікротріщини утворюються в цементному камені з появою пластичних деформацій.

Основною причиною тріщиноутворення являється поява деформацій розтягування величиною, яка перевищує граничну розтягуваність бетону і яка залежить від міцності і модуля пружності при розтягуванні.

Рисунок 2.9 - Вплив гідродобавок на міцність при стиску $R_{ст}$, МПа; 0,015%, 0,1% 1 – етанол; 2 – ГКЖ; 3 – АДЕ

Таблиця 2.13 – Показники якості цементного бетону з гідрофобною добавкою.

Назва показника	Еталон	Гкж-94	АДЕ-3
$R_{ст}/R_{о.р.}$	14,23/100	1398/90	13,47/95
$R_{пр}/R_{ст.кут.}$	0,45/100	0,762/102	0,771/103
$R_{роз.ц.}/R_{роз.2р}$	0,114/100	0,17/103	0,118/104
$R_{роз.ц.}/E_{0,5} \cdot R$	1,326/100	1,453/100	1,491/118

Таблиця 2.14 – Вплив гідрофобних добавок на властивості цементобетонів

Наявність гідрофобних добавок	Морозостійкість (200 цикл)			Водо-Непроникненість, МПа після діб		Міцність при ударі Дж/см ²	Стирання
	R _{ст} , МПа	Середовище відтворення					
		H ₂ O	5%NaCl				
		R _{ст} /Км МПа	R _{ст} /Км МПа				
Без добавок	59,5	56,5/0,95	50,0/0,84	0,4	0,8	2,5	0,26/0,32
ГЖК - 94	61,2	64,3/0,93	60,0/0,93	1,0	1,4	2,95	0,16/0,19
АДЕ - 3	66,8	66,4/1,0	59,1/0,97	1,2	1,4	3,15	0,11/0,17

Таблиця 2.15 – Тріщиностійкість цементобетонів

Автор критеріїв тріщиностійкості	Формула розрахунку	Наявність гідрофобної добавки			Підвищення тріщиностійкості, разів
		Без	ГЖК-94	АДЕ-3	
Берг О.Я.	$\frac{R_T^o}{R_T^D}$	9,0	16,68	13,64	1,13 – 1,40
		16,8	20,32	21,67	1,21 – 1,30
Саталкін А.В.	$K_T \frac{R_E}{E_E}$	0,98	0,35	1,41	1,36 – 1,44
Орентліхер Л.П. Новікова І.П.	$K_T \frac{\varepsilon}{\varepsilon}$	0,75	0,9	0,98	1,8 – 1,24
Лерміт Г.М.	Час утворення нових тріщин	2 (ц.к)	10	11	5,0 – 5,5
		38(ц.р.)	82	110	3,0 – 3,4

2.3.4. Аналіз залежності структури і властивостей дорожніх і аеродромних цементобетонів від мінеральних модифікуючих добавок

Сучасний розвиток бетонування спрямований на виготовлення бетонів литих та самоущільнюючих консистенцій бетонних сумішей спрямований на підвищення вмісту цементного тіста, яке крім цементу вміщує до 30% тонкодисперсних мінеральних добавок. Такі добавки призначені виконувати задану модифікуючу функцію крім простої заміни в'язучого.

Проблеми модифікування бетонів тонко- ультрадисперсними мінеральними добавками висвітлена в багатьох працях (Б, Д, У, Бм, К). при цьому стверджується (к), що суперпластифікатори мають більшу ефективність

впливу, якщо вони діють на суміш цементу і мінерального порошку. Пояснення цьому знаходять в тому, що суперпластифікатори трудно диспергують утворені колоїдні і гелеві частки на поверхні цементного зерна. Оболонки води на поверхні мінеральних зерен легко диспергуються суперпластифікаторами, що дозволяє покращити рухливість бетонної суміші та суттєво знизити водопотребу. В результаті покращується процеси структуроутворення, сама структура та її властивості.

Згідно стандарту Європи EN-20 6-1, термін «мінеральна добавка» являє собою тонкопотріблений компонент бетонної суміші з метою покращення властивостей.

В таблиці 2.16 наведена класифікація і характеристика мінеральних добавок, що може бути використано при виборі для цементобетонів.

Згідно EN-20 6-1 неорганічні мінеральні добавки поділяються на два типи:

- тип I - добавки практично інертні;
- тип II – добавки з пуцолановими або сховано гідравлічними властивостями.

Наведені в таблиці 2.16 класифікаційні ознаки та характеристики дозволяють встановити наступне:

- серед названих видів мають місце промислові відходи, в тому числі металургійні склади, золи винесення ТЕС, мікрокремнезем, що дозволяє використовувати їхню гідравлічну або пуцоланову активність;

- деякі природні матеріали, до складу яких входять силікатне скло та лужні компоненти, можуть мати нормальну пуцоланову активність, використання яких дозволяє регулювати структуру та корозійну стійкість;

гідравлічні властивості (здатність взаємодіяти з водою та утворювати гідратні сполуки) і пуцоланова активність (взаємодія з гідроксидом кальцію $\text{Ca}(\text{OH})_2$, утвореного в результаті гідратації цементу, та перетворення його з легкокорозійного компоненту у важкорозійні гідросилікати кальцію $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) дозволяють регулювати властивості бетонної суміші та бетону.

Таблиця 2.16 – Класифікація мінеральних добавок

№ п.п	Класифікація		Хімічний і мінеральний склад	Характеристики
	Ознака	Матеріал		
1	В'язучі властивості	Швидкоохолоджені металургійні шлаки	Силікатне скло, яке містить CaO, MgO, Al ₂ O ₃ . Кристалічні компоненти в незначних кількостях.	Гранули з 5...15% вологи. Після висушування подрібнюються < 45МкМ; S _n = 350...500 м ² /кг
2	В'язучі і пуцоланові властивості	Висококальційована зола-винесення CaO >10 %	Аморфний кремнезем, вміщуючий CaO, MgO, Al ₂ O ₃ . Кристалічні компоненти можуть бути присутні у вигляді SiO ₂ , С ₃ A. штучні гідравлічні добавки CS ₄ ; C ₄ +S.	10...15% > 45МкМ. Більша частина – сферичної форми S _n = 400 м ² /кг
3	Висока пуцоланова активність	Мікрокремнезем	Кремнезем аморфної модифікації.	Порошок часточок сферичної форми d = 0,1 МкМ; S _{yp} = 20 м ² /кг
4	Нормальна пуцоланова активність	Низькокальційована зола-винесення CaO < 10%	Силікатне скло вміщуюча Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃ луги. Кристалічні речовини складаються із SiO ₂ , муліта, гематита, магнетита	Порошок із сферичних часток > 45МкМ. Більшість часток > 20 МкМ. S _{уд} ≈ 250...350 м ² /кг
		Природні матеріали, опока	Крім алюмосилікатного скла містить кварц, польовий штат, слюду	Більшість часток розмелена до розмірів < 45 МкМ. Структура – гостра кутна.
5	Слаба пуцоланова активність	Повільно охолоджені шлаки, золи гідротранспортування, золошлаки	Кристалічні силікатні мінерали. Мала кількість некристалічних компонентів	Подрібнюються додатково для надання пуцоланових властивостей

Якщо використовують добавки з пуцолановими властивостями, тоді водопотребу суміші встановлюють з урахуванням вмісту мінеральної складової: $V/Ц + K \cdot d$,

де K – коефіцієнт, величина якого залежить від пуцоланової активності добавки; d – вміст мінеральної добавки.

Для сумішей з пуцолановими мінеральними добавками встановлюють термін «водотверде відношення».

Для найбільш відомих модифікуючих добавок відносять кремнези SiO_2 , який може утворюватися як побічний продукт при виробництві феросиліцію; зола-винесення ТЕС при встановлюванні вугілля зі складним мінеральним мінеральним складом; метакаоїн $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n \text{SiO}_2$; кам'яна мука.

В якості активної мінеральної добавки Дворкін Л.Й. та Боржена [9] розглядають метакаоїн та гранітну муку (тонкодисперсний продукт), як відходи камнеперероблення. При цьому такі відходи оцінюють як компонент комплексної добавки в поєднанні з хімічними.

Основна маса відходів виробництва нерудних матеріалів представлена відсівами від подріблення гірських порів та щебінь. Значку частину відсівів (15...25%) складає пилоподібна функція з розмірами зерен менше 0,16 мм. Одним з основних напрямків її застосування є використання в якості дисперсного наповнювача при виготовленні бетонів та розчинів.

Карбонатні породи сприяють зниженню витрат цементу, забезпечуючи покращення властивостей сумішей і затверділих розчинів і бетонів.

Згідно з класифікацією мінеральних матеріалів за їх реакційною здатністю в лужному середовищі, тобто в умовах контакту з тверднучим цементом граніти та близькі до них породи, що містять польові шлаки, в умовах нормального твердіння є хімічно неактивні (1). Але завдяки високій дисперсності та підвищеній хімічній енергії гранітна мука (ГКМ) також як і інші дисперсні мінеральні наповнювачі активно впливає на фізико-хімічні процеси гідратації і структуроутворення цементного каменю і, відповідно, на властивості бетонів.

В сучасні рецептури бетонів і розчинів поряд з наповнювачами вводять добавки поверхнево-активних речовин (ПАР) з метою покращення легкоукладальності сумішей, зменшуючи їх водопотребу, втягування повітря, тощо... показали, що ефективність добавок мінеральних наповнювачів в цементних розчинах і бетонних суттєво збільшується при введенні добавок

ПАР, що може розглядатись як один із способів активації наповнювачів в розчинах і бетонах.

Крім зменшення міжфазової поверхневої енергії при створенні адсорбційно активного середовища, що позитивно позначається на величині адгезійних контактів, ПАР також здійснюють дефлокуючий вплив на високодисперсні наповнювачі, схильні до агрування (2).

Модифікування наповнених розчинів і бетонів може здійснюватися не тільки органічними добавками ПАР і полімерів, але і мінеральними добавками, зокрема такими високоактивними, як мікрокремнезем і метакаолін. Добавки ПАР і полімерів, а також високоактивні кремнеземисті і алюмокремнеземисті добавки можна розглядати як поліфункціональні модифікатори (НФМ), що активізують вплив мінеральних наповнювачів на властивості бетонів. Питома поверхня ГKM – 250 м²/кг.

В сухі суміші вводили порошкоподібний СП-3, в якості водоутримуючої добавки використовують ефіри целюлози (ЕЦ) – металгидроксиетиленцелюлозу Tylose/ як кремнезисту добавку використовували метакаолін (МКТ). Питома поверхня МTK – 650 м²/кг, активність за поглинанням СаО-19 лг/л.

Найбільше на зміну легкоукладальності дрібнозернистих бетонів впливають вміст суперпластифікатора та води.

Додаткове включення до композиції суперпластифікатор – ефіру целюлози (Tslose) високодисперсного алюмокремнеземистого компоненту – метакаоліну дає можливість додатково збільшувати міцність дрібнозернистих бетонів наповнених гранітною кам'яною мукою. Деяке підвищення при цьому водопотреби сумішей можна компенсувати регулюванням вмісту суперпластифікатора.

Гранітна мука (ГKM) при оптимальному дозуванні позитивно впливає на легкоукладальність, водоутримуючу здатність та міцність.

Властивості дрібнозернистих бетонів, наповнених ГKM, суттєво покращується при додатковому введенні в розчинну суміш добавок суперплас-

тифікаторів, ефірів целюлози (Tylose) і високоактивного метакаоліну.

2.4. Аналіз залежностей структури і властивостей дорожніх і аеродромних цементобетонів від їхнього складу

Раціональний склад цементобетону призначений забезпечити надійну довговічність, яка, в свою чергу, залежить від щільності структури і яка залежить від щільності утвореного цементного каменю та міцності його зчеплення з поверхнею зерен заповнювачів. Перша умова виконується за рахунок мінімізації цементоводного відношення. Характер зчеплення залежить від мінерального і петрографічної будови зерен, характеру їхньої поверхні, взаємодії з новоутвореними гідратними сполуками цементу.

Між новоутвореним цементним каменем та зернами формується своєрідна зона контакту $[N^1]$, яка являє собою мікрооб'єм поблизу поверхні розділення цементний камінь – заповнювач та до якої входить поверхневий шар заповнювача, контактний шар цементного каменю та границю розділення між ними.

Зона контакту між цементним каменем і заповнювачем виявляється, як правило, вирішальним місцем, яке зумовлює властивості бетону загалом. При руйнуванні бетону виявляються характерні порожнини, які точно копіюють поверхню зерен заповнювача (1). При цьому значна частина поверхні зерна не має слідів цементного каменю як результат відсутності або недостатнього зчеплення між ними, тому для покращення загалом фізико-механічних властивостей і довговічності цементобетону необхідно, перш за все, забезпечити відповідну міцність зчеплення цементного каменю із заповнювачем, що являють собою найбільш слабку і ненадійну ділянку і структурі цементного бетону.

Отримати довговічний цементобетон можливо шляхом цілеспрямованого регулювання процесами формування зон контакту. Для цього потрібно створювати потрібні умови структуроутворення.

Процеси зволоження та адсортування поверхні зерен та продуктами формування адгезійних контактів поверхні зерен та продуктами гідратації цементу. Сили зчеплення залежать від адсорбційних та електроповерхневих властивостей і особливостей цементу, що загалом зумовлює характеристики зони контакту та структури матеріалу, що потрібно врахувати в заходах по регулюванні властивостей.

Слід зважити, що зерна кварцового піску можуть бути покриті полімінеральними утвореннями [11]. Крім потенціаловизначаючими атомними групами мінеральної поверхні зерна піску, полімінеральні комплекси впливають на величину електروпотенціалу зерна.

В залежності від названих особливостей відбувається взаємодія між поверхнею зерна та продуктами гідратації, яка може проявлятися в притягуванні або відштовхуванні двох контактованих та взаємодіючих складових.

Звідси, для забезпечення щільного контакту продуктів гідратації і заповнювача потрібно на його поверхні утворювати заряди протилежних знаків. Перезарядження поверхні кварцу можливо виконати шляхом змочування розчинами електролітів, які вміщують іони полівалентних металів, зокрема розчин хлориду алюмінія.

Іншими заходами можуть бути технології попереднього оброблення зерен заповнювачів цементною суспензією, в тому числі пористих, що надає можливість підвищити міцність бетону на 4...5 МПа за рахунок формування контактної зони [11].

Послідуючі заходи по підвищенню фізико-механічних та інших властивостей пов'язані із вдосконаленням структури цементного каменю за рахунок зменшення його пористості, для чого передбачено понизити його водоцементне відношення. З цією метою широко використовують хімічні та мінеральні добавки, що було розглянуто попередньо.

Якщо розглядати усі складові бетону, то єдиним компонентом, який може змінювати свою пористість, являється утворений цементний камінь, в той час зерна дрібного та крупного заповнювачів мають належну від процесів гідратації структуру.

Вода затворення цементобетонних сумішей має надати потрібну легкоукладальність, у зв'язку з чим встановлюють вимоги до рухливості або жорсткості як функції вмісту води.

Зміну пористості цементного каменю від водоцементного відношення представлена на рисунку 2.13 за результатами проведених розрахунків.

Наведена графічна залежність показує головний напрямок пошуку довговічних цементобетонів, а також з урахування впливу вищенаведених факторів.

Для визначення складу дорожнього і аеродромних цементобетонів проводять розрахунки, які базуються на використанні відомої формули Болломея-Скрамтаєва та які спрямовані, в першу чергу, на визначення водопотреби.

Шурган А.Г. та Чиженко Н.П.[8] пропонують водоцементне відношення визначати за формулою:

$$В/Ц \frac{0,34R_{ц}}{R_{б}+0,034R_{ц}}, \quad (2.4)$$

Де $R_{ц}$ – гранична міцність цементу при згині, яка визначається експериментально;

$R_{б} \geq 5,5$ МПа – міцність компоненту при згині (для високоміцного бетону).

Має місце інший підхід до розрахунків складу дорожнього бетону [11]:

$$Ц/В \frac{f_{ст}}{0,39R_{cf}-(1-0,025V_c)} + 0,1, \quad (2.5)$$

де $f_{ст}$ – міцність бетону при стиску, МПа; R_{cf} – активність цементу, МПа; V_c – об'єм втягнутого повітря, д.о.

Можливо також визначення складу згідно [5].

Об'єм втягнутого повітря може бути визначений:

$$V_{пл} \frac{\ln\left(\frac{F}{A_1 \cdot f_{ст} \cdot A_2}\right)}{A_3}, \quad (2.6)$$

де F і $f_{ст}$ – відповідно нормовані показники критичного числа циклів заморожування і відтаювання та міцність бетону при стиску;

A_1 і A_2 – коефіцієнти, обумовлені відповідно водовмістом і легкоукладальністю бетонної суміші; A_3 – коефіцієнт, який враховує особливості використання матеріалів; $A_3 = 0,35$.

3 ВИЗНАЧЕННЯ ЗАХОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДОРОЖНІХ І АЕРОДРОМНИХ ЦЕМЕНТОБЕТОНІВ

3.1 Визначення заходів вибору складових для довговічних цементобетонів в дорожньому будівництві

Вирішення проблеми виготовлення довговічних дорожніх бетонів потребує формування достатньо міцної та мороз- і корозійностійкої структури. Для цього потрібно враховувати взаємозв'язок властивостей складових, склад бетонної суміші, структуру і властивості бетону, технологічні фактори, експлуатаційні та природно-кліматичний вплив. Тому проблема підвищення довговічності цементобетонних дорожніх і аеродромних покриттів має комплексний характер.

Перехід на високоміцні бетони дозволяє понизити рівень напружень від сумарної дії транспортних навантажень, температурних навантажень та водного середовища, стабілізувати структуру та суттєво підвищити терміни експлуатації бетонних покриттів автомобільних доріг і аеродромів.

Вважають, що оптимізація бетонної суміші і бетону має відповідати наступним показникам: модуль пружності гранітного щебеню – $70...90 \cdot 10^3$ МПа; розчинної частини – $15...20 \cdot 10^3$ МПа; модуль пружності бетонів – $37...42 \cdot 10^3$ МПа при 5...6% втягнутого повітря. Для цього необхідно обмежувати кількість щебеню в межах 1050...1250 кг/м³, а співвідношення між дрібним і крупним заповнювачами визначається модулем крупності пісків (співвідношення – величин 2). Так, для мілких пісків з модулем крупності $M_k \leq 1,8$ величина $r = 0,38...0,40$; для крупних пісків з модулем крупності $M_{кр} \geq 2,1$ величина $r = 0,4...0,45$.

Для дорожніх покриттів потрібний високоміцний бетон, у якого міцність на роззягування при згині перевищує 5,5 МПа, а також з підвищеними

показниками водонепроникності, морозостійкості, тріщиностійкості. Перелічені умови виконуються вибором компонентів та їхнім співвідношенням для формування потрібних структур. При цьому показники властивостей мають чітку залежність від пористості структури.

Головною причиною недоліків бетонів являється наявність в їхній структурі пористості, так як в бетонну суміш включають більше води, ніж потрібно для гідратації. Тому головною причиною пористості бетону являється пористість цементного каменю та контактної зони між цементним каменем та поверхнею зерен заповнювачів.

На дорожній бетон впливає також волога, яка проникає в бетон за рахунок капілярного всмоктування, що сприяє переносу води.

Для мінімізації деформативності і проникаючої здатності потрібні оптимальне співвідношення кристалогідратів і геля в цементному камені, водоцементне відношення і коефіцієнт розсування зерен.

По мірі нарощування кількості циклів поперемінного зволоження і висушування відбувається зростання залишкових деформацій, які можуть бути визначені, як втома. Такі значення перемінні деформації від зволоження та висушування викликають руйнування бетону як наслідки його втоми.

Усадка бетону, як капілярно-пористого тіла, пов'язана з тиском меніска рідини в капілярах, тобто в тріщинах. В результаті тиску на поверхні тріщини відбувається її розширення.

В заповнених водою тріщинах проявляється так званий «ефект Ребіндера», тобто розклинююча дія. В результаті насичення пор водою збільшуються об'єми, тобто має місце зростання пористості.

Морозостійкість бетону як пористого матеріалу проявляється:

- багаторазове замерзання та відтаювання в насиченому стані може відбуватися як в чистій, так і в розчинах хлористих солей;
- багаторазове замерзання під шаром води з утворенням на поверхні бетону шару льоду;

- багаторазове глибоке висушування бетону в насиченому розчині хлористих солей стані.

Особливо великий вплив має утворення на поверхні бетону шару льоду та дія солей відтаювання. При заморожування під шаром льоду підвищується ступінь водонасичення бетону, особливо в поверхневому шарі. Таяння льоду при від'ємних температурах дією хлористого натрію являється ендотермічним процесом і тому в поверхневому шарі бетону відбувається різке зниження температури.

Має місце прискорене руйнування бетону при замерзанні в розчинах електролітів, в тому числі хлоридів. Причина полягає в інтенсифікації хімічної корозії у зв'язку з підвищенням концентрації солей в розчинах по мірі вимерзання з нього прісного льоду.

Шкідливу дію викликає процес обезводнення хлористого розчину та перетворення солей в кристалогідратний стан зі значним збільшенням об'єму та додаткових напружень.

Визначення заходів вибору складових дорожнього бетону пов'язано з рядом вимог щодо складу, технологічного та експлуатаційного характеру [12]:

- забезпечення належної рухомості бетонної суміші;
- забезпечення міцності в найкоротші та довготривалі терміни;
- забезпечення довговічності за рахунок потрібних величин міцності, морозо-, зносо- і водостійкості.

Усі наведені фактори впливу на експлуатаційну довговічність бетонів вказують на їхню залежність від пористості структури, яка, в свою чергу, зумовлена водоцементним відношенням. На довговічність впливають також активність цементу та його тип (вид), якісні параметри заповнювачів, модифікуючі добавки, дисперсне армування, тощо. Визначення складу бетону потребує оцінювання усіх перелічених факторів.

Для забезпечення довговічності і якості ддоржнього і аеродромного цементобетону необхідно підвищувати морозостійкість, водонепроникність.

Необхідно підкреслити, що оголовною причиною водонепроникнення являється наявність в бетоні пористості. Для забезпечення потрібної легкоукладальності в бетонну суміш вводять воду замішування більше, ніж це потрібно для гідратації. Головну роль в водопроникаючій здатності бетону відіграють пористість цементного каменю та контактна зона між цементним каменем і поверхнею зерна заповнювачів.

На мінімізацію деформативності та водонепроникнення впливають використання суперпластифікаторів, оптимальне співвідношення утворених кристалогідратів і гулю в цементному камені, водоцементне відношення, коефіцієнт розсування зерен заповнювачів.

Зростання циклів зволоження та висихання спричиняє збільшення залишкових деформацій, які можуть бути визначені як втома.

Усадка та усадочні напруження в бетоні небезпечні у ранньому віці. Свіжеукладений бетон в дорожнє покриття під впливом сухого повітря, сонця і вітру інтенсивно втрачає вологу, що викликає зменшення об'єму та ускладнює процеси твердіння і формування структури. Виникають внутрішні усадочні напруження, які недостатньо компенсуються масломіцним бетоном. Наслідки – поява на поверхні усадочних тріщин.

Зовнішні знакоперемінні деформації в результаті зволоження та висихання викликають пошкодження бетону при подальшій експлуатації.

Усадка бетону, як капілярно-пористого тіла, пов'язана з тиском меніска рідини в капілярі, тобто в тріщині меніска рідини тисне на поверхні тріщини, що призводить до збільшення ширини її розкриття «ефект П.Ребіндера» [17], такий процес пов'язаний з адсорбційним зниженням міцності та призводить до подальшого зростання об'єму капілярно-пористого простору.

Дія багаторазового замерзання та відтаювання впливає на верхній шар цементобетону дорожнього покриття наступним чином:

- насичення структури чистою або мінералізованою водою;
- багаторазове глибоке висихання (тобто вимерзання) бетону, який мінералізований хлористими солями.

Важливу роль в забезпеченні достатньої морозостійкості цементобетону має забезпечення нормальних умов твердіння на початковій стадії. Порушення умов твердіння викликає інтенсивність масообмінних процесів, які зумовлені наявністю градієнтів температури і вологи та їх сумісною дією. Рідина фаза піднімається до поверхні і утворює в його розчинній частині і капіляри відкритого типу або розширюючи уже існуючі.

Руйнування цементобетону при замерзанні пов'язане з розширенням води при переході в твердий стан в порах. Тиск утвореного льоду в незамкнених порах може досягати сотень атмосфер.

Корозійні процеси бетону відбуваються в результаті хімічної взаємодії складових цементного каменю з хімічно активною водою та її розчинами.

Корозія першого виду протікає, коли під дією однобічного тиску виникає фільтрація води крізь товщу бетону. При цьому виникає розчинення та винесення із структури бетону деяких складових цементного каменю. Руйнування такої важливої складової суттєво знижує не тільки фізико-хімічні властивості, але також збільшує пористість і тим самим водонасичення, поверхню контакту з агресивним середовищем, об'єми утвореного льоду в порах і величину тиску.

Якщо має місце мінералізована хлоридами вода, тоді виникають умови корозії другого виду, яка зумовлена обмінними реакціями між солями водного розчину та складовими цементного каменю. Результатами таких процесів являється утворення пухких продуктів без в'язучих властивостей. Тобто на зміну високоміцному каменю приходять маломіцні утворення, які легко розчиняються та виносяться з бетону, залишаючи нові оголені поверхні для подальшої взаємодії та руйнувань.

Великі негативні наслідки мають утворення на поверхні бетонного покриття шару льоду та дія солей відтаювання. В результаті заморожування під шаром льоду підвищується величина водонасичення бетону, особливо шарах, які контактують із шаром льоду. При заморожуванні утворюються кристалики льоду із води, а концентрація хлористих солей зростає, що спри-

чиняє збільшення корозійних процесів. В разі обезводнення розчину, солі хлоридів переходять із безводної форми в кристалогідратну, збільшуються в об'ємі та викликають значні додаткові напруження в порах бетону.

3.2 Визначення вибору цементів для бетонів дорожніх і аеродромних покриттів

Вибір цементів для бетонів дорожнього і аеродромного призначення потребує урахування впливу наступних факторів:

- залежність морозостійкості бетонів від вмісту мінеральних добавок у складі портландцементу, збільшення їхнього вмісту негативно впливає на морозостійкість, що зумовлює необхідність обмежувати їхній вміст до 6%;
- позитивний вплив мінеральної складової портландцементу на корозійну стійкість в умовах корозії першого виду (водостійкість), що практично розширює придатність усіх видів цементів з мінеральними добавками відповідати вказаним вимогам;
- здатність забезпечити визначену міцність бетону при мінімально можливих витратах у відповідності з активністю (маркою);
- наявність на ринках в основній масі шлакопортландцементів як найбільш економічного виду за рахунок використання добавок гранульованих доменних шлаків, які поєднують функції гідравлічного в'язучого та пуцолани.

Перелічені фактори зумовлюють необхідність пошуку шляхів поєднання в цементах усіх потрібних властивостей. Завдання зводиться до виготовлення в умовах будівельних організацій в'язучого на базі портландцементу першого виду (без добавок) або третього виду (шлакопортландцемент). В'язуче має забезпечити гідравлічну та пуцоланову активність, тобто надати бетонам потрібну міцність та корозійну стійкість. Недостатню при цьому мо-

розостійкість можливо компенсувати іншими заходами, тобто добавками відповідного призначення.

З урахуванням наведених передумов для підготовки в'язучих на базі бездобавочного портландцементу (першого типу) вводяться добавки шлакопортландцементу в наступних кількостях в залежності від їхньої активності:

- М300 - % по масі;
- М400 - % по масі;
- М500 - % по масі.

Якщо в'язучі готуються на основі шлакопортландцементу, використовують добавки портландцементу першого типу в таких кількостях:

- до ШПЦ М300 - ... % по масі;
- до ШПЦ М400 - .. % по масі;
- до ШПЦ М500 - ... % по масі.

Використання шлакопортландцементу в зазначених величинах прийнято з урахуванням можливого вмісту шлакової складової:

- М300 – вміст шлакового компоненту складає 35...50%;
- М400 – вміст шлакового компоненту складає 50...68%;
- М500 – вміст шлакового компоненту складає 69...85%.

Прийнята величина активності бездобавочного портландцементу відповідає марці М400. Якщо використовувати цемент іншої активності, слід виконати відповідні корегування.

Якщо цементи готуються безпосередньо в умовах дорожньої будівельної організації, складові визначаються у відповідності до даних сертифікатів. Для підтвердження активності слід виконати випробовування зразків складу 1:3 на стиск.

Цемент у бетоні для дорожніх і аеродромних покриттів повинен протистояти дії різноманітних факторів, які утворюють важкі умови експлуатації. У зв'язку з цим в складі портландцементу має бути обмеженим вміст найбільш впливового до негативних наслідків мінералу – трьохкальцієвого мінералу C_3A у кількості не більше 8%. Вміст доменного шлаку повинен бу-

ти не більше 15%. Інші мінеральні добавки не застосовуються. Питома поверхня портландцементу з добавками має бути не менше 280 м²/кг.

При виборі цементу слід враховувати, що завдання сучасних технологій бетонування спрямовані на розроблення ефективних матеріалів з позицій їхньої економічної доцільності, так як дозволяє скоротити витрати ресурсів. Звідси виникає завдання зниження витрат найбільш ресурсоемної складової бетону-цементу.

Важливим напрямком у виготовленні бетонів є використання мінеральних додатків, особливо техногенних продуктів.

У відповідності державному стандарту ДСТУ Б.В.2.7-46-96 та європейського стандарту EN 197 по відношенню до цементів їхній склад повинен містити не менше двох видів мінеральних додатків різної природи активності, зокрема гідравлічної та пуцоланової дії (активного кремнезему SiO₂).

Наукові та техніко-економічні прогнози свідчать, що протягом десятиліть буде дієвою тенденція подальшого збільшення використання мінеральних добавок за рахунок раціонального вибору складу та модифікування органічними речовинами.

Державні стандарти передбачають можливість використання шлакопортландцементів (...). відомі результати визначення впливу вмісту доменного шлаку (...) показали, що за умови включення суперпластифікаторів та комплексних модифікуючих добавок вміст доменного шлаку в цементі може бути 35% (для марок М400).

Дрібні та крупні заповнювачі в складі бетонів відповідальні перш за все, за міцність та розтягваність при згині та зчеплення їхніх зерен з утвореним цементним каменем.

Щодо надання необхідної зносостійкості бетону слід враховувати, що така характеристика є похідною від міцності при стиску. Опір зношуванню при експлуатації дорожнього покриття являється достатнім при міцності бетону на стиск вище 30МПа.

Завдання потрібної морозостійкості може бути вирішене за рахунок включення до складу бетонної суміші і відповідної кількості повітрявтягуючої або газоутворюючої добавок.

Аналіз відомих положень в області закономірностей синтезу штучного каменю із заданими властивостями показує доцільність модифікування портландцементних систем як мінеральними, так і комплексними пластифікуюче-прискорюючими добавками. Потенціал модифікування досягається за рахунок зміни на рівні наноструктури продуктів гідратації в цементуючих системах за рахунок явища адсорбційного модифікування та реакцій в неклінкерних частинах в'язучого з ущільненням капілярно-пористої структури. В результаті відбувається синтез міцності штучного каменю та виготовлення бетонних виробів будівельно-технічними властивостями.

Утворення мікроструктури та синтез міцності штучного каменю на основі модифікованих цементних в'язучих визначається процесами взаємодії мінеральних та органічних складових добавок з продуктами гідратації в цілому та утвореним гідроксидом кальцію. Певна роль при цьому надається мінеральним добавкам, здатним взаємодіяти з гідроксидом кальцію, зв'язувати його і утворювати гідратні сполуки.

Бетони, модифіковані за добавками, в першу чергу, поліфункціональної дії та дисперсних мінеральних наповнювачів, являють собою багатоконпонентні композиційні матеріали різних властивостей та різноманітного функціонального призначення. Їхня загальна кількість перевищує 1000 видів з міцністю від 0,3 до 150 МПа і більше, середньою густиною 200...2000 кг/м³.

3.3 Визначення параметрів заповнювачів для бетонів дорожніх і аеродромних покриттів

Дрібні і крупні заповнювачі в складі дорожніх бетонів відповідальні в першу чергу, за міцність на розтягування при згині та зчепленні з утвореним

цементним каменем. Тому заповнювачі повинні мати певні показники параметрів [11,14].

Відносно гранулометричного складу дрібних та крупних заповнювачів їхній вибір можливо визначити їхню питому поверхню, яка певною мірою впливає на адгезійну здатність в залежності від фракцій та мінерального складу.

Таблиця 3.1. – Питома поверхня зерен заповнювачів

№ п.п	Розмір зерен ,мм	Питома		Площа поверхні, мм	
		Вапняк	Діорит	Граніт	Кварцовий пісок
1	< 0,071	470,0	286,5	290,0	190,0
2	0,71...0,14	116,1	107,0	67,0	40,0
3	0,14...0,315	22,1	21,9	28,0	12,0
4	0,315...0,63	10,3	10,5	14,0	8,0
5	0,63...1,25	5,5	5,5	6,5	5,8
6	1,25...2,5	3,6	3,6	3,7	2,5
7	2,5...5,0	1,45	1,4	1,7	1,0
8	5,0...10,0	1,73	0,71	0,76	
9	10,0...15,0	0,44	0,42	0,44	

Як видно з таблиці, представлені гірські породи мають різну питому поверхню зерен дрібних фракцій розміром від 0,071 до 2,5 усіх названих гірських порід, за виключенням кварцового піску. Враховуючи залежність водопотреби від питомої поверхні, вміст фракцій менше 0,14 мм потрібно обмежувати при використанні вапняків. Фракційний склад потрібно визначати згідно вище наведених рекомендацій.

З погляду доступності місцевої сировинної бази, в тому числі обмеженості техногенної сировини, доцільно оцінити можливість використання металургійних шлаків та топливних зол.

Подрібленням металургійних шлаків та топливних зол можливо отримати зерна різних фракцій, включаючи і дрібняк. Так як для дорожніх бетонів рекомендують максимальний розмір зерен обмежити 20 мм. Шорсткість та пористість їхньої поверхні буде сприяти збільшенню адгезії зчеплення з цементним каменем.

Для покращення міцності зчеплення можуть бути використані рекомендації (), згідно яких заповнювачі попередньо обробляють розчином солей багатовалентних металів, наприклад, хлористого алюмінію або інших солей.

Міцність мористих заповнювачів, до яких можуть бути віднесені подріблені металургійні шлаки та топливні золи, підвищують шлаком попереднього оброблення в цементних пастах () за рахунок використання їхньої здатності до самоакумуляції. Тому міцність бетону завдяки насиченню пористих заповнювачів зростає в середньому на 5 МПа, що тільки за рахунок такого заходу можливо отримати високоміцні дорожні бетони.

Інше джерело отримання дрібних заповнювачів – дрібляк, який утворюється в результаті добування та переробітку каменю в гранітних кар'єрах. Потрібний гранулометричний склад забезпечується просіюванням на відповідних ситах та послідовного змішування залишків на ситах.

При виборі заповнювачів, в тому числі з металургійних шлаків, топливних зол або природніх кам'яних матеріалів, враховують їхній суттєвий вплив на опір бетону розтягуванню та згину. Позитивний вплив підвищується при застосуванні чистих заповнювачів із гострими і шорстуватими зернами. Міцність бетону на гравію, що можливо враховувати при використанні заповнювачів з промислових відходів. При цьому слід враховувати фактор зчеплювання поверхні із цементним каменем.

Враховуючи значну залежність структури і властивостей бетону від заповнювачів та можливість використання техногенної сировини, необхідно обмежувати вміст і глинистих домішок:

- для одношарових і верхнього шару двошарових покриттів – до 2%;
- для нижніх шарів двошарових покриттів і основ удосконалених капітальних покриттів доріг – до 3%.

Основною метою усіх методик підбору складу цементного бетону є створення такої упаковки частинок заповнювача, яка забезпечує максимальну щільність на усіх рівнях його структури і зменшенню пористості. Це дозво-

ляє покращити не тільки міцність, але і його довговічність в умовах експлуатації дорожнього та аеродромного покриттів, які працюють при одночасній дії механічних навантажень від транспорту, кліматичних факторів і рідких сольових середовищ. Особливу роль для підвищення щільності бетону відіграє співвідношення великого та дрібного заповнювачів, а також від їхнього гранулометричного складу.

Достатньо ефективною методикою підбору складів сумішей заповнювачів вважається методика, прийнята в Німеччині (рис.3.1)

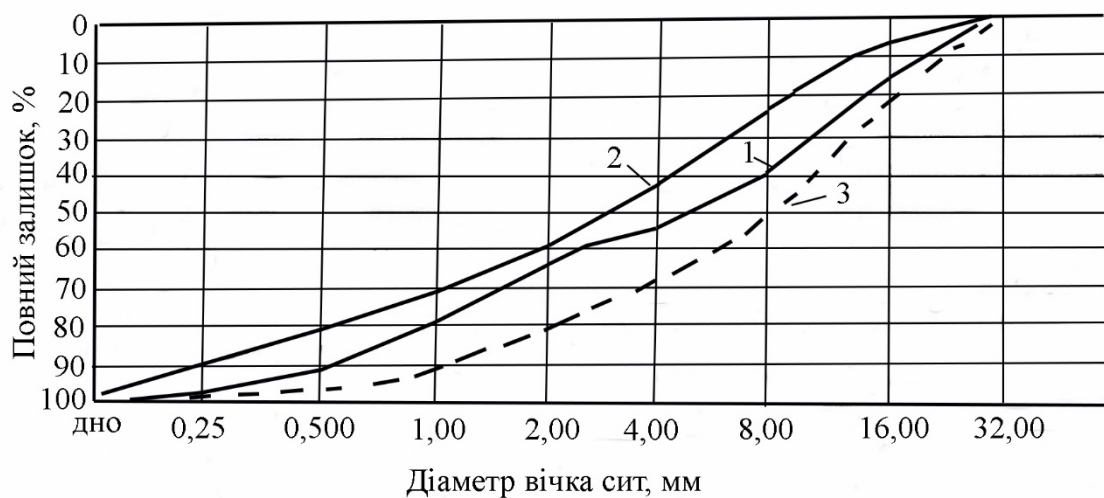


Рисунок 3.1 - Криві розсіювання при вдалому співвідношенні інертних заповнювачів: 1 – фактична крива повних залишків; 2,3 – нормативні криві

Згідно методики, запровадженої ХНАДУ, відношення кожної наступної фракції має бути 1:1, а відношення діаметрів частинок сусідніх фракцій 1:4...6. В цілому підбори складні по цим двом методикам збігаються.

Основні принципи технології та підбору складу бетонів:

- бетонні суміші укладаються в стаціонарних або пересувних опалубках за допомогою бетоноукладальних машин з легкоукладальністю Ж1...П1;
- максимальна крупність заповнювачів повинна бути не більше 16...20 мм;
- при підборі обов'язкове застосування двох фракцій щебеню;

- обов'язкове застосування пісків середньої крупності або пісків різної крупності, що забезпечує безперервну гранулометрію;
- у складі заповнювачів бажано наявність частинок розміром 0,16 мм і менше;
- обов'язкове застосування суперпластифікаторів і повітрявтягуючих добавок, що забезпечують збереження проектних показників бетонної суміші протягом технологічного періоду;
- можливе застосування мінеральних добавок і різних мікроаридуючих волокон.

Згідно положень державного стандарту.

3.4 Визначення вибору модифікуючих добавок та складу дорожнього і аеродромного цементобетонів

Традиційні складові дорожніх і аеродромних бетонів за умов потрібного вибору за якісними показниками та вмістом в бетонних сумішах мають граничний вплив на визначальні характеристики бетонів. Послідує покращення показників надають модифікуючі добавки.

Достатньо перспективними для забезпечення підвищених водо- і морозостійкості, міцності, зсувостійкості і загалом довговічності можуть бути використані:

- поверхнево-активні речовини (ПАР) з сильно пластифікуючим ефектом, а також з гідрофобною дією. Добавки мають також повітрявтягуючу дію із достатньою ефективністю при втягуванні в дорожній бетон повітря в кількості 3...5%;
- добавки, котрі підвищують гідрофобність;
- тонкомелені з гідравлічними властивостями і ефектом колоїдних систем;
- полімерні добавки, котрі полімеризуються в бетоні;

- солі неорганічних кислот, котрі прискорюють процеси гідратації і стурктуруотворення цементного каменю;
- комплексні добавки, які найчастіше в основі мають суперпластифікатор та поєднують іншої дії складові – прискорювачі або сповільнюючі тужавлення та твердіння.

Як відзначалося, головним методом підвищення усього комплексу властивостей дорожніх цементобетонів є модифікування добавками хімічної поліфункціональної дії та мінеральними унко- та ультрадисперсними речовинами.

Визначення вибору модифікуючих добавок потребує їхнього оцінювання за декількома параметрами, як ступеню впливу на властивості бетонної суміші і бетону, так і за доступністю, вартістю.

Високоміцний та довговічний дорожній і аеродромний цементобетон визначається як компактна рухлива бетонна суміш, яка укладається в конструкцію з мінімальною вібрацією або без неї. Виготовлення цементобетону являє якісну зміну в його технології. Це полягає, перш за все, в досягненні максимальної однорідності структури та властивостей бетону в усьому обсязі конструкції. Однорідність досягається винятком людського фактора, який проявляється в нерівномірному ущільненні бетонних сумішей при їх укладанні. Підвищується швидкість бетонування, знижуються вимоги до перекачування і надійно заповнюється увесь опалубочний обсяг, в тому числі виготовленні щільно армованих конструкцій дорожнього призначення.

Властивості бетонної суміші регулюють включенням до складу поліфункціональних добавок із числа водорозчинних або водорозбавочних продуктів, в тому числі і порошкоподібної форми. До їх числа відносять водорозчинні акрилові, епоксидні смоли, каучукові емульсії, поліефіри целюлози.

При виготовленні цементобетону крім традиційних інгредієнтів, що застосовуються при виготовленні класичних бетонів (цемент, мінеральні складові, добавки і вода), використовуються також дрібнозернисті домішки, мо-

дифікатори в'язкості і суперпластифікатори, що роблять можливим тривале збереження первісної рухливості цементобетону.

Дрібнозернисті домішки знижують ступінь блокування руху бетонної суміші при бетонуванні щільно армованих конструкцій. Це вапнякові порошки, мелений доменний шлак, золи виносу, кремнезистий порошок і метакаолін. Серед названих тонкодисперсних продуктів особливе місце займає метакаолін.

Важливою перевагою метакаоліну, крім доступності, є результати його впливу на властивості бетонної суміші і бетону. До моменту укладання каолинит підвищує пластичність і легкоукладальність, що дозволяє спільно з суперпластифікаторами отримувати відносно маловодні суміші. На усіх стадіях метакаолін проявляє високу водоутримуючу здатність, переведенням значної кількості води в адсорбційно-зв'язаний стан, що знижує швидкість її витрати поверхнею бетону. В результаті зменшуються усадочні явища і утворення тріщин, що призводить до зростання міцності бетону при усіх видах механічної дії. Крім того, метакаолін забезпечує заміну частини цементу. Аналогічний вплив має км'яна мука (гранітна), шлакове борошно (малокальцієве).

Кількість застосовуваних домішок залежить від загального змісту дрібнозернистих фракцій, тобто цементу, піску дрібніше 0,15 мм і в дрібнозернистих мінеральних домішок, яких в 1 м. з бетонної суміші має бути 500-550 кг в залежності від форми і максимального розміру зерен.

Модифікатори в'язкості підвищують внутрішню зв'язність самоущільнюючого бетону при його переміщенні і перешкоджають сегрегації грубого кам'яного матеріалу при високій рухливості бетонної суміші.

Важливим є також вибір суперпластифікуючих добавок. Він визначається вимогою дуже високого ефекту щодо зниження водопотреби і мінімального показника рухливості щільного бетону під час транспортування на будівництво протягом 60-90 хвилин. Дози добавок знаходяться в діапазоні від 1,6 до 1,6%. Через сильний вплив полікарбонату на зниження водопо-

треби, яке є дворазовим в порівнянні з використанням класичних пластифікаторів необхідно точне дозування води. Якщо передозування води в кількості 5 л на кубометр бетону із звичайним суперпластифікатором ще не веде до сепарації бетонної суміші, то в разі застосування полікарбонату вона починає переходити в цей стан. З цієї причини самоущільнюючі цементобетони повинні замішуватися тільки за умови точного дозування та досконального визначення вологості заповнювачів на бетонних заводах, на яких є можливість реєструвати зміни вологості у фракції 0-4 мм, а також працює відповідальний і досвідчений обслуговуючий персонал.

В цементобетоні дотриманні однакові консистенції поступово знижується доля води замішування і в одночас підвищується пластифікуючий ефект добавок. Різна ефективність окремих типів добавок викликана різними механізмами дії, за рахунок яких збільшується пластичність та рухливість бетону.

Отже, адсорбуються на поверхні цементних зерен і надають їм негативний заряд. В результаті цього цементні зерна взаємно відштовхуються і приводять в рух цементний розчин, а також мінеральні складові. Чим довше ланцюги, що створюють молекули суперпластифікатора, тим інтенсивніше це відштовхування. Ефективність пластифікації стає більш високою, а її дія автоматично продовжується. Якщо модифікатори мають найдовші молекули, тоді ефект пластифікації в даному випадку приблизно вдвічі сильніше, ніж в порівнянні з меламін або нафталінформальдегідними смолами. Тривалість пластифікаційного ефекту деяких суперпластифікаторів як мінімум в 3-4 рази, більше, ніж нафталін- або меламінформальдегідних смол.

Цементобетони, виготовлені за належно складеними рецептурами і з застосуванням якісних добавок, мають і при високій рухливості ті ж самі фізико-механічні властивості (міцність на стиск і вигин, динамічні і статичні модулі пружності та водонепроникність).

Тип добавок, що знижують потребу води, механізм пластифікаційного ефекту, область застосування окремих типів добавок для зниження водопотребу наведені раніше.

Номенклатура застосовуваних добавок дуже поширена. Актуальним напрямком в отриманні високоякісних цементних бетонів, які відрізняються більш широким діапазоном функціональних можливостей, є використання комплексних добавок, що поєднують в собі індивідуальні добавки різного функціонального призначення. Отже, високоміцний бетон не може бути отриманий без ефективних хімічних модифікаторів і, в першу чергу, без водоредукуючих домішок. В окремих випадках необхідне застосування тонко- і ультрадисперсних мінеральних добавок, наприклад, мікрокремнезема. Вплив добавок на міцність бетону залежить від їхньої гідратаційної і водоредукуючої здатності, відносно до маси цементу, температурних умов тверднення і віку бетону. В залежності від необхідної міцності бетону можуть бути застосовуватися: суперпластифікатор С-5, суперпластифікатори Stachement-2000, Siso Visco Crete S-600.

Регіональний вміст водоредукуючих повинне визначитися виходячи з досягнення максимального ефекту пластифікації, тобто досягнення мінімального значення уоефіцієнта нормальної густоти цементного тіста з врахуванням кількості води та добавки, адсорбованої поверхнею зерен заповнювача, і їхнього впливу на міцність бетону.

Усі наведені механізми дії та можливості доступу до хімічних та мінеральних модифікуючих добавок вказують що для дорожніх цементобетонів раціонально використовувати добавки системи «Релаксол» - «Релаксол Универсал Б», «Релаксол Универсал Бм», «Релаксол Супер м». мінеральні супер- або ультрадисперсними добавками можуть бути відходи камнеперероблення (гранітна мука), низькокальцієва мука металургійних шлаків, мікрокремнезем із числа відходів виробництва силуміна.

Щодо вибору гідрофобних добавок, доцільно орієнтуватися на доступний милонафт, який являється відходом газодобування і може постача-

тися українськими постачальниками широковідомі кремнійорганічні гідрофобізатори відносяться до вартісних імпортованого постачання.

Наведений склад дорожніх і аеродромних цементобетонів дещо орієнтовний і має бути в подальшому більш конкретизований.

В даний час бетонні технології спрямовані на виготовлення матеріалу «функціонального», тобто спеціального призначення не тільки за показниками міцності, але і корисність в широкому діапазоні значень – опір зношування, морозостійкість, щільність, хімічна стійкість. Завдання спрямоване на розроблення бетону із високофункціональними експлуатаційними якостями, із заданими експлуатаційними якостями.

Регулювання властивостей бетонів у відповідності до їхньої поліфункціональності відбувається завдяки цілеспрямованому використанні модифікуючих добавок у відповідності до їхньої дії.

Високоміцний бетон неможливо отримати без ефективних хімічних та мінеральних модифікаторів і в першу чергу без водоредукуючих добавок. Вплив таких добавок на міцність бетону залежить від їхньої гідратаційної та водоредукуючої здатності, вмісту в суміші, температурних умов твердіння.

Раціональний вміст водоредукуючих добавок слід визначити з урахуванням ефекту пластифікації, тобто досягнення мінімального значення коефіцієнту нормальної густини цементного тіста з урахуванням величини добавки, адсорбційної поверхні зерен заповнювачів, впливу на міцність бетону.

За результатами експериментально-теоретичних досліджень сформульовані вимоги до композиціям бетонів підвищеної легкоукладальності, в тому числі самоущільнюючих:

- об'ємне водозв'язуюче відношення має знаходитись в межах 0,8...1,1;
- загальний вміст цементу та тисперсної мінеральної складової повинно становити 160...240л;
- об'ємна концентрація тіста має бути не менше 0,4; крупного заповнювача не більше 0,5; піску в суміші заповнювачів – 7,05;

- вміст води в бетонній суміші не повинна перевищувати 200л.

найбільш радикальним напрямком розвитку бетонів являлось використання супер- та гіперпластифікаторів. Характерно, що використання таких модифікуючих добавок для бетонів міцністю 10...30 МПа, тому що об'єм цементноводної суміші був недостатній. Суперпластифікатори почали використовувати при вмісті цементу 500...600 кг/м³. За рахунок більш значного водоредукуючого ефекту та зменшення кількості води з'явилась можливість знизити витрати цементу на 10...20% при виготовленні відповідальних виробів міцністю 40...50 МПа з бездобавочними цементами на рівнорухомих сумішах. В цих варіантах економія цементу стала можливою за рахунок зниження об'єму реологічної матриці, але більш щільної, яка утворює більш високу міцність за рахунок меншої пористості.

Важливим здобутком теоретичних чинників модифікації бетонів являється положення про необхідність забезпечити потрібний об'єм реологічної матриці, тобто наявного тіста, в міжзернових прошарках зерен заповнювачів. В результаті перехід на нові види бетонів дозволили, по-перше, не тільки вагомі досягнення в області пластифікування, а, по-друге, визначення впливу найбільш активних пуцоланових добавок, наприклад, мікрокремнезем, дегідратовані каоліни, високодисперсні реакційно-активні золи-винесення ТЕЦ. Поєднання суперпластифікаторів та кам'яної тонкодисперсної муки дозволяє отримати високороботоздатні бетони, які на відміну від традиційних литих на суперпластифікаторах, показують високу текучість бетонних сумішей, низьку розшаровуваність, самоущільнення та самовільне видалення повітря.

Висока рухливість бетонних сумішей при значному водопониженні в суперпластифікованих системах забезпечується рідкотекучою реологічною сумішшю (матрицею). Роль такої матриці виконують різні суміші в залежності від зерен, між якими вони розміщуються. По відношенню до щебеню роль матриці виконує цементно-пісчана суміш. По відношенню до зерен дрібного заповнювача (піску) роль матриці відіграє цементно-водна паста, збільшити долю якої для забезпечення потрібної текучості можливо за рахунок цементу.

Але такий шлях неекономічний. Крім того, усі, навіть сильні суперпластифікатори мають низьку водоредукційну здатність по відношенню до портландцементу. Практично усі суперпластифікатори мають покращений результат по відношенню до багатьох мінеральних порошоків аюо на їхній суміші з цементом, ніж на чистому цементі.

В порівнянні з мінеральними порошками цемент являє собою нестабільні зерна, які гідратуються у воді та утворюють суперколоїдні формування відразу після контакту з водою та швидко густіють. При цьому колоїдні частки і новоутворені гелі в воді трудно диспергувати суперпластифікаторами. В сильно пластифікованих бетонних сумішах для високоміцних бетонів по відношенню до щебеню реологічною матрицею являється складна дисперсія, яка складається з піску, цементу, кам'яної муки і води.

Звідси видно, що до цементу необхідно додавати кам'яну муку і вона збільшить не тільки реологічний вплив суперпластифікатора на суміш, але, що важливо, об'єм самої реологічної матриці. В результаті надається можливість більше понизити кількість води, ніж в цементноводній матриці, підвищити щільність і збільшити міцність бетону. Тобто, добавка кам'яної муки, практично, буде рівнозначна збільшенню цементу, якщо водоредукуючий ефект буде значно вищий, ніж додавання цементу.

Важливість такої оцінки полягає не на заміні частини цементу кам'яною мукою, а в додаванні її в значно більшій мірі – до 40...60% до портландцементу. Наповнені цементи в бетонах явились новим напрямком на шляху економії цементу.

Для високоміцних бетонів важлива також реакційно-хімічна функція кам'яної муки. Поєднання реологічної активності кам'яної муки з реакційно-хімічною визначає її високу цінність у бетонах, що визначає головний критерій при виборі гірської породи. Найбільш реакційно-активними добавками являються мікрокремнезем, мікродегідратований каолін, окремі золи ТЕС.

Але це не означає, що в разі відсутності названих добавок їх може замінити спеціально сепарована мілка фракція реакційно-активної кам'яної му-

ки з питомою поверхнею 2000...3000 м²/кг.

В таблиці 3.1 наведені реологічні та водоцементуючі дії деяких суперпластифікаторів в поєднанні з мінеральними порошками.

Таблиця 3.1 - Реологічні і водоредукуючі дії суперпластифікаторів і водомінеральних систем.

№ п.п	Вид дисперсного порошку і суперпластифікатора	Дозування СП, %	Рд	Вд
1	CaCO ₃ (M150)	1,0	360...400	3,2...3,5
2	Ba CO ₃ (Melmenf)	1,0	1800...2000	5,0...6,0
3	Cr ₂ O ₃ (C-3)	1,5	1200...1500	2,7...3,0
4	Ca(OH ₂) (ЛІСГ)	0,4	5000...6000	8,0...8,5
5	Zn (C-3)	1,5	7000...7500	12,0...14,0
6	Цемент (C-3)	1,0	30...35	1,8...2,0
7	Опока (C-3)	2,0	10...12	1,1...1,2
8	Мелене скло (C-3)	1,0	14...18	1,5...1,6
9	Долміт природній (ЗМЕ)	1,0	400...500	2,8...3,0
10	Халцедон (Melflux)	0,9	1400...1600	4,8...4,6

З таблиці видно, що в портландцементях литтєвої (сильно рухливої) консистенції водоредукуючі дія (Вд) в 1,5...7,0 разів менша в порівнянні з мінеральними порошками. Для гірських порід водопониження може бути в 2...3 рази вище по відношенню до цементу.

Поєднання гідропластифікаторів з мікрокремнеземом, кам'яною мукою або золою дозволяє підняти рівень міцності при стиску до 130...150, а в деяких випадках до 180...200 МПа. Для попередження крихкого руйнування таких бетонів передбачене комплексне армування виробів стрижневою арматурою та волокнами полімерними, скляними або сталевими.

Висока міцність забезпечується не тільки мікрокремнеземом або дегідратованим каоліном, а також реакційно-активними порошками із горних порід, зола винесення на електро-фільтрах, кислих шлаків. Як підтверджено багатьма роботами (...) заміна цементу карбонатними, гранітними, кварцевими порошками до 50% суттєво підвищує водоредукуючий ефект, знижує водотверде відношення, забезпечує гравітаційне розтікання бетону, міцність якого може досягати 90...100 МПа.

Виявлено, що міцність низькомарочних бетонів з витратами цементу 230...300 кг/м³ може бути підвищена до 30...45 МПа, за рахунок додавання 100...150 кг кам'яної муки (добавка до цементу).

В разі використання комплексних модифікуючих добавок виникає необхідність надати оцінювання впливу на усі можливі властивості бетону. Необхідні для цього деякі основні, або «базові», залежності властивостей бетону від величини В/Ц або іншого «основного фактору» (який являється теж функцією В/Ц представлені в таблиці 3.2 [19]

Таблиця 3.3 - Основні залежності властивостей бетону від В/Ц.

Властивості бетону	Формула	Пояснення
Межа міцності бетону	$R_{\sigma} = \left(\frac{K \cdot R_{\text{ц}}}{\text{В/Ц}}\right)^{1,3885} = \frac{A}{(\text{В/Ц})^{1,3885}}$	К – коефіцієнт якості заповнювачів ; R _ц - активність цементу; А – приведена міцність.
Кінетика міцності	$E_r = R_{28} \exp(k(1 - (28/t))^{0,545})$	Показник кінетики міцності k= 0,33; 0,25; 0,2; 0,16, відповідно для повільного, нормального, швидкого і особливо швидкотверднучих бетонів
Морозостійкість	$F = k \cdot R_{\text{ц}} \left(\frac{\text{Ц}}{\text{В}} - b\right) = f(\frac{\text{Ц}}{\text{В}} - b)$	f – приведена морозостійкість
Водонепроникність	$W = k \cdot R_{\text{ц}} \left(\frac{\text{Ц}}{\text{В}} - b\right) = W(\frac{\text{Ц}}{\text{В}} - b)$	W – приведена водонепроникність
Усадка	$\varepsilon_{SHb} = \varepsilon_{SHc} (1 - V)^x f(\frac{\text{В}}{\text{Ц}})$ x = 1,4...1,8; f(В/Ц) = 1,98 В/Ц = 0,198	ε _{SHb} , ε _{SHc} – відповідно усадка бетону цементного каменю; V _з - об'ємна концентрація заповнювачів; f(В/Ц)- залежність усадки від В/Ц
Повзучість	$C_o = a_{cr} \cdot R \frac{x}{b}$ x = -1,04	C _o - міра повзучості; R = f(В/Ц); a _{cr} – приведена міра повзучості
Модуль пружності	$E_o = \frac{M}{1 + \frac{29}{3,8 + R_b}}$	R _b = f(В/Ц); М – приведений модуль пружності

Запропоновано також визначення оціночних показників впливу суперпластифікаторів або вміщуючих суперпластифікатори поліфункціональних добавок на властивості бетонних сумішей і бетонів шляхом використання системи критеріїв (табл.3.3) [19].

Таблиця 3.3 - Критерії оцінювання ефективності добавок.

№ п.п	Критерії	Визначення	Сутність
1	Показник водопонижувачого (водоредукуючого) ефекту	$\Delta B = \frac{B_o - B_{sp}}{B_o}, \%$	Зменшення водовмісту суміші відносно первічного при незмінній консистенції (рівній рухливості) суміші
2	Показник текучості суміші	$t = \frac{D}{d^{(B/Ц)}}$	Діаметр розтікання при дозуванні СП 1%
3	Показник потенційного підвищення міцності бетону за рахунок зниження величини в/ц	$Z = \left(\frac{(B/Ц)_{супер}}{B/Ц}\right)^{-1,385}$	Можливе підвищення межі міцності цементного каменю (бетону) за рахунок зниження в/ц при включенні суперпластифікатора
4	Показник гідратаційної активності цементу в присутності суперпластифікатора	$K = \frac{(A_c)_{супер}}{(A_c)_o}$	Зміна міцності каменю, виготовленого із суміші з СП, при незмінній відносно еталонного складу величини В/Ц
5	Показник реального підвищення міцності при СП в рівнорухливих сумішах	$C = ZK$	Фактичне підвищення міцності бетонів, отриманих із рівнорухливих сумішей з використанням суперпластифікатора
6	Показник впливу суперпластифікатора на деформацію усадки	$S = \frac{\varepsilon_{sh}}{(\varepsilon_{sh})_o}$	Величина підвищення або пониження деформацій в рівноскладових бетонах в результаті використання суперпластифікатора
7	Показник впливу суперпластифікатора на деформацію повзучості	$C_r = \frac{(C_o)_{супер}}{(C_o)_E}$	Зміна характеристики повзучості в рівноміцних бетонах
8	Показник впливу суперпластифікатора на модуль пружності	$e = \frac{M_{супер}}{M_o}$	Зміна модуля пружності при використанні СП в рівноскладових бетонах
9	Показник сповільнення і прискорення міцності	$K_T = \frac{\tau_{супер}}{\tau_o}$ $K_y = \frac{1}{R_T}$	$\tau_{суп}$ – час набиття пластифікованою сумішшю добової міцності контролюючий склад; τ_e – час формування добової міцності контролю
10	Показник кінетики міцності	$k = \frac{\ln \frac{R_c}{R_{28}}}{1 - \left(\frac{28}{\tau}\right)^{0,545}}$	Характеристика кривизни кривої наростання міцності бетону в часі

Дії оцінювання ефективності впливу добавки на зміну рухливості бетонної суміші можливо використати кількісне оцінювання на водовміст з урахуванням рухливості суміші при раціональному дозуванні добавки:

$$B = (НГ \cdot Ц + W_n \cdot П \cdot S_n + W_{щ} \cdot Щ + W_d \cdot D + a \cdot O \cdot K) \Delta B,$$

НГ- нормальна густина цементу (0,24...0,27);

W_n - питома водопотреба піску (орієнтовно 0,04);

S – питома поверхня піску (70...250 см²/г);

$W_{щ}$ - водопотреба щебеню (0,015...0,03);

W_d – водопотреба мінеральної добавки (0,15...0,22);

Ц, П, Щ, D – відповідно витрати цементу, піску, щебеню, мінеральної добавки (золи-винесення і т.п.), кг/м³;

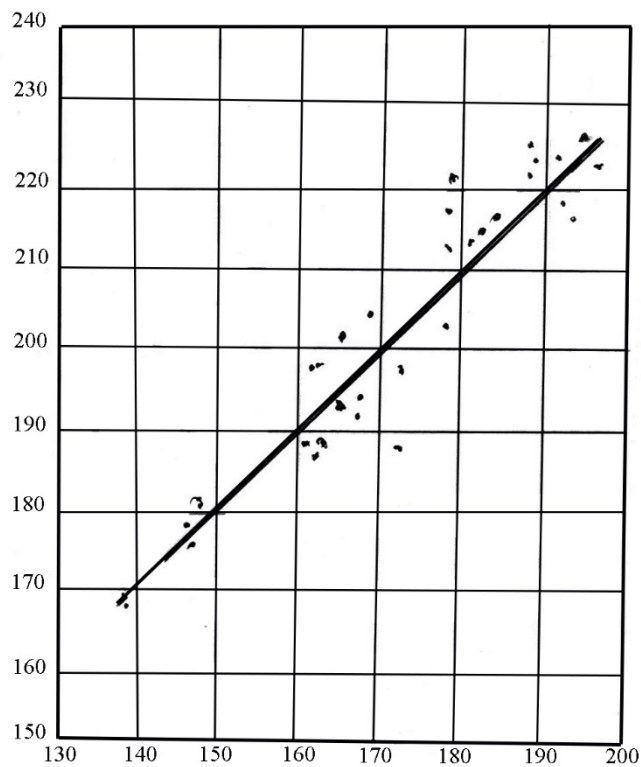
O.K. – потрібне осідання конусу, см (O.K. > 8 см);

d, ΔB – критерії ефективності добавки (табл.дані 3.4) [19].

Таблиця 3.4 - Критерії ефективності добавки

Критерії	Величина критерію для добавки			
	-	СП	Д11	ИСП-10
d	5,83	4,26...4,57	4,30	4,13
ΔB	1	0,787...0,8	0,796	0,78

Водопотребу мінеральних добавок можливо визначити згідно залежності рисунка 3.2



Взаємозв'язок витрат води і водопотреби сумішей мінеральних компонентів.

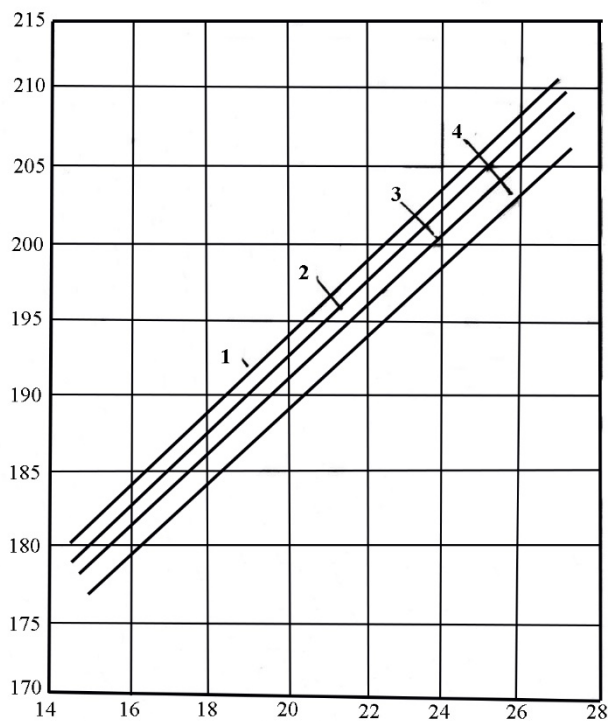


Рисунок 3.3 - Залежність водопотреби бетонної суміші від потрібної рухливості бетонної суміші та виду добавки: 1 – СП-3, СП-1Вп; 2 – Д11; 3 – 13Ф; 4 – С-3.

Як результат оцінювання ефективності складових, в таблиці 3.5 наведені деякі можливі склади цементобетонів.

Таблиця 3.5 – Склад модифікованих дорожніх і аеродромних цементобетонів.

№ п. п	Найменування компоненту	Од. вим.	Вміст компоненту в складі бетону, варіант									
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Портландцемент 11/А-400-Ш	кг	370	370	370	370	370	370	370	370	370	370
2	Вода замішування	л										
3	Дрібний заповнювач	кг	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450
4	Щебінь	кг	105 0	105 0	105 0	105 0	105 0	105 0	105 0	105 0	105 0	105 0
5	Кам'яна мука	кг	80	80	80	-	-	-	-	-	-	-
6	Мука металургійних шлаків	кг	-	-	-	-	-	-	-	90	90	90
7	Мікрокремнезем	кг	-	-	-	60	60	60	60	-	-	-
8	«Релаксол Универсал Б»	%	1,2- 1,8	1,2- 1,8	1,2- 1,8	1,2- 1,8	-	-	-	-	-	-
9	«Релаксол Универсал Бм»	%	3,0- 4,0	-	-	-	3,5	3,5	3,5	-	-	-
10	«Релаксор Супер»	%	0,6- 1,0	-	-	-	-	-	-	0,8	0,8	0,8
11	Милонафт	%	1,0	1,0	1,0	-	-	-	-	1,0	1,0	1,0

Усі наведені результати аналізів та їхнього оцінювання чітко показують, що сучасні теоретичні та практичні здобутки дозволяють цілеспрямовано регулювати склад та технології дорожніх і аеродромних бетонів. Як слідує, експлуатаційні характеристики здатні забезпечити довговічності і надійності покриттів.

ВИСНОВКИ

1. Інтенсифікація дорожнього та аеродромного руху, а також розширення масштабів будівництва шляхів сполучення потребують ефективних матеріалів для покриття дорожнього і аеродромного одягу. Порівняний аналіз показує певні переваги цементобетонів у порівнянні з асфальтобетонами за рахунок більшої довговічності в умовах експлуатаційних та кліматичних впливів, доступності сировини, спрощеності виконання робіт.

2. Головні тенденції вдосконалення сучасних цементобетонів пов'язані із здатністю складових, в першу чергу модифікуючи добавок, надавати матеріалу покращення структури та властивостей і попереджувати негативний вплив зовнішніх факторів.

3. Виявлені залежності властивостей від модифікуючи добавок та інших складових надають можливість отримувати дорожні і аеродромні цементобетони підвищених експлуатаційних характеристик і вказують напрямки подальшої їхнього вдосконалення.

4. Для практичного використання можуть бути виготовленні бетони з використанням відповідних модифікуючих добавок системи «Релаксол», кам'яної муки, продуктів тонкого очищення підходящих газів від пилу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДБН БВ.2.3-4:2015. Автомобільні дороги. Частина 1. Проектування. Частина II. Будівництво. Київ:2015. 104 с.
2. Грушко И.М., Борщ И.М., Королев И.В., Мищенко Г.М. Дорожно-строительные материалы: учебник. Москва, Транспорт, 1991, 357 с.
3. Баженов Ю.М. Технология бетона. Издательство высших учебных заведений. Москва: 2002. 500с.
4. Кривенко П.В., Пушкарева К.К., Барановський П.Б. та інші. Будівельне матеріалознавство: підручник. Київ: ТОВ УВПК «ЕКСОБ», 2014. 704 с.
5. Дворкин Л.И., Соломатов В.И., Выровой В.Н., Чудновский С.М. Цементные бетоны с минераловатными наполнителями. Монография. Киев: Будивельник, 1991. 137с.
6. ДСТУ БВ.2.7.-46-2010 Цементи загально будівельного призначення. Технічні умови. Київ. 2010. 75с.
7. Мішутін А.В., Кровяков П.В., Просторапавлов А.О. Застосування пористих заповнювачів у бетонах для транспортних споруд. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. Вип. 98, 2016. с. 145-155.
8. Шургин А.Г., Чиженко Н.П., Высокопрочный бетон в дорожном строительстве. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. Вип. 96, 2016, с. 43-49.
9. Дворкін Л.И., Боженко М.К. Властивості дрібнозернистих бетонів з дисперсним гранітним наповнювачем. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. Вип. 96, 2016, с. 11-16.
10. Дворкін Л.И., Дворкін О.Л. Основи бетонознавства: Монографія. Київ: Основи. 2007. 616 с.
11. Редкозуб А.А. Управление процессами Контактобразования – гарантия долговечности цементных бетонов. Автомобильные дороги и дорож-

ное строительство. Вып. 100. 2017. с. 77-84.

12. Возний С.П. Аналіз впливу гідрофобних добавок на міцність дорожнього цементобетону. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. Вип. 99, 2017, с. 39-48.

13. Гамоляк І.П., Шурган А.Г. та ін. Порівняння сучасних добавок високоякісних дорожніх бетонів. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. Вип. 92. 2014. с. 38-49.

14. Толмачев С.Н. Эффективность добавок системы «Релаксол» в дорожных цементных бетонах. Химические и минеральные добавки в бетонах. Харьков: «Колорит». 2005. с. 222-229.

15. Демьянова В.С., Баженов Ю.М., Калашников В.И. Модифицированные высококачественные бетоны: Монография: издательство АВС. 2006. 318 с.

16. Батраков В.Г. Модифицированные бетоны: Монография: Стройиздат. 1998. 768 с.

17. Ребиндер П.А. Поверхностные явления в дисперсных системах. Коллоидная химия: избранные труды. Москва: Наука. 1978. 368 с.

18. Калашников В.И. Самоуплотняющийся высокопрочный бетон. Современные бетоны. Запорожье: «Будиндустриал ЛТД». 2007. с. 30-40.

19. Степанов В.Ф., Розенталь Н.К., Башлыков Н.Ф. Комплексные полифункциональные добавки – основа качества и долговечности бетона. Современные бетоны. Запорожье: ООО «Будиндустрия ЛТД». 2007. с. 59-71.

20. Ушеров-Маршак А.В. Повышение роли добавок в бетон как результат технологического мышления. Химические и минеральные добавки в бетон. Харьков: «Колорит». 2005. с. 19-22.

21. Ушеров-Маршак А.В. Химические добавки в бетон. Химические и минеральные добавки в бетон. Харьков «колорит» 2005 24-39 с.

22. Шурган А.Г., Чиженок Н.П. Оцінка тріщиностійкості модифікованого дорожнього бетону. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. 2015. Вип 97. с. 21-25.

23. Чиженко Н.П. Оцінка тріщиностійкості модифікованого дорожнього бетону. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. Вип. 97, 2016, с. 21-25 .
24. Дворкін Л.И., Марчук В.В., Фурсова М.О. Розрахунок складів дорожніх бетонів заданою морозостійкістю. Вип. 97. 2016. 8 с.
25. Дерягин Б.В., Кротева И.А. Адгезия: Монография. Москва: изд. АН СССР. 1949. 244 с.
26. ДСТУ БВ.2.7-35-95 Щебінь, пісок та щебнево-пісчана суміш з доменних та сталеплавильних шлаків для загально будівельних робіт. Технічні умови. Київ. 1995. 465 с.
27. ДСТУ БВ.2.7-6597. Добавки для бетонів і будівельних розчинів. Класифікація. Київ. 1997. 785 с
28. EN 206-1 Бетон- свойства, определения и критерии соответствия.
29. EN 934-2 Добавки в бетоны. Определения и требования.