

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ “ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА”**

На правах рукопису

СТЕЧИШИН МИХАЙЛО СТЕПАНОВИЧ

УДК 691.328.4

**САМОУЩІЛЬНЮВАНІ БЕТОНИ
АРМОВАНІ ДИСПЕРСНИМИ ВОЛОКНАМИ**
05.23.05 – будівельні матеріали та вироби

Дисертація на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Науковий керівник:

Саницький Мирослав Андрійович
доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри будівельного
виробництва

Ідентичність всіх примірників дисертації
ЗАСВІДЧУЮ:
Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради _____/П.Ф. Холод/

Львів-2016

ЗМІСТ

ВСТУП		3
РОЗДІЛ 1. СТАН НАУКОВОЇ РОЗРОБКИ ТЕМИ ТА ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ДОСЛІДЖЕНЬ		11
1.1	Сучасні тенденції виробництва та застосування самоущільнювальних бетонів.....	11
1.2.	Підвищення тріщиностійкості бетонів за рахунок дисперсного армування.....	20
1.3.	Фізико-хімічні основи модифікування властивостей фібробетонів	31
1.4.	Теоретичні передумови досліджень наукова гіпотеза.....	38
РОЗДІЛ 2. ХАРАКТЕРИСТИКА ВИХІДНИХ МАТЕРІАЛІВ ТА МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕНЬ		40
2.1.	Характеристика вихідних матеріалів.....	40
2.2.	Фізико-механічні випробування.....	49
2.3.	Фізико-хімічні методи дослідження.....	55
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА САМОУЩІЛЬНЮВАЛЬНИХ ДИСПЕРСНО-АРМОВАНИХ БЕТОНІВ		57
3.1.	Вплив хімічних модифікаторів та мінеральних добавок на властивості цементуючих систем, армованих базальтовою фіброю.....	57
3.2.	Оптимізація складу самоущільнювальних дисперсно-армованих бетонів.....	73
3.3.	Структурутворення самоущільнювальних дисперсно-армованих бетонів.....	85
3.4.	Технологічні властивості самоущільнювальних дисперсно-армованих бетонів.....	90
	Висновки	101

РОЗДІЛ 4 РОЗРОБКА ТА ОПТИМІЗАЦІЯ СКЛАДІВ	104
ВИСОКОНАПОВНЕНИХ САМОУЩІЛЬНЮВАЛЬНИХ	
ДИСПЕРСНО-АРМОВАНИХ БЕТОНІВ.....	
4.1. Дослідження впливу золи-винесення на властивості в'язучих систем	105
4.2 Проектування складів самоущільнювальних бетонів з високим вмістом золи-инесення.....	110
4.3 Будівельно-технічні властивості самоущільнювальних бетонів з високим вмістом золи винесення.....	118
4.3.1 Технологічні властивості фіброармованих самоущільнювальних бетонів з високим вмістом золи винесення.....	118
4.3.2 Міцнісні характеристики	120
4.3.3 Параметри порової структури	123
4.3.4. Водонепроникність.....	125
4.3.5. Корозійна стійкість.....	125
4.3.6. Деформативні властивості бетону під навантаженням.....	126
4.3.7. Стійкість до стирання.....	130
Висновки	134
РОЗДІЛ 5 ПРОМИСЛОВЕ ВПРОВАДЖЕННЯ	
САМОУЩІЛЬНЮВАНИХ БЕТОНІВ, АРМОВАНИХ	
ДИСПЕРСНИМИ ВОЛОКНАМИ.....	136
5.1 Промислова апробація самоущільнювальних дисперсно-армованих бетонів при бетонуванні промислових підлог...	136
5.2 Техніко-економічні показники самоущільнювальних дисперсно-армованих бетонів.....	141
Висновки	142
Загальні висновки	143
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	146
ДОДАТКИ	163

ВСТУП

У сучасному інноваційному будівництві, при реставрації і підсиленні конструкцій розширюється використання бетонів нового покоління, одержаних з самоущільнювальних бетонних сумішей (Self-Compacting Concrete – SCC), особливістю яких є здатність ущільнюватися без механічного впливу, заповнювати форми під дією власної ваги без вібрації і сегрегації при самочинному виділенні повітря, в т.ч. в густоармованих конструкціях, що передбачає максимальне уникнення трудомістких, енергозатратних операцій їх вкладання та ущільнення, покращення санітарно-гігієнічних умов праці, а також забезпечення високої якості поверхні конструкції після розпалубки. Разом з тим, відносно високий вміст портландцементу, що генерує більше теплоти гідратації, та додаткових цементуючих матеріалів з високими темпами пуцоланової активності у ранньому віці та менший вміст крупного заповнювача може призвести до надлишкових деформацій усадки. Крім цього, особливістю високоміцних бетонів є їх низька ударна міцність, зростаюча чутливість до тріщиноутворення та крихкість, що проявляється в зниженні пластичних деформацій у бетоні під навантаженням, що представляє загрозу безпечної експлуатації і надійності будівель та споруд при перевищенні розрахункових навантажень в стиснутих елементах.

Ефективним методом підвищення міцності на розтяг і згин, зниження крихкості та зростання тріщиностійкості бетонів є дисперсне армування різними видами волокон – сталевими, скляними, базальтовими, целюлозними, синтетичними, вуглецевими й ін. Перспективним є використання базальтової фібри, враховуючи її нижчу вартість, високий модуль пружності та хімічну стійкість, а також поширення покладів базальту в Україні. Проте при традиційному дисперсному армуванні вирішується задача гальмування тріщин тільки одного структурного рівня, в той час як

ієрархія тріщиноутворення та сукупності тріщин свідчить про присутність у бетоні дефектів різних розмірів і структурних рівнів матеріалу.

Узагальнення результатів досліджень в області будівельного матеріалознавства свідчить, що створення високотехнологічних бетонів з покращеними експлуатаційними властивостями, збільшення їх життєвого циклу, вирішується за рахунок використання цементуючих систем та багаторівневого модифікування структури композиту різномасштабними армувальними елементами на декількох структурних рівнях – добавками різного функціонального призначення в поєднанні з армувальними базальтовими волокнами.

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

Дисертація виконана в межах держбюджетних науково-дослідних робіт „Розроблення малоенерговмісних полікомпонентних цементуючих матеріалів для високофункціональних будівельних розчинів та бетонів” (номер держреєстрації 0113U001370) та „Основи технології створення енергозберігаючих мультимодальних композиційних цементів та бетонів поліфункціонального призначення на їх основі” (номер держреєстрації 0113U001370) відповідно до тематичного плану Міністерства освіти і науки України. У зазначених роботах автор був виконавцем.

Мета роботи і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи розроблення самоущільнювальних бетонів з покращеними експлуатаційними властивостями шляхом багаторівневого дисперсного армування їх структури на макрорівні базальтовими волокнами, а на мікрорівні добавками різного функціонального призначення, оптимізація складів самоущільнювальних дисперсноармованих бетонів, дослідження процесів їх структуроутворення та будівельно-технічних властивостей, в т.ч. при твердненні в різних температурних умовах.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- виконати експериментальні дослідження впливу, мінеральних добавок, суперпластифікатора та армувальних базальтових волокон на властивості високорухливих цементуючих систем;
- встановити фізико-хімічні особливості гідrataції цементуючої матриці самоущільнювальних бетонів, армованих дисперсними базальтовими волокнами;
- на основі комплексного аналізу одержаних математичних моделей за критеріями легковкладальності та міцності запроектувати ефективні склади самоущільнювальних бетонів, армованих базальтовими волокнами;
- дослідити реологічні властивості самоущільнювальних сумішей та будівельно-технічні характеристики бетонів, армованих базальтовою фіброю, в т. ч. при твердненні у різних температурних умовах;
- встановити можливість одержання самоущільнювальних дисперсноармованих бетонів з високим вмістом золи-винесення;
- провести практичну апробацію розроблених самоущільнюваних бетонів, армованих базальтовою фіброю, та обґрунтувати їх техніко-економічну ефективність.

Об'єктом дослідження є процеси регулювання технологічних властивостей самоущільнювальних бетонних сумішей та направленої багаторівневого армування структури бетону мінеральними волокнами і функціональними добавками.

Предметом дослідження є самоущільнювальні бетони, армовані дисперсними базальтовими волокнами, з високими будівельно-технічними та експлуатаційними властивостями.

Методи дослідження. Виконання експериментальних результатів проведено із застосуванням комплексу сучасних методів фізико-хімічного аналізу, зокрема рентгенівської дифрактометрії, растрової електронної мікроскопії, диференційно-термічного аналізу. Визначення фізичних, фізико-механічних та будівельно-технічних властивостей цементуючих систем та самоущільнювальних дисперсно-армованих бетонів на їх основі проведено

згідно з діючими нормативними документами і загальноприйнятими методиками. Реологічні властивості бетонних сумішей досліджено за спеціальними методами випробувань самоущільнювальних сумішей. Оптимізацію самоущільнювальних бетонів, армованих дисперсними базальтовими волокнами, проведено із застосуванням експериментально-статистичних методів планування експерименту.

Наукова новизна одержаних результатів:

- теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено можливість одержання високоміцних самоущільнювальних бетонів з покращеними будівельно-технічними властивостями за рахунок системного поєднання комплексних хімічних добавок, ультрадисперсних активних мінеральних добавок та модифікованих базальтових волокон, з врахуванням специфіки індивідуального впливу і механізму структуроутворювальної дії кожного компоненту на реологічні та фізико-механічні властивості;
- розроблена модель багаторівневого дисперсного армування кожного масштабного рівня структури самоущільнювального бетону: на макрорівні – базальтовим волокном, на мікрорівні – за рахунок утворення волокнисто-голчастих субмікроармувальних новоутворень кристалогідратів, які підвищують опір руйнуванню при реалізації явища «самомікроармування»;
- подальшого розвитку набули закономірності структуроутворення дисперсно-армованих бетонів на основі самоармованих цементуючих систем за рахунок прискорення гідратаційних процесів, ущільнення неклінкерної частини цементної матриці, підвищення усадочної тріщиностійкості шляхом введення ультрадисперсних алюмосилікатних добавок з утворенням голчастих кристалів еtringіту і кольматації пор гексагональними кристалами портландиту, гідроалюмінатів та гідрокарбоалюмінатів кальцію;
- отримано комплекс експериментально-статистичних моделей технологічних, будівельно-технічних показників фіброармованих самоущільнювальних бетонів з високим вмістом золи-винесення.

Практичне значення одержаних результатів:

- розроблено ефективні склади самоущільнювальних бетонів, армованих базальтовими волокнами, впровадження яких при безвібраційній технології бетонування та вирішенні завдань підвищення показників тріщиностійкості забезпечить скорочення виробничого циклу, збільшення оборотності опалубки, підвищення продуктивності праці, прискорення зведення монолітних будівель і споруд, підвищення довговічності конструкцій в різних, в т. ч. екстремальних умовах експлуатації;

- здійснено апробацію високоміцних самоущільнювальних бетонів, армованих дисперсною базальтовою фіброю, для промислової підлоги на ТзОВ „Блюм Україна” (с. Пасіки Зубрицькі Львівська обл.) з вирішенням завдання одержання необхідних технологічних властивостей бетонної суміші та міцнісних характеристик бетону в умовах знакозмінних та від’ємних температур;

- розроблені оптимальні склади високонаповнених самоущільнювальних бетонів, армованих дисперсними базальтовими волокнами, використано для бетонування промислової підлоги на ТзОВ “Спільне українсько-польське підприємство РАВТРАНС” по вул. Коновальця, 27 (м. Рава-Руська). При цьому вирішено технологічні завдання забезпечення рухливості та однорідності суміші при безвібраційній технології бетонування, а також необхідної міцності та стиранності самоущільнювального бетону.

Особистий внесок здобувача полягає в проведенні експериментальних досліджень, інтерпретації одержаних даних, впровадженні результатів роботи у виробництво та відображено в наукових роботах:

1. Кіракевич І. І. Самоущільнювальні бетони зі швидким наростанням міцності / І. І. Кіракевич, У. Д. Марущак, М. А. Саницький, М. С. Стечишин // Вісник НУ «Львівська політехніка». Теорія і практика будівництва. – Львів, 2012. – № 737. – С. 153-158 – оптимізовано склади

самоущільнювальних бетонів з швидким наростанням міцності на основі суперпластифікованих цементуючих систем.

2. Стечишин М. С. Розробка високофункціональних самоущільнюваних бетонів, армованих базальтовим волокном / М. С. Стечишин, Г. Я. Шевчук, О. П. Гнип // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. Одеса, 2013. – № 52 – С. 237-242 – здійснено оптимізацію складів дисперсноармованих самоущільнюваних бетонів з використанням полікарбосилатного пластифікатора та метакаоліну.

3. Poznyak O. R. Properties of self-compacting concrete with basalt fiber / O. R. Poznyak, I. I. Kirakevych, M. S. Stechyshyn // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. “Теорія і практика будівництва”. – 2014. – №781. - С. 149-153 – проведено дослідження реологічних властивостей фіброармованих самоущільнювальних бетонних сумішей з добавками модифікаторів і мікронаповнювачів та експлуатаційних характеристик бетонів на їх основі.

4. Високоміцні самоущільнювальні бетони на основі дисперсно-армованих цементуючих систем / [М. А. Саницький, У. Д. Марущак, І. І. Кіракевич, М. С. Стечишин] // Будівельні матеріали і виробы, 2015. – № 1. – С. 6-9 – досліджено особливості структуроутворення самоармованих цементуючих систем та кінетику набору міцності фібробетонів на їх основі.

5. Stechyshyn M. Durability properties of high volume fly ash self-compacting fiber reinforced concretes / M. Stechyshyn, M. Sanytskyu, O. Poznyak // East European Journal of Enterprise Technologies. – 2015. – 3/11(75). – P. 49-53 – вивчено фізико-механічні властивості самоущільнювальних бетонів з високим вмістом золи винесення, армованих базальтовим волокном.

6. Стечишин М. С. Оптимізація складів самоущільнюваних бетонів / М. С. Стечишин, І. І. Кіракевич // Геодезія, архітектура та будівництво (GAC-2011): IV Міжнар. конф. молодих вчених. – Львів, 2011. –

С. 112-113 – проведено оптимізацію складів самоущільнюваних бетонів за критерієм легковкладальності та міцності.

7. Stechyschyn M. Evaluation of Basalt Fiber for Strength Self-Compacting Concrete / M. Stechyschyn // 5th International Academic Conference of Young Scientists "Geodesy, Architecture and Construction 2013" (GAC-2013). – Lviv, 2013. – P. 104-105 – встановлено вплив базальтового волокна на властивості цементуючих систем для самоущільнювальних бетонів.

8. Стечишин М. С. Самоуплотняющийся фибробетон / М. С. Стечишин, О. Р. Позняк // Сборник научных трудов Sworld по материалам международной научно-практической конференции. – 2014. – Т. 39. – № 2. – С. 45–49 – досліджено реологічні властивості фіброармованих самоущільнювальних бетонних сумішей, а також фізико-механічні та деформативні характеристики бетонів на їх основі.

9. Позняк О. Р. Самоущільнювальний бетон, армований базальтовою фіброю / О. Р. Позняк, М. С. Стечишин // Матеріали науково-практичної конференції «Визначення вартості об'єктів будівництва, проектних, будівельно-монтажних та ремонтно-будівельних робіт із застосуванням сучасних технологій і матеріалів. Ціноутворення, управління та документообіг у будівництві – 2014». – Івано-Франківськ, 2014. – С. 47 – вивчено будівельно-технічні властивості самоущільнювального бетону, армованого базальтовою фіброю.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на конференціях: IV, V Міжнародній конференції молодих вчених GAC “Геодезія, архітектура та будівництво” (Львів, 2011; 2013); Міжнародній конференції до 70-річчя від дня народження заслуженого діяча науки і техніки України, д.т.н., проф. Вирового В.М. (Одеса, 2013); Міжнародній науково-технічній конференції “Новітні технології використання цеолітових туфів в промисловості” (Львів, 2014); науково-практичній конференції “Визначення вартості об'єктів будівництва, проектних, будівельно-монтажних та ремонтно-будівельних

робіт із застосуванням сучасних технологій і матеріалів” (Івано-Франківськ, 2014) та на конференціях професорсько-викладацького складу Національного університету “Львівська політехніка” 2011-2015 рр.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 9 наукових праць, з них 4 статті у фахових науково-технічних виданнях України, 1 стаття у наукометричному періодичному виданні, 4 публікації у матеріалах вітчизняних та міжнародних конференцій.

Структура та обсяг роботи. Основна частина дисертаційної роботи викладена на 120 сторінках друкованого тексту і складається із вступу, п’яти розділів та загальних висновків. Повний обсяг дисертації становить 161 сторінка і включає 31 таблицю на 29 сторінках, 61 рисунок на 35 сторінках, список використаних джерел із 154 найменувань на 17 сторінках та 4 додатків на 12 сторінках.

РОЗДІЛ 1

СТАН НАУКОВОЇ РОЗРОБКИ ТЕМИ ТА ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1. Сучасні тенденції виробництва та застосування самоущільнювальних бетонів

Бетон все ширше використовується в житловому, промисловому, транспортному, гідротехнічному, енергетичному та інших видах будівництва, дає новий імпульс для створення гібридних, шаруватих, тонкостінних, профільних та інших видів будівельних конструкцій нового покоління [35, 102]. Жорсткі вимоги щодо безпеки будинків і споруд призвели до необхідності підвищення показників фізико-механічних властивостей і довговічності конструкційних бетонів, застосовуваних при будівництві, реконструкції й ремонті будівельних об'єктів [5, 42]. Однією з найголовніших проблем розроблення та впровадження нових конструкційних матеріалів є забезпечення їх високої технологічності, що передбачає максимальне уникнення трудомістких операцій при спорудженні будівельних об'єктів, і забезпечення широкого спектру функціональних можливостей, а також властивостей, які окреслюють довговічність будівельних конструкцій в умовах експлуатації, при мінімальних енергетичних та матеріальних затратах і пов'язано з реалізацією пріоритетних напрямків стратегії збалансованого розвитку (Sustainability Development) [95, 154], концепції “життєвого циклу” (Life Cycle Approach) будівельних конструкцій [105, 124] та найкращих доступних технологій (BAT – Best Available Techniques) [116, 119].

У зв'язку з цим, у сучасному інноваційному будівництві постійно розширюється використання конструкційних бетонів нової генерації, одержаних з високотехнологічних сумішей з осадкою конуса 22-28 см, а також самоущільнювальних бетонних сумішей (Self-Compacting Concrete – SCC), особливістю яких є здатність ущільнюватися без механічного впливу,

заповнювати форми під дією власної ваги без вібрації і сегрегації при самочинному видаленні повітря, в т.ч. в густоармованих конструкціях, що передбачає максимальне уникнення трудомістких, енергозатратних операцій їх вкладання та ущільнення, а також забезпечення високої якості поверхні конструкції після розпалублення [121, 130]. Крім цього, до переваг самоущільнювального бетону відносять скорочення часу будівництва та вартості робочої сили; зниження рівня шуму; зміцнення перехідної зони між цементною матрицею та заповнювачем або арматурою; зменшення проникності і поліпшення довговічності бетону [101, 149].

Тенденція масового застосування в світовій будівельній практиці бетонів нової генерації з високими експлуатаційними і технологічними властивостями, зокрема самоущільнювальних, викликана зростаючою необхідністю суспільства в унікальних і надійних інженерних конструкціях та основана на значних досягненнях будівельної науки й технології [116, 134]. Впровадження технології самоущільнювального бетону надає нові можливості в капітальному будівництві та реалізацію цілого ряду унікальних проектів в різних країнах світу, зокрема великопрольотних мостів, платформ для нафтовидобутку в морях і океанічних шельфах, резервуарів для зберігання газів і рідин, покриттів доріг і аеродромів, захисних елементів [50, 144]. Застосування самоущільнювальних бетонів у будівництві особливо ефективно в зонах обмеженого доступу, де вібраційне ущільнення утруднене, а також в комбінованих сталобетонних конструкціях складної геометрії [121]. Перспективним також є їх використання для виробництва збірного залізобетону, монолітних високоміцних безшовних підлог, торкрет-бетонування, реставрації та підсилення конструкцій [124].

Технології створення бетонів нової генерації базуються на нових принципах та засадах, котрі формуються на основі вивчення процесів, що відбуваються на всіх рівнях структури бетонів. Концепція самоущільнювальних бетонів сформульована в кінці 20 ст. Х. Окамура (Японія) і передбачає підбір якісних компонентів, проектування складу мультифракційних заповнювачів, введення в бетонну суміш мікро- і

ультрадисперсних наповнювачів, створення нових видів хімічних модифікаторів для управління реологією особливо високорухливих однорідних сумішей з неодмінною умовою прискореного набору міцності в ранні терміни, підвищення міцності та довговічності матеріалу [130, 131]. У той же час, факторами, які ускладнюють використання литих бетонів, виготовлених за традиційною технологією, є значне водо- та розчинувідділення, невисока життєздатність бетонних сумішей, понижена морозостійкість та високі деформації усадки бетону порівняно із бетонами на основі сумішей нижчої рухливості [1, 19, 135].

За даними [150] бетонна суміш самоущільнювального бетону характеризується низьким водоцементним відношенням 0,38–0,4 при досягненні високого показника рухливості, який визначається за розпливанням стандартного конуса і становить 550–850 мм. Згідно з EN 12789 самоущільнювальні бетонні суміші за рухливістю класифікують на марки SF1 (550–650 мм), SF2 (660–750 мм) та SF3 (760–850 мм). Необхідна легковкладальність бетонної суміші залежить від типу конструкції, методів тверднення, складності опалубки, кількості структурних деталей конструкції, ступеня армування [144].

При оцінці основних реологічних властивостей самоущільнювальних бетонних сумішей на практиці користуються показниками стабільності, здатності до заповнення і долаючої здатності, що забезпечують їх унікальність та відрізняє від традиційних сумішей [135]. Здатність до заповнення – властивість, яка визначає, як швидко самоущільнювальна бетонна суміш переміщається під власною вагою і повністю заповнює простір з перешкодами, такими як арматура, без втрати стійкості. Долаюча здатність характеризує здатність суміші проходити через арматурні стержні та охоплювати їх (інкапсуляція) без застосування зовнішньої енергії.

J.A. Daczko та ін. [106] вважають, що стабільність є найбільш важливою реологічною характеристикою для успішного застосування технологій самоущільнювального бетону. Розрізняють динамічну (здатність зберігати однорідність розподілу всіх складових матеріалів, протистояти їх

сегрегації та захопленню повітря під дією будь-якого виду енергії вібрації в системі під час транспортування і укладання матеріалу) та статичну стабільність (здатність протистояти водовідділенню і сегрегації після вкладання сумішей під впливом сили тяжіння з часом) [143].

Нестабільність бетонної суміші може призвести до диференціального накопичення легших компонентів (цементно-піщаного розчину) у верхній частині та крупного заповнювача в нижній частині бетонної конструкції [151]. За неоднорідності розподілу заповнювача може послаблюватися взаємодія між заповнювачем та цементною матрицею, а також між арматурою та бетоном [99]. Сегрегована самоущільнювальна бетонна суміш характеризується вищим ризиком до тріщиноутворення порівняно з однорідною сумішшю, що зумовлено більшою концентрацією цементного тіста, яке є чутливішим до усадки, у верхніх шарах конструкції. Дослідженнями D.K. Panesar, B. Shindman показано [133], що тріщиноутворення внаслідок сегрегації може зменшити опір бетону до проникнення води та агресивних іонів, а дія знакозмінних температур спричиняє додаткове розширення системи тріщин, що призводить до зниження фізико-механічних властивостей та погіршення довговічності.

У зв'язку з цим, виробництво якісних самоущільнювальних бетонів вимагає забезпечення жорсткого контролю якості під час виробництва, випробування та вкладання, використання жорсткої та міцної опалубки, а також відповідний догляд за бетонною сумішшю під час тверднення, враховуючи умови навколишнього середовища [134].

Складність проектування самоущільнювального бетону полягає в забезпеченні як високих технологічних властивостей бетонних сумішей, так і необхідних експлуатаційних характеристик затверділих бетонів на їх основі. При цьому пріоритетною вимогою є покращені реологічні показники бетонної суміші – рухливість, в'язкість, сегрегація, нівелювання у густоармованих конструкціях, видалення захопленого повітря, що зумовлює багатоконпонентність складів самоущільнювальних бетонів з використанням хімічних та мінеральних добавок, мікронаповнювачів, поліфракційних

заповнювачів [101, 149]. Актуальним напрямом одержання високоякісних бетонів, що характеризуються широким спектром функціональних можливостей, є використання багатокомпонентних добавок, що поєднують індивідуальні добавки різного функціонального призначення [3, 31, 46, 112].

Спеціальні властивості самоущільнювальної бетонної суміші зумовлюють особливості складу її макро- та мікроструктури. Вирішальний вплив на рухливість бетонної суміші має витрата крупного заповнювача, який підвищує тертя між складниками суміші і збільшує опір текучості [1]. У зв'язку з цим, особливістю самоущільнювальної суміші є менша витрата крупного заповнювача з відповідним збільшенням кількості піску та розчинової частини. Разом з тим, підвищена кількість дрібного заповнювача може знизити здатність до самоущільнення сумішей, що зумовлюється зменшенням товщини цементного тіста, яке окутує зерна [96]. При проектуванні самоущільнювальних бетонних сумішей за Японським методом (Japanese Method) регламентується зменшення вмісту крупного заповнювача порівняно з традиційним бетоном. Так, вміст крупного заповнювача в суміші досягає до 50% її густини, а вміст піску в розчинової частині суміші – близько 50% [101]. Разом з тим, при цей метод враховує щільність упакування окремо крупного та дрібного заповнювачів та не враховує співвідношення між ними, що призводить до збільшення вмісту в'язучого.

Автори [100, 143] зазначають, що одержання високих реологічних характеристик бетонної суміші та високої міцності затверділого бетону можливе при зменшенні розміру крупного заповнювача, що забезпечить найвищу міцність на одиницю маси цементу. На практиці для приготування самоущільнювальної бетонної суміші використовують заповнювачі з максимальним розміром 16 мм [135]. Разом з тим, використання заповнювача більшого розміру відіграє важливу роль у збільшенні модуля еластичності, зменшенні деформацій повзучості і усадки [110]. Міцність заповнювача значно перевищує міцність матриці і розвиток тріщини відбувається в обхід заповнювача, внаслідок чого сумарна поверхня руйнування та витрати енергії зростають із збільшенням кількості заповнювача [76, 83]. Згідно з

[153] використання дрібних заповнювачів з модулем 2,5 – 3,2 є оптимальним для високоміцного бетону. Заповнювачі з модулем крупності менше 2,5 можуть призвести до підвищення в'язкості, водопотреби та погіршення легковкладальності [110]. Ю.В. Зайцевим та співробітниками встановлено [84], що чутливість матеріалу до розвитку тріщин залежить від його структурної неоднорідності. Так, цементний камінь і дрібнозернистий бетон, що характеризуються однорідною структурою, значно чутливіші до розвитку тріщин, ніж важкі бетони.

Важливим фактором забезпечення стабільних характеристик бетону є щільність упакування заповнювачів. Тасі та ін. [151] виявили, що чим щільніше упакування агрегатів на початковій стадії, тим краща легковкладальність, а також інженерні властивості при достатньому вмісті в'язучого. Застосування алгоритму щільного упакування (densified mixture design algorithm - DMDA) лежить в основі так званого китайського методу для проектування самоущільнювальної суміші (Chinese Method) [101]. Згідно цього методу на основі даних гранулометричного розподілу частинок за розміром всіх твердих компонентів суміші повинне бути забезпечене щільне упакування заповнювачів, як найдешевших складових бетону, порожнеч між якими будуть заповнюватись портландцементом, мікро- та ультрадисперсними добавками. Позитивний ефект на реологічні властивості бетонної суміші при цьому забезпечується кількістю води, яка розміщується не в порожнечах, а відіграє роль змазки між твердими компонентами, збільшуючи рухливість.

У складах самоущільнювальних бетонів суттєво зростає роль так званої порошкової частини з розміром зерен менше 40 мкм [103, 118, 121]. Портландцемент визначає міцність бетону та швидкість її набору, а також реологічні властивості. Для забезпечення високої в'язкості з метою попередження розшарування високорухливої суміші використовують мінеральні добавки – золу-винесення [148], вапнякове борошно [116], мікрокремнезем [153], мелений гранульований шлак [121, 139]. При застосуванні бездобавочних портландцементів марки 500 кількість добавок

може досягати до 50%. Крім того, висока в'язкість бетонної суміші визначається низьким водоцементним відношенням, що досягається використанням високоефективних суперпластифікаторів на полікарбосилатній основі [129, 132].

С.В. Ковалем та ін. [61] одержано самоущільнювальний бетон класу В40 з використанням вапнякового мікронаповнювача в кількості 20-28%, при цьому міцність такого бетону через 3 доби не перевищує 50% марочної. Р.Ф. Руновою та ін. [66, 67], розроблено карбонатвмісний високофункціональний бетон для зведення масивних конструкцій класу за міцністю на стиск В25, що характеризується пониженими тепловиділенням та деформаційними напруженнями, проте такі бетони не задовольняють вимоги щодо самоущільнення та швидкості тверднення.

У кожного з додаткових інгредієнтів самоущільнювального бетону власна роль у становленні та формуванні структури цементного каменю та бетону в цілому. Їх раціональним поєднанням забезпечується підвищена щільність і міцність затверділого цементного каменю, висока якість зчеплення його з поверхнею зерен заповнювачів, а в результаті – формування мікро- і макроструктури бетону з мінімальною кількістю дефектів. Висока щільність цементного каменю і бетону забезпечує довговічність будівельних конструкцій на основі самоущільнювального бетону [39, 50, 144].

Значимість і перспективність використання високоміцних самоущільнювальних бетонів визначається їх основною перевагою – підвищенням несучої здатності будівельних конструкцій, що працюють на стиск (колони, опори, несучі елементи будівель і споруд тощо) [102, 143]. Разом з тим, у конструкціях нових архітектурних форм, оболонках, тонкостінних панелей зі складним рельєфом, резервуарах, покриттях злітно-посадкових смуг аеродромів, доріг, підлог промислових будівель, берегових дамб і гребель, шлюзів і каналів рік, колекторів, тунелів, мостів необхідно використовувати матеріали з підвищеною міцністю на розтяг й згин, тріщиностійкістю, ударною в'язкістю, морозостійкістю, водонепроникністю, зносостійкістю, низькою усадкою [144, 149].

Специфіка складів самоущільнювальних бетонів зумовлює певні особливості будівельно-технічних характеристик затверділого композиту. Автори відзначають [143], що відносно високий вміст цементу, який генерує більше теплоти гідратації, і додаткових цементуючих матеріалів з високими темпами пуцоланової реактивності у ранньому віці, менший вміст крупних заповнювачів може призвести до надлишкових деформацій усадки. Навантаження конструкцій з самоущільнювального бетону на відміну технології збірного залізобетону здійснюється в ранньому віці, що ще більше посилює дану проблему [104].

Згідно даних Г.В. Несветаєва [51-53] за рахунок зміни макроструктури бетону (збільшення кількості цементного каменю та зменшення крупного заповнювача) і впливу суперпластифікатора деформації усадки самоущільнювального бетону дещо збільшуються, а початковий модуль пружності зменшується порівняно з показниками бетонів однакового класу, одержаних за традиційною технологією.

Р.С. Aitcin [95] вважає, що проблемами високоміцних бетонів з водоцементним відношенням нижче 0,4 є підвищення пластичної та власної усадки бетону за рахунок контракції портландцементу (до 8 % абсолютного об'єму цементного тіста), що може призводити до значного раннього тріщиноутворення особливо при твердненні в повітряно-сухих умовах. Й. Штарк зазначає [94], що в бетонах з низьким водоцементним відношенням при гідратації цементу поступово витрачається введена вода з утворенням порового простору та зменшенням відносної вологості в системі, що називають явищем самовисихання або самообезводнення, в результаті чого в порах виникають капілярні сили, які обумовлюють зменшення об'єму та власну усадку. Небезпека такої усадки полягає в тому, що вона відбувається незалежно від вологості навколишнього середовища.

Автори зазначають [116, 118], що поєднання гіперпластифікатора з ультрадисперсними добавками дозволяють підвищити міцність на стиск до 130-150 МПа. При дослідженнях напружено-деформованого стану бетону з міцністю на стиск до 100 МПа встановлено, що жорсткість матриці

високоміцних бетонів більша, ніж у звичайного бетону і наближається до жорсткості заповнювача; міцність зв'язку між матрицею і заповнювачем вища у високоміцного бетону; міцність на розрив матриці високоміцного бетону вища, і кількість та розмір внутрішніх тріщин перед навантаженням зменшуються [143]. Однак при істотному підвищенні міцності бетонів на стиск міцність високоміцних бетонів на розтяг підвищується незначно. Ці аспекти зумовлюють збільшення пружності та крихкості високоміцного бетону порівняно з звичайним бетоном, що призводить до ризику раптового крихкого руйнування конструкцій.

Автори відзначають [99, 104] низьку ударну міцність, зростаючу чутливість до тріщиноутворення та крихкість високоміцних бетонів, що проявляється в зниженні пластичних деформацій у бетоні під навантаженням. У результаті цього високоміцний бетон при граничних навантаженнях руйнується практично миттєво, що представляє загрозу безпечної експлуатації і надійності будівель та споруд при перевищенні розрахункових навантажень в стиснутих елементах.

Протидія руйнуванню та забезпечення ефективної роботи будівельних конструкційних матеріалів у процесі експлуатації, що визначає їх довговічність, зумовлюється не тільки їх підвищеною міцністю, але й низькою крихкістю, яка характеризує тріщиностійкість [8, 84]. Нові методи проектування залізобетонних конструкцій та будівельних об'єктів за параметрами довговічності в тій чи іншій мірі враховують вимоги як концепції бетонів нового покоління, так і вимоги сучасного ринку бетону, спрямовані на всебічне зниження експлуатаційних витрат та інвестиційних ризиків при будівництві складних інженерних об'єктів [33, 143, 149]. Крім цього, при проектуванні та розрахунку бетонних та залізобетонних конструкцій з позицій довговічності необхідно застосовувати методики, основані на характеристиках тріщиностійкості бетонів [13, 76].

Отже, для створення самоущільнювальних бетонів з покращеними експлуатаційними властивостями, збільшення їх життєвого циклу та розширення областей застосування необхідно усунути такі недоліки бетону,

як низька міцність на розтяг, тріщиностійкість, опір бетону ударним і динамічним впливам, абразивному зношуванню, висока крихкість. Одним з ефективних способів покращення показників зазначених властивостей бетонів є дисперсне армування бетону різними видами волокон – сталевими, скляними, базальтовими, целюлозними, синтетичними, вуглецевими й ін. Наявність армувальних волокон у бетоні за умови їх оптимального вмісту підвищує щільність, однорідність та зменшує ризики тріщиноутворення, що дає змогу прогнозувати вищу витривалість і довговічність цементного бетону, підвищує його морозостійкість, водонепроникність, ударостійкість, зменшує стирання.

1.2. Підвищення тріщиностійкості бетонів за рахунок дисперсного армування

Опір будівельних конструкційних матеріалів руйнуванню, забезпечення ефективної роботи виробів при експлуатації та довговічність конструкцій на їх основі визначається не тільки з вищою міцністю, але й здатністю структури бетону перешкоджати утворенню, росту і поширенню тріщин, а також можливостями управління цими процесами [77, 102].

В бетоні як ієрархічно організованій багаторівневій структурі дисперсних систем, що складається з дискретних включень, розміщених в безперервній (або умовно неперервній) матриці, які характеризуються іншими, ніж матеріал включень властивостями, завжди присутні початкові дефекти різних масштабних рівнів, з яких при навантаженні починається накопичення тріщин і утворення магістральної тріщини. Згідно з В.М. Вировим [13] такі тріщини, які виникли в матеріалі в період отримання і технологічного перетворення його у виріб до прикладання навантаження, називають „технологічними”, і характер їх розподілу у бетоні є визначальними для забезпечення здатності бетонної конструкції зберігати свої функції під час експлуатації. Авторами підтверджено [9, 84], що причинами зародження технологічних тріщин є градієнти інтегральних і

локальних полів залишкових деформацій, що залежать від особливостей рельєфу поверхні заповнювачів, їх розташування та орієнтації в макроструктурі бетону. Руйнування композиційних анізотропних матеріалів відбувається внаслідок зовнішніх впливів, пов'язаних з підведенням надлишку енергії: механічних навантажень, циклічного заморожування-відтавання, протікання хімічних реакцій і фізичних процесів і т. д. Після прикладання критичної кількості енергії відбувається руйнування внутрішніх зв'язків структурних елементів матеріалу [4, 91].

Одним з важливих аспектів отримання високоміцних і високоякісних бетонів є вибір оптимального співвідношення величин модуля Юнга матричного складової і застосовуваного заповнювача [33]. Значна відмінність величин модулів пружності цементного каменю і заповнювача призводить до неоднорідностей розподілу напружень в об'ємі матеріалу. Навколо жорстких зерен заповнювача в матричній складовій протікає активне тріщиноутворення, що порушує цілісність бетону під навантаженням або при наростанні деформацій усадки. При цьому яскраво вираженими концентраторами напружень є пори і пустоти [90].

Одним із перспективних напрямків контролю тріщиноутворення, що дає змогу компенсувати такі недоліки бетону, як низька міцність на розтяг та висока крихкість, є армування останнього стрижневою арматурою, а також вторинне дисперсне армування з введенням волокон-фібри, що рівномірно розподіляються в об'ємі бетонної матриці. Для цього використовуються різні види металевих і неметалевих волокон мінерального та органічного походження. В технічній літературі такий бетон отримав назву фіброармований бетон або залежно від виду волокон, що використовуються – сталеві фібробетон, склофібробетон і т.д. [62].

Ґрунтуючись на результатах аналізу розвитку й удосконалення бетонів і конструкцій, слід зазначити, що фібробетон є одним з перспективних будівельних матеріалів XXI століття. Перший у світі патент на фібробетонну конструкцію отримано російським ученим Некрасовим В.П.

в 1909 р., а широкий розвиток дослідження з розроблення фібробетонів і методів розрахунку конструкцій з них одержали у 60-х рр. 20-го ст. [27].

Особливий розвиток і застосування фібробетон одержав у Японії при створенні монолітних конструкцій — підлог промислових будівель, складів логістичних центрів, метро й тунелів, злітно-посадочних смуг аеродромів, стоянок автомобілів і автомобільних доріг, резервуарів і басейнів, банківських і сейфових сховищ, вибухозахисних фортифікаційних об'єктів та інших. У Європі застосовується понад 150 тис. т фібри, або 3 млн. т фібробетону в рік, що становить 15 % від загальної кількості виготовленого бетону. У той час, як в Японії обсяги фібробетону становлять 85-90% [7].

Фібробетон рекомендується застосовувати у конструкціях, де найбільш ефективно можна використовувати такі їх технічні показники, як підвищену тріщиностійкість, ударну міцність, в'язкість, зносо-, атмосферо- та морозостійкість; можливість використання більш ефективних конструктивних рішень, порівняно зі звичайним армуванням, наприклад, тонкостінних конструкцій з різними типами армування; зниження трудовитрат на арматурні роботи, підвищення ступеня механізації та автоматизації виробництва конструкції, наприклад, у збірних і монолітних тонкостінних оболонках, у ребристих плитах покриття і перекриття, багат шарових стінових панелях, збірних колонах, балках, палях, незнімній опалубці, дорожніх та аеродромних покриттях, монолітних і збірних підлогах, елементах обробки фасадів та ін. [25, 32, 40].

Дисперсне армування набуває важливого значення і в антисейсмічному будівництві за рахунок здатності, армованих синтетичним волокном, конструкцій сприймати значні згинальні моменти, набуваючи таких властивостей, як вища деформативність бетонної конструкції, висока тріщиностійкість [24].

При використанні фібробетонів можливо підвищити тріщиностійкість, не використовуючи додатково попередньо напружену арматуру, за рахунок розподілення волокон по всій матриці бетону забезпечується тривимірне

зміцнення бетону порівняно з традиційною сталеву арматурою, котра забезпечує лише двовимірне зміцнення [12].

Армування бетонів стрижневою арматурою призводить до відповідного підвищення енергоємності матеріалу [152]. Оскільки застосування залізобетону здійснюється в широких масштабах, постає проблема максимального скорочення витрат металу та найраціональнішого його використання в конструкціях, що можна досягти за рахунок армування дисперсними волокнами. Дисперсне армування бетону надає змогу повністю або частково скоротити обсяги традиційних арматурних робіт, забезпечує зниження трудомісткості арматурних робіт, скоротити витрату сталі й бетону за рахунок зменшення товщини конструкцій, дозволяє сумістити технологічні операції готування бетонної суміші і її армування [37].

Економічний ефект застосування фібробетону при вищій вартості його порівняно із традиційним бетоном забезпечується за рахунок зменшення або повного скорочення застосування стрижневої й дротяної арматур, сіток і каркасів з них. Крім того, ефективність використання фібробетону зумовлена збільшенням довговічності конструкцій і зниженні витрат на поточний ремонт, збільшення міжремонтного ресурсу й підвищення безпеки будинків і споруд при сейсмічних впливах і пожежах. Слід відзначити, що дисперсні волокна не заміняють конструктивну сталеву арматуру [98]. Основні властивості волокна як вторинного армування - це контроль за пластичною усадкою і утворенням усадкових тріщин, підвищена стійкість до стирання, відколювання і ударних дій, знижена проникність, підвищена довговічність в умовах заморожування-відтавання [44].

Автори зазначають [45, 133], що при армуванні звичайного бетону шляхом введення волокон відбувається збільшення тільки пластичних характеристик порівняно з неармованою матрицею, тоді як високоміцний фіброармований бетон проявляє значне деформаційне зміцнення, що призводить до підвищення міцності на стиск та згин і жорсткості порівняно із звичайною матрицею і такий бетон називають ультрапластичним.

Зміцнення матеріалу волокнами ґрунтується на припущенні, що матеріал бетонної матриці передає волокнам прикладене навантаження за допомогою дотичних сил, які діють на поверхні розділу, і якщо деформативність волокна менше деформативності матриці, то основну частку прикладеного напруження сприймають волокна, а загальна міцність композиції пропорційна їх об'ємному вмісту [9].

Дисперсне армування не має суттєвого впливу на міцність бетону на стиск, однак значно підвищує міцність на розтяг та згин. Підвищення міцності цементного каменю на розтяг в бетонах з довільною орієнтацією волокон пояснюється тим, що волокна з достатньою рівномірністю в матеріалі можуть сприймати зусилля практично будь-якого напрямку і тим самим перешкоджати виникненню та розвитку тріщин у цементному камені. При силовій дії дефекти структури можуть переміщуватися, об'єднуватися і в подальшому призводити до появи та розвитку тріщин. Рівномірно розподілені волокна сповільнюють рух цих мікродефектів [25].

При виникненні тріщин волокно блокує її з усіх сторін, перешкоджає її подальшому розвитку та росту. Авторами [24, 63] розглянуто особливості розвитку тріщин у дисперсно-армованих самоущільнюваних бетонах з позицій механіки руйнування. Показано, що збільшення радіусу кривизни вершини тріщини при її контакті з поверхнею волокна закономірно веде до підвищення міцності матеріалу. Здатність волокон протистояти поширенню тріщин триває доки ще не подолано опір волокнистої арматури на розрив або не порушено її зчеплення з цементною матрицею [55].

Якість роботи дисперсно-армованих композитів залежить від факторів, що забезпечують спільну роботу елементів структури: зчеплення волокон з матрицею й забезпечення інертності їх щодо один одного. У цементних бетонах зчеплення волокон з матрицею відбувається як за рахунок фізичної адгезії, обумовленої нерівностями на поверхні волокон, так і за рахунок механічного заклинювання фібри частинками матриці [74, 78]. Залежно від взаємодії між волокнами фібри з матрицею, їхньої орієнтації й концентрації по-різному відбувається деформація й руйнування армованого

композиту [63]. Як показали дослідження [54], критичні напруження тріщиноутворення залежать від об'ємного вмісту волокон і відстані між ними. Якісні показники бетону, армованого волокнами, залежить від довжини волокон і відношення довжини до діаметру. Так, довші волокна і з більшим відношенням довжини до діаметру краще протистоять навантаженням, ніж коротші. Проте довгі волокна важче укласти при торкретуванні бетону, і вони гірше розподіляються в бетоні.

Армування фіброволокном доповнює комплекс спеціальних конструктивних заходів, направлених на підвищення міцності та монолітності несучих конструкцій. Зміна властивостей фібробетонів основана на принципах створення композитів, що ґрунтуються на спільній роботі матеріалів з різними фізико-механічними властивостями [144].

У результаті поєднання армувальних елементів і матриці утворюється комплекс властивостей композиту, які не тільки включають початкові характеристики його компонентів, але й набувають нових якостей, що пов'язано з гетерогенною структурою і наявністю великої поверхні розділу між волокнами та матрицею [60]. Так, наявність межі розділу між армуючими елементами та матрицею істотно підвищує тріщиностійкість матеріалу. За даними [15], тріщиностійкість бетону при введенні 1-3% сталевих волокон підвищилась в 2-3 рази, в'язкість – більше ніж у 30 разів.

При застосуванні дисперсного армування ефективно підвищується морозостійкість бетону [75], незважаючи на деякий ріст при цьому кількості капілярних пор. Волокна фібри сприймають розтяжні напруги, які виникають при заморожуванні води в порах матеріалу. Також проявляється «утримуючий» ефект волокон, що перешкоджає відшаруванню й відколюванню фрагментів бетону від конструкції (зразка) при заморожуванні й відтаванні [37].

Введення волокон значно збільшує залишкову міцність матеріалу, а його руйнування відбувається при більш високих значеннях деформації. Навантаження деформації зсуву в контактній зоні волокна й матриці до волокна обумовлюється розходженням між їхніми модулями пружності [44].

Підвищення формостійкості виробів, армованих синтетичними волокнами, зумовлюється зниженням напружень біля вершини тріщин за рахунок наявності в системі еластичного елемента структури, котрий частково здатний поглинати енергію, що вимагає більш високих напружень у матеріалі [3, 19].

Волокна фібри здатні нести деяке навантаження, прикладене до бетонного композиту вже після розтріскування матриці (до 2 МПа). Але для цього об'ємний зміст фібри в композиті має бути вище «критичного». За рахунок гальмування процесу тріщиноутворення волокнами, дисперсне армування матриці підвищує ударну міцність, тобто критичний коефіцієнт інтенсивності напруг або тріщиностійкість бетону [45].

Дисперсне армування зменшує прогин зразків при навантаженні, а вже після утворення тріщини в армованих бетонів напруження при згині, що забезпечує той самий прогин, значно вище, ніж у неармованих. Тобто фібра підвищує якість бетону, зокрема й за рахунок своєї розтяжності й роботи волокон після появи тріщин [64]. Ступінь водонасичення також впливає на властивості дисперсно-армованих композитів, оскільки знижують зчеплення волокон, що впливає на спільну роботу фібри й матриці [24].

Для дисперсного армування бетону активно застосовуються волокна з різних матеріалів - сталі, скла, полімерів, базальту, азбесту, вуглецеві та ін., які суттєво відрізняються за показниками міцності на розтяг, модулем пружності, деформаціями при розриві, щільністю, корозійною стійкістю [25, 48, 55]. Найбільш дослідженими є фібробетони на основі сталі, скла й деревини [49, 54], менше – дисперсно-армовані бетони на синтетичних і вуглецевих волокнах. Особливий інтерес представляє сталева фібра внаслідок оптимального співвідношення „вартість-ефективність” роботи в бетоні [78]. При використанні сталеві фібри досягається достатній ступінь анкерування, що дозволяє повною мірою використовувати її міцність для найбільш ефективною роботи в бетоні.

У технічно розвинених країнах інтенсивно проводяться дослідження в області впровадження сталеві фібробетону при виготовленні збірних й

монолітних конструкцій об'єктів транспортного, промислового, цивільного, енергетичного будівництва й об'єктів оборонного призначення [32, 40]. Ефективним застосуванням фібробетону є спорудження фібробетонних індустриальних підлог, а більше 25 % індустриальних підлог відносять до підлог з сталеві фібробетону [111].

Технологія зведення фібробетонних конструкцій передбачає готування сталеві фібробетонних сумішей необхідної легковкладальності (до P5) з різним вмістом фібри як у заводських, так і будівельних умовах. Авторами [57] розроблено й застосовано сталеві фібробетони класів за міцністю B30-B50 на стиск і W12 за водонепроникністю. Встановлено [58], що при виробництві сталеві фібробетонних паль економія бетону досягає 14 %, зниження сталі на 10 %, трудозатрат на 17 %. Застосування сталеві фібробетону дозволило підвищити тріщиностійкість конструкцій в 1,5 рази. Разом з тим, важливою проблемою при використанні сталеві фібри у бетоні є можливість утворення так званих "їжаків" та нерівномірного розподілу сталеві фібри, що вимагає необхідність спеціальних пристосувань для рівномірної подачі фібри в бетонну суміш [1, 19].

Проблему підвищеного "комкування" у структурі бетону сталеві фібри вирішується шляхом застосування фрезерованої фібри, конфігурація якої, її розміри й технічні характеристики забезпечують її ефективну роботу в дисперсно-армованому бетоні [65]. Разом з тим, через високі норми витрати сталеві фібри доводиться шукати більш доступні способи армування бетонів.

В останні роки в зарубіжній практиці все більшого застосування знаходять фібробетони з дисперсним армуванням із синтетичних волокон, зокрема високоміцними, корозійностійкими в різних середовищах [44]. Для виготовлення фібробетону досліджена доцільність використання поліпропіленової, нейлонової, поліефірної, поліамідної, акрилової, поліетиленової фібри. Фібра із синтетичних волокон дешевша й хімічно стійка. Волокна знаходять застосування в бетоні для промислових складів, гідротехнічних споруджень, зовнішніх площадок, у бетонних плитах

перекриттів, об'єктах нафтохімічної промисловості, мостах, монолітних конструкціях, бетонних плитах фундаментів, залізобетонних палях, у будівельних розчинах і штукатурці, у матеріалах для ремонту бетону, а також у місцях підвищеної сейсмічної активності [17]. Синтетичне волокно характеризується підвищеною деформативністю [86]. Модуль пружності таких волокон не перевищує $1/4$ модуля пружності звичайних бетонів, тому синтетичні волокна не можуть виконувати роль несучої арматури для бетону [44]. Однак їх використання для додаткового армування вирішує проблему підвищення тріщиностійкості, часткове підвищення ударної міцності, запобігання сколювання та пошкоджень при транспортуванні і монтажу виробів [49].

Широкого використання у фібробетоні набуває поліпропіленова фібра, яка характеризується відносно високим модулем пружності (близько 8000 МПа), високою хімічною стійкістю і міцністю на розтяг (близько 770 МПа) [59]. Поліпропіленове фіброволокно є економічнішим порівняно зі сталеву сіткою, що широко застосовується в наливних бетонних підлогах і стяжках різних видів.

Авторами [76] показана ефективність використання поліпропіленової фібри для дорожніх бетонів, що сприяє зростанню статичних критичних коефіцієнтів інтенсивності напружень і дає змогу витримувати критичніші навантаження до моменту зрушення макротріщини та підвищує ефективність "роботи" бетону в закритичній стадії руйнування. Разом з тим, поліпропіленова фібра має низький модуль пружності й високу граничну деформативність при незначних навантаженнях розтягування, що визначає деформативність бетону, особливо після тріщиноутворення [43, 57]. Автори відзначають [19] слабе зчеплення полімерної фібри з цементним каменем, що вимагає застосування фібри періодичного профілю або спеціально обробляти чи покривати поверхню волокон. Крім того, поліпропіленове волокно старіє і втрачає свої властивості з часом, а також горить при дії на нього відкритого полум'я [25].

Ефективними з позицій підвищення міцності й довговічності фібробетонів, у тому числі при хімічних, температурних і пожежних впливах, є вуглецеві волокна, проте вони спричиняють значне зростання собівартості фібробетону. В останні роки в закордонному будівництві знайшов застосування текстильбетон – бетон, армований тканинами й сітками з бавовняних, скляних, віскозних й інших волокон [25].

Склофібробетон з використанням скляних безперервних волокон характеризується підвищеною стійкістю до корозійних середовищ порівняно зі сталевим фібробетоном [1]. Отримано конструкційний склофібробетон [43] з густиною 1,45–1,8 т/м³, міцністю на розтяг при згині 20–100 МПа; модулем пружності 21–60 ГПа, ударною міцністю 1,0–2,5 МПа. Проте суттєвим недоліком скляних волокон є використання дорогих сировинних матеріалів при його виробництві, що підвищує собівартість самого волокна. Менше практичне застосування склофібробетонів також пов'язано з невеликими обсягами виготовлення скловолнистої арматури. Крім того, скловолокно із звичайного скла руйнується під дією лужного середовища цементного каменю, тому необхідно застосовувати спеціальне лугостійке скло або застосовувати заходи для захисту від корозійного руйнування [59]. До таких заходів відносять використання для бетону глиноземного цементу; введення добавок для зв'язування лугів; просочування бетону полімерами, що призводить до збільшення собівартості композиту [19].

Дослідженнями І.П. Гамеляка та ін. [17, 18] показано, що дисперсне армування асфальтобетонів дискретними хімічними волокнами дозволяє покращити їх реологічні, фізико-механічні властивості, зокрема підвищити міцність на зсув при температурі 50 °С на 25–30 %, міцність на розтяг при від'ємних температурах – на 40–80 %, знизивши цим самим ймовірність виникнення деформацій асфальтобетонних покриттів.

Одним з ефективних різновидів мінеральних волокон для дисперсного армування бетонів є базальтове волокно [48, 49]. Воно характеризується високою міцністю 1600-3600 МПа. Основними особливостями базальтобетону є його висока міцність при всіх видах напружених станів і

здатність витримувати значні деформації в пружному стані. При цьому відносна деформація цементного каменю без утворення тріщин досягає 0,7-0,9 %, що в 35-45 разів перевищує граничне видовження неармованого каменю [78]. Значне збільшення деформативності і міцності цементного каменю відбувається за рахунок усунення базальтовими волокнами впливу концентрації напруг в місцях, ослаблених структурними дефектами (раковинами, мікротріщинами). Базальтове волокно хімічно інертне, не вступає в реакцію з солями або фарбниками, тому бетони, армовані базальтовими волокнами, застосовують при будівництві морських споруд, і в архітектурному і декоративному бетонах [7]. У дорожніх покриттях волокно захищає бетон і арматуру від проникнення агресивних речовин, а також підвищує залишкову міцність і стійкість до заморожування-відтавання, підвищує шорсткість поверхні. Авторами показано [113], що використання сучасних полімерних композитних матеріалів, зокрема базальтової арматури може суттєво полегшити розв'язання проблеми захисту залізобетонних конструкцій від руйнівного впливу корозії.

Разом з тим, у лужному середовищі тверднучого портландцементу поверхня волокна руйнується з утворенням раковин. Авторами [70] встановлено, що показало, що міцність базальтових волокон в лужному середовищі портландцементу може зменшуватися на 5-10% тільки в перші 3-6 місяців, а руйнування поверхні волокон відбувається на глибину не більше 4 мкм. За рахунок утворених раковин міцність зчеплення цементного каменю і волокна збільшується, що зумовлює зростання міцності самого виробу. При використанні волокон діаметром більше 100 мкм їх міцність не змінюється. У зв'язку з цим, при дисперсному армуванні бетону на портландцементях необхідно використовувати модифіковану лугостійку базальтову фібру.

Отже, при безперечних перевагах фібробетонів основним їх недоліком є підвищена в'язкість, жорсткість, що викликає необхідність застосування для їх виготовлення спеціальних змішувачів чи високорухливих сумішей, що забезпечить рівномірний розподіл фібри по об'єму бетону і перешкодить комкуванню фібрових волокон. З іншої сторони при традиційному

дисперсному армуванні вирішується задача гальмування тріщин тільки одного структурного рівня, в той час як ієрархія тріщиноутворення та сукупності тріщин свідчить про присутність у бетоні дефектів різних розмірів і структурних рівнів матеріалу. Тому проблема отримання високоміцного дисперсно-армованого бетону з покращеними технологічними та експлуатаційними властивостями вирішується шляхом багаторівневого модифікування його структури добавками різного функціонального призначення в поєднанні з армувальними волокнами.

1.3. Фізико-хімічні основи модифікування властивостей фібробетонів

Сучасні технології бетонів передбачають використання різноманітних прийомів направленої структуроутворення для забезпечення необхідних параметрів при виготовленні, вкладанні та в процесі експлуатації будівельних композитів на основі розкриття взаємозв'язків у системі „склад – структура – властивості матеріалу” з мінімальними затратами матеріальних та енергетичних ресурсів, що вирішується за рахунок комплексного модифікування мінеральними і хімічними добавками [85, 90, 107].

У процесі приготування фібробетонної суміші виникають труднощі, пов'язані з зниженням її рухливості, що зумовлено зростанням питомої поверхні твердої фази при введенні волокон і необхідним збільшенням води для змочування і змазки, значним тертям між частинками, а також зчепленням між волокнами, волокнами та заповнювачами [140]. Застосування пластифікаторів при виготовленні фібробетонної суміші дозволяє досягнути необхідної легкоукладальності, здатності до ущільнення і забезпечення гомогенності структури фібробетону [19].

Особливий інтерес представляє виробництво самоущільнювальних фібробетонних сумішей [111], що дозволяє забезпечити високу рухливість бетонної суміші з рівномірним розподіленням фібри без сегрегації і покращені стабільні характеристики затверділого бетону, зокрема підвищену

міцність, тріщиностійкість, а також зумовлює довговічність, надійність в експлуатації виробів і конструкцій на його основі.

Одержання необхідної рухливості, стабільних реологічних характеристик та щільної структури самоущільнювального бетону досягається за рахунок використання суперпластифікаторів. Активним компонентом добавок пластифікуючої дії є поверхнево-активні речовини, які за своєю хімічною природою поділяють на лігносульфонати технічні, продукти конденсації нафталінсульфокислоти і формальдегіду, сульфовані меламінформальдегідні смоли та добавки на основі полікарбоксилатів чи поліакрилатів [62, 85]. Водоредукуючий ефект суперпластифікаторів визначається їхньою хімічною структурою і становить для лігносульфонатів технічних 5-15%, нафталінсульфонатів 15-25%, поліакрилатів 20-30%, полікарбоксилатів 25-40% [88].

Гідрофобні довгі розгалужені ланцюги полікарбоксилатів створюють двомірну колоїдну водонепроникну плівку, дефлокуючи цементні частинки та забезпечуючи реалізацію структурно-механічного ефекту стабілізації в'язучої системи [2]. Збільшення рухливості цементних систем при використанні полікарбоксилатів досягається за рахунок зменшення величини надлишкової міжфазної енергії і дефлокуляції цементних зерен [92].

Адсорбційна дія суперпластифікаторів максимально реалізується на межі розділу фаз, що визначає зростання їх ефективності в тонкодисперсних системах [25]. Для досягнення більш високого ступеня функціональності в рецептурі бетону необхідно збільшувати об'єм високодисперсної реологічної матриці, що забезпечується введенням мелених гірських порід, які характеризуються реологічною активністю в комплексі з суперпластифікатором [88].

Фізико-хімічні особливості тверднення цементуючих матриць високоміцних самоущільнювальних бетонів зумовлені адсорбційним модифікуванням добавкою полікарбоксилату кристалічних продуктів гідратації клінкерної складової цементуючих систем, що забезпечує направлене регулювання процесами раннього структуроутворення [38, 51,

93]. Авторами [73, 137] при вивченні механізму росту монокристалів портландиту в середовищі суперпластифікаторів полікарбоксилатного типу показано, що грані з великою поверхневою активністю екрануються адсорбційними шарами полікарбоксилатів, змінюючи габітус кристалів $\text{Ca}(\text{OH})_2$, наближаючи їх форму до глобулярної, при цьому суттєво сповільнюється процес росту зародків $\text{Ca}(\text{OH})_2$, спричиняючи підвищення дисперсності кристалів і рівномірності їх розподілу в структурі цементної матриці.

Основне навантаження у формуванні властивостей конструкційних матеріалів нового покоління несе цементуюча матриця, що утворюється за рахунок процесів конденсації мінеральних дисперсних систем різної хімічної природи [30, 39]. Виявлення нових характеристик складових таких систем на рівні нано- і мікроструктури, а також поведінки системи на рівні коагуляційних явищ дозволяє забезпечити тверднення цементуючої матриці будівельних композитів з урахуванням можливостей модифікування в напрямку покращення їх деформативних властивостей, що визначають довговічність [3, 31].

Тріщиностійкість бетонів у значній мірі залежить від балансу активних і реактивних сил в елементах його структури. До активних сил відносяться сили зв'язків фізико-хімічної природи, що формуються в структурі цементному камені внаслідок гідратації цементу, а також адгезійні сили в контактних зонах цементно-піщаної матриці і зерен заповнювачів [64]. С.Й. Солодкий [77] відзначає, що вирішальну роль у процесі руйнування відіграють контактні зони цементного каменю та зерен піску. Збільшення адгезії цементного каменю до поверхонь дрібного заповнювача, щільності і мікротвердості контактних зон, зменшення кількості пор і мікротріщин на поверхні розділу фаз забезпечують формування підвищеної тріщиностійкості на рівні мезоструктури матеріалів. Реактивні сили виникають в порах, капілярах і тріщинах, які є концентраторами напружень [13]. На поверхнях поділу композиційних матеріалів відбувається

перерозподіл деформацій і напружень між окремими компонентами при дії технологічних, внутрішніх та експлуатаційних навантажень.

Гальмування зростання і поширення тріщин у матеріалі можна забезпечити зміною умов концентрації напруг і зниженням їх рівня введенням включень у матеріал на шляху зростаючої тріщини [41]; введенням в матеріал додаткових границь розділу фаз, які будуть змінювати і подовжувати траєкторії поширення тріщин, що залежить від відповідності параметрів додаткових елементів, які вводяться в матеріал, параметрам тріщин, які утворюються і розвиваються у складній ієрархічно сформованій структурі бетону. Для підвищення тріщиностійкості бетону принциповим є ідентифікація параметрів тріщин і оцінка їх концентрації в різних діапазонах навантаження матеріалу [27].

Актуальним напрямом вирішення проблеми підвищення тріщиностійкості бетонів є багаторівневе дисперсне армування їх структури, що розглядається як спосіб сповільнення розвитку тріщин на структурних рівнях різного масштабу і реалізується шляхом цілеспрямованого введення в конструкційний матеріал різномасштабних армувальних елементів при цьому забезпечується принципова зміна умов і енергетики утворення тріщин в структурі матеріалу [41]. На макромасштабному рівні армувальними елементами є дисперсні волокна зі співвідношенням $l/d \gg 1$ (l – довжина, d – діаметр частинки добавки), а на мікромасштабному рівні (цементуюча матриця) – високодисперсні мінеральні добавки, для яких $l/d \approx 1$ [1].

Підвищення тріщиностійкості бетону на мікроструктурному рівні пов'язано з впливом характеристик порової структури бетону. Одержання щільної структури самоущільнювального бетону на мікрорівні досягається наступними ефектами: високою щільністю упакування зерен цементуючої системи за рахунок використання дрібнодисперсних композицій (фізична оптимізація); пуцолановою реакцією при використанні активних мінеральних добавок (хімічна оптимізація); збільшенням зчеплення між цементною матрицею та заповнювачем (оптимізація мезоструктури бетону) [149]. Дисперсне армування тонкомеленими мінеральними добавками реалізується

за «ефектом міронаправнювача», який має фізичну природу – заповнення пустот тонкодисперсними частинками наповнювача, що приводить до ущільнення та зниження пористості цементного каменю, та хімічну природу, пов'язану з реакціями взаємодії складових ультрадисперсних мінеральних добавок з гідроксидом кальцію [107].

Покращення механічних властивостей високофункціональних бетонів, пов'язують із деякими недоліками традиційних бетонів. Контактна зона на думку багатьох вчених [121, 123] є найвразливішим місцем, оскільки тут можливим є послаблення зв'язку заповнювачів із гідросилікатами кальцію через утворення кристалів портландиту на їх поверхні. Висока міцність бетонів нового покоління забезпечується модифікуванням контактної зони добавками з високою пуцолановою активністю, що зменшує кількість утворених кристалів $\text{Ca}(\text{OH})_2$ за рахунок реакції із активним SiO_2 [118, 125].

Як зазначають автори [14, 93], введення до складу портландцементу традиційних пуцоланових добавок (опока, трепел) призводить до зростання водопотреби в'язучого, сповільнення набору його міцності в ранній період тверднення та погіршення експлуатаційних властивостей. У зв'язку з цим, при виготовленні багатокomпонентних цементних матеріалів у якості активної мінеральної добавки та наповнювача значний практичний інтерес представляє використання добавки пуцоланової групи з особливими властивостями, багатотоннажного відходу промисловості – золи-винесення ТЕС [97, 123, 161].

На думку авторів [102] добавки мікрокремнезему та золи-винесення знижують пористість бетону за рахунок заповнення порожнин, ефективного блокування капілярів ультрадисперсними частинками та посилення міжфазної перехідної зони заповнювач-цементна матриця, забезпечуючи щільну упаковку частинок. Ефективність упакування частинок залежить від гранулометричного розподілу частинок [103]. При цьому перевага надається бінарній чи потрійній системі з контрольованим розподілом окремих фракцій в різному діапазоні розмірів частинок, так званий переривчастий гранулометричний склад (*gap-graded particle size distribution*) [101].

Однак при введенні мінерального компонента в більшій кількості за оптимальну підвищується частка кристалічних гідратів, зростають внутрішні напруження, підвищується пористість та порушується неоднорідність структури [39, 72]. Для компенсації зниження міцності за рахунок введення до портландцементу дисперсних добавок необхідно використовувати добавки з високою пуцолановою активністю, які характеризуються значною швидкістю взаємодії з гідроксидом кальцію з забезпеченням додаткової міцності. Такими компонентами стали високодисперсні аморфні кремнеземи, зневоднені каоліни, високодисперсні золи.

Авторами показано [82], що ефективними для армування цементуючої системи на мікрорівні є попередньо вирощені голчасті кристали гіпсу ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), еtringіту ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$), гідросилікатів кальцію (ксонотліт, фошагіт, гідрат трикальцієвого силікату та ін.), які мають ниткоподібний габітус, високе значення міцності при розриві, а також максимальне зчеплення з матрицею і високу корозійну стійкість в середовищі цементного каменю. Однак значним недоліком армування шляхом введення у вихідні суміші зазначених кристалів є відносна складність їх отримання, а також можливість механічного пошкодження армуючого компонента при приготуванні формувальної суміші.

Ефективним на рівні цементуючої матриці є армування голчато-волоконистими кристалами еtringіту, що утворюються безпосередньо при гідратації цементу, в результаті чого відбувається явище „самоармування” на наноструктурному рівні [82]. При цьому значний практичний інтерес для синтезу еtringіту в цементуючій матриці представляє використання добавки метакаоліну [46, 49]. Введення метакаоліну в склад самоущільнювальних дисперсно-армованих бетонів дозволяє підвищити рухливість, марочну міцність, водонепроникність, морозостійкість. Це обумовлено зростанням міцності цементного каменю; покращенням порової структури самоущільнювальних дисперсно-армованих бетонів. Водночас алюмосилікатна складова метакаоліну здатна активно взаємодіяти з гіпсом, що міститься в портландцементі. Встановлено [127], що при введенні

метакаоліну спостерігається підвищення значень реологічних характеристик самоущільнювальних сумішей, армованих дисперсними волокнами, що забезпечує одержання покращених реологічних показників - рухливість, в'язкість, сегрегація, нівелювання у густоармованих конструкціях, видалення захопленого повітря.

Метакаолін застосовують як самостійний компонент, або в складі комплексних мінеральних добавок, зокрема добавки Геокон G0, яка крім мета каоліну містить золу-винесення та гіпс [20, 67]. Комплексний вплив на цементуючу систему добавки Геокон G0 полягає у підвищенні ступеня гідратації портландцементу, зміні балансу між гідратними фазами із збільшенням кількості міцніших та стійкіших низькоосновних гідросилікатів кальцію типу CSH(I) замість портландиту та високоосновних гідросилікатів кальцію типу CSH(II), а також ущільненні каменю за рахунок розширних компонентів добавки, що дозволяє одержати високоміцні бетони з литих сумішей та компенсує їх усадочні деформації в процесі тверднення [118]. Зола-винесення, зерна якої мають сферичну форму, за рахунок реалізації "ефекту роликотіщика" позитивно впливає на легковкладальність цементних систем, знижує їх водовідділення, сульфатостійкість, стійкість до лужної та хлоридної корозії, знижує тепловиділення і деформації усадки, підвищує міцність та тріщиностійкість бетону на пізніх термінах тверднення [72, 103].

Авторами [150], показано, що найбільш ефективною є добавка алюмінату кальцію з гіпсом, яка повністю компенсує усадочні деформації самоущільнювальних дисперсно-армованих бетонів. Залежно від стехіометричного співвідношення гіпсу та алюмінату кальцію в в'язучій системі будуть формуватися високо- або низькосульфатні форми гідросульфоалюмінатів кальцію, що зв'язують відповідно 32 і 12 молекул води, завдяки чому відбувається зниження усадочних деформацій при одночасному підвищенні міцності системи.

Передумовою виникнення бетонів нової генерації є дослідження, направлені на створення модифікованих цементуючих систем, які

забезпечують покращення експлуатаційних властивостей, зокрема технологічності сумішей, їх однорідності, високих ранньої та марочної міцностей, довговічності [106, 108]. При розробленні цементних бетонів з покращеними механічними властивостями раціональним є використання в якості дисперсних модифікуючих добавок волоконподібних вуглецевих нанодисперсних систем, що призводить до зміни морфології кристалогідратних новоутворень в процесі структуроутворення мінеральних в'язучих матриць, що забезпечує формування малодефектної структури підвищеної щільності і міцності та сприяє зростанню деформативних властивостей за рахунок ефекту «наноармування» [129].

Значний практичний інтерес для досягнення технологічної та експлуатаційної ефективності самоущільнювальних бетонів викликає застосування суперпластифікованих цементуючих систем з високою ранньою міцністю, що містять високодисперсні алюмосилікатні та карбонатні мінеральні і комплексні хімічні добавки [36] та мультимодальних композиційних портландцементів, модифікованих ультрадисперсними мінеральними добавками різних типів з підвищеними значеннями поверхневої енергії [68]. Висока функціональність цементуючих систем в умовах екстремальної рухливості полягає в синергічній дії її компонентів, оптимізації заповнення пустот за рахунок ретельно контрольованого розподілу окремих складових в різному діапазоні розміру частинок переведення вільної води у адсорбційно зв'язану, прискорення гідратації та направленою формування мікроструктури цементної матриці.

1.4. Теоретичні передумови досліджень та наукова гіпотеза

Узагальнення результатів досліджень в області технології самоущільнювальних бетонів та відомих закономірностей формування малодефектної структури будівельних матеріалів на основі розкриття взаємозв'язків у системі „склад – структура – властивості матеріалу” та розвитку тріщин у бетонах свідчить, що покращення деформаційних

характеристик, тріщиностійкості і довговічності будівельного композиту досягається за рахунок керованого структуроутворення високопластифікованої стабільної цементної матриці, а також шляхом комплексного системного модифікування складу введенням нових структурних елементів, що блокують розвиток тріщин в бетоні на всіх структурних рівнях, зокрема дисперсних армувальних волокон і органо-мінеральних комплексів.

На підставі детального і всебічного аналізу літературних і патентних матеріалів видатних вітчизняних та зарубіжних вчених (В.І. Братчун, В.М. Вировий, І.П. Гамеляк, З. Гергічни, В.І. Гоц, Л.Й. Дворкін, В.М. Дерев'янка, Я. Дея, М.М. Зайченко, П.В. Кривенко, С.В. Коваль, Т.В. Кузнєцова, В. Курдовські, М. Колепарді, Я. Малолепши, Г.В. Несветаєв, О.О. Пащенко, К.К. Пушкарьова, Р.Ф. Рунова, М.А. Саницький, В.П. Сербін, Х.С. Соболев, С.Й. Солодкий, Х. Тейлор, О.В. Ушеров-Маршак, Й. Штарк та ін.), що присвячені розробленню модифікованих багатокomпонентних в'язучих та композиційних будівельних матеріалів з необхідними властивостями на їх основі, дозволяє висунути гіпотезу про доцільність багаторівневого модифікування структури композиту добавками різного функціонального призначення в поєднанні з армувальними волокнами: на макромасштабному рівні базальтовою фіброю, що забезпечує зміну умов і енергетики утворення тріщин в структурі матеріалу, на мікромасштабному рівні (цементуюча матриця) – високодисперсна мінеральна добавка (явище „самоармування”) за рахунок направленого формування продуктів гідратації волокнистого габітусу для отримання високоміцного дисперсно-армованого бетону з покращеними експлуатаційними властивостями.

РОЗДІЛ 2

ХАРАКТЕРИСТИКА ВИХІДНИХ МАТЕРІАЛІВ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Характеристика вихідних матеріалів

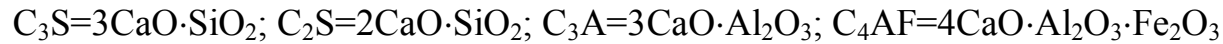
При виготовленні самоущільнювальних бетонів, армованих дисперсними базальтовими волокнами, використовували портландцементи загальнобудівельного призначення ПЦ II/A-III-500 ПАТ “Волинь-цемент” та ПЦ I-500-Н ПАТ «Івано-Франківськцемент». Хіміко-мінералогічний склад портландцементних клінкерів представлений в табл. 2.1, а фізико-механічні властивості портландцементів наведені в табл. 2.2. За показниками тонини розмелювання, термінів тужавіння, ранньої та стандартної міцності застосовувані портландцементи ПЦ II/A-III-500 та ПЦ I-500-Н відповідають вимогам ДСТУ Б В.2.7-46:2010.

За даними лазерної гранулометрії портландцементи ПЦ I-500-Н та ПЦ II/A-III-500 характеризуються близьким гранулометричним складом (рис. 2.1). Вміст зерен з розмірами менше 10, 20 та 60 мкм для ПЦ II/A-III-500 становить 21,45; 50,80 і 91,45 % відповідно, тоді як для ПЦ I-500-Н – 25,32; 50,80 та 94,60 % (табл. 2.3). Ефективні діаметри D_{10} та D_{50} портландцементу ПЦ I-500-Н становлять відповідно 5,75 та 19,42 мкм, а максимум на диференційній кривій розподілу частинок за розмірами знаходиться в межах 10-40 мкм (рис. 2.1, табл. 2.3). Ефективні діаметри частинок портландцементу ПЦ II/A-III-500 D_{10} та D_{50} становлять 4,87 та 20,63 мкм відповідно, при середньому діаметрі частинок проби 26,68 мкм.

Таблиця 2.1

Хіміко-мінералогічний склад портландцементних клінкерів

	Вміст оксидів, мас. %							Мінералогічний склад, мас. %			
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	R ₂ O	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
ПАТ «Івано-Франківськцемент»	21,45	5,21	4,84	66,18	0,95	0,72	0,65	60,22	16,86	5,60	14,62
ПАТ «Волинь-цемент»	22,09	5,13	4,62	65,62	0,86	0,81	0,87	61,28	17,10	5,76	4,04



Таблиця 2.2

Фізико-механічні властивості портландцементів
(ДСТУ Б В.2.7-188:2009, ДСТУ Б В.2.7-185:2009, ДСТУ Б В.2.7-187:2009)

Тип цементу	Речовинний склад портландцементу, мас. %			S _{пит.} , М ² /КГ	A ₀₀₈ , %	НГТ, %	Терміни тужавіння, год-хв		Границя міцності на стиск, у віці, діб, МПа		
	клінкер	ДГШ*	гіпс				початок	кінець	2	7	28
ПЦ II/A-III-500 ПАТ «Волинь-цемент»	80	20	5	360	1,8	26,5	2-30	4-00	25,0	38,7	52,5
ПЦ I-500-Н ПАТ «Івано-Франківськцемент»	95	-	5	340	1,6	25,0	2-20	4-20	20,5	38,5	51,4

ДГШ* - доменний гранульований шлак

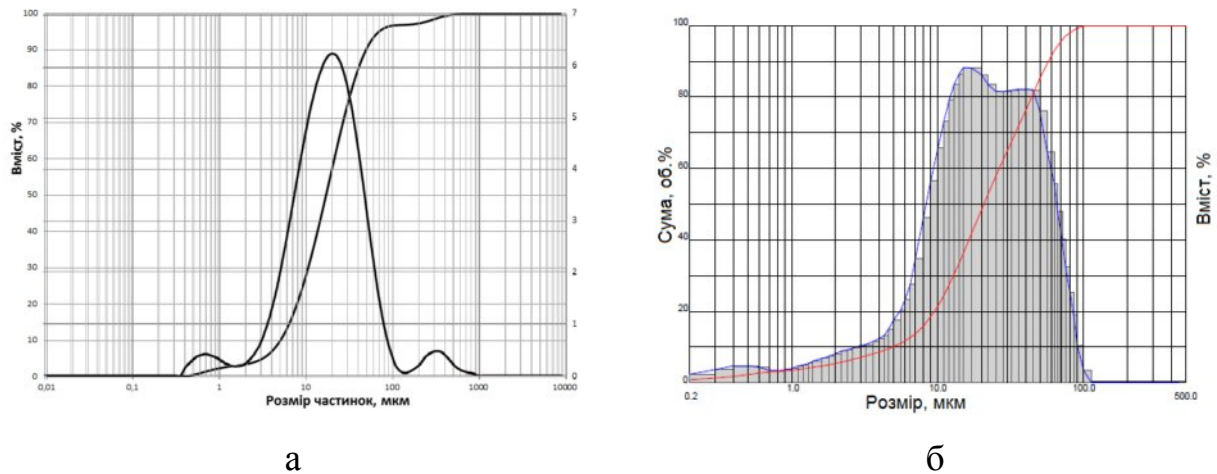


Рис. 2.1. Гранулометричний склад портландцементів: ПЦ I-500-Н (а) та ПЦ II/A-III-500 (б)

Таблиця 2.3

Характеристика фракційного складу портландцементів

Тип цементу	$S_{\text{пит}}$, $\text{м}^2/\text{кг}$	<10 мкм, %	<20 мкм, %	<60 мкм, %	D_{10} , мкм	D_{50} , мкм	D_{90} , мкм
ПЦ II/A-III-500	360	21,45	48,71	91,45	4,87	20,63	57,18
ПЦ I-500-Н	340	25,32	50,80	94,60	5,75	19,42	56,29

Вирішальний вплив на кінетику тверднення і міцність в'язучих мас вид і природа додаткових цементуючих матеріалів. Основними складовими додаткових цементуючих матеріалів є оксиди CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 . Оптимізація співвідношення додаткових цементуючих матеріалів зумовлює можливість одержання цементуючих систем, що забезпечують підвищення технологічних та експлуатаційних властивостей високоміцних фібробетонів на їх основі. Як мінеральні добавки при розробленні високоміцних та високонаповнених фіброармованих бетонів у роботі використано високодисперсний метаколін (МК) виробництва ТОВ «Західна каолінова компанія» з питомою поверхнею $15 \text{ м}^2/\text{г}$ (табл. 2.4) та золу-винесення Бурштинської ТЕС.

Метакаолін – активна мінеральна добавка, яку одержують при термічній обробці каоліну. Контрольовані умови виробництва забезпечують отримання однорідного продукту за розподілом частинок за розмірами, питомою поверхнею і оксидним складом.

Таблиця 2.4

Показники якості метакаоліну

Найменування показника	Значення показника
Абразивність, мг	79,4
Залишок на ситі № 0063, %	1,32
Насипна густина, кг/м ³	304
Питома поверхня, м ² /г	15
Вологість, %	не більше 1
Колір	білий порошок

За хімічним складом метакаолін є алюмосилікатною добавкою, вміст основних оксидів SiO₂ та Al₂O₃ становить 53,42 та 43,80 % відповідно (табл. 2.5) та задовольняє вимоги ДСТУ Б В.2.7-128-2006, що ставляться до техногенної пуцолани.

Таблиця 2.5

Хімічний склад мінеральних добавок

	Вміст оксидів, мас.%								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	R ₂ O	SO ₃	ВПП
Метакаолін	53,42	43,80	0,75	0,58	0,45	0,30	-		1,2
Зола-винесення	53,72	21,76	11,34	1,51	4,83	2,15	1,80	0,35	2,54

Згідно з даними гранулометричного аналізу (рис. 2.2, а) розподіл зерен за фракціями метакаоліну виражається широким діапазоном розмірів від 0,1 до 200 мкм, а максимум на диференційній кривій розподілу частинок за

розмірами знаходиться в межах 10-20 мкм. Ефективні діаметри D_{10} , D_{50} та D_{90} становлять відповідно 3,65; 17,13 та 73,67 мкм, при середньому діаметрі частинок 30,01 мкм (табл. 2.6).

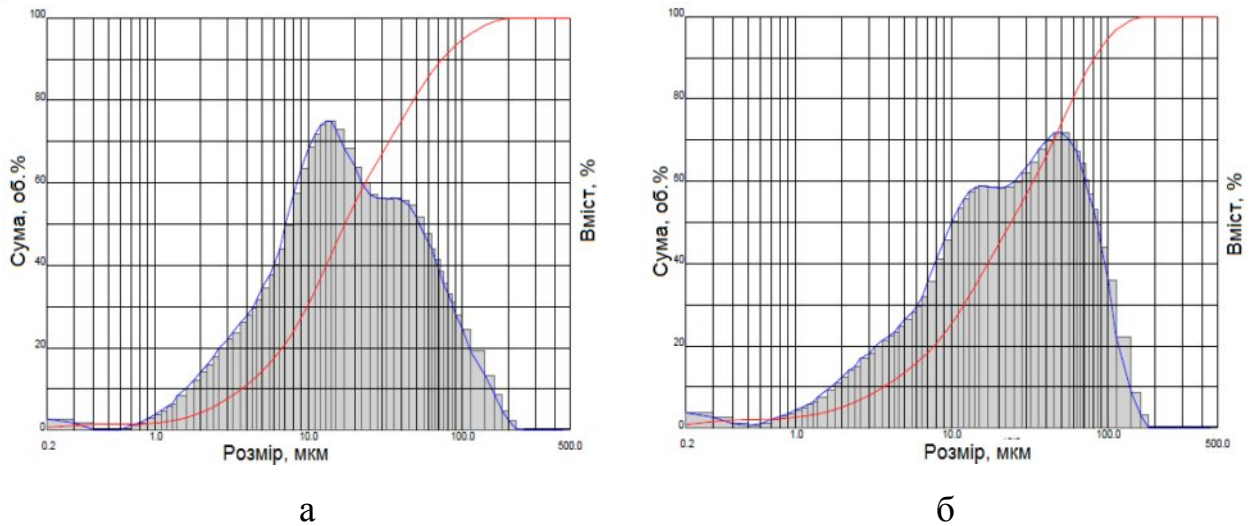


Рис. 2.2. Гранулометричний склад метакаоліну (а) та золи-винесення (б)

Таблиця 2.6

Характеристика фракційного складу мінеральних добавок

Добавка	<10 мкм, %	<20 мкм, %	<50 мкм, %	D_{10} , мкм	D_{50} , мкм	D_{90} , мкм
Метакаолін	30,73	55,22	81,15	3,65	17,13	73,67
Зола- винесення	25,47	44,86	87,66	3,66	23,87	81,59

Зола-винесення утворюється при спалюванні вугілля на теплових станціях. При температурі до 1300°C такі речовини утворюють алюмосилікатне скло у вигляді золи, яка підхоплюється димовими газами і осідає на електрофільтрах. Під час розробки та дослідження самоущільнювальних та високонаповнених дисперсно-армованих бетонів використовували золу-винесення Бурштинської ТЕС (табл. 2.7).

Таблиця 2.7

Фізичні властивості золи-винесення Бурштинської ТЕС

Найменування показника	Середнє значення показника
Істинна густина, г/см ³	3,0
Насипна густина, кг/м ³	1250
Залишок на ситі 008, %	8,7

Дана зола характеризується стабільністю фізико-механічних характеристик, не містить вільного СаО та не проявляє здатності до залізного розпаду. Хімічний склад золи-винесення представлений оксидами SiO₂ (53,72 %), Al₂O₃ (21,76 %) та Fe₂O₃ (11,34 %) (табл. 2.5). Гідравлічна активність за поглинанням СаО золи-винесення Бурштинської ТЕС складає 42,3 мг/г.

За дисперсністю дана зола відноситься до класу А (питома поверхня більше 300 м²/кг). Вміст зерен розміром більше 0,08 мм складає 8,7 мас.%. Згідно даних гранулометричного аналізу (рис. 2.2, б), розподіл зерен за фракціями золи-винесення Бурштинської ТЕС виражається широким діапазоном розмірів від 0,2 до 180 мкм, а максимум на диференційній кривій розподілу частинок за розмірами знаходиться в межах 20-60 мкм. Згідно з даних фракційного складу золи-винесення (табл. 2.6), вміст частинок Ø≤10; Ø≤20 і Ø≤50 мкм складають відповідно 25,47; 44,86; та 87,66 %, а вміст зерен з розмірами менше 3,66; 23,87 і 81,59 мкм становить 10, 50 і 90 % відповідно. Активні мінеральні добавки зола-винесення та метакаолін відповідають вимогам ДСТУ Б В.2.7-128-2006 та ДСТУ Б В.2.7-176:2008 щодо їх використання у цементах та бетонах.

Армувальним елементом на макромасштабному рівні (мезорівень цементного бетону) використано модифіковану базальтову фібру РБР-18-т10 ТзОВ „Технобазальт-Інвест” (м. Київ) довжиною 12, 24 та 36 мм, виготовлену з базальтового ровінгу за ТУ У В.2.7-26.8-34323267-002:2009 (рис. 2.5).



Рис. 2.3. Загальний вигляд базальтових волокон

До технічних переваг використання базальтової фібри належить забезпечення тривимірного армування суміші, збільшення міцності бетону на стиск та розтяг при згині, стійкості до стирання, підвищення водонепроникності та морозостійкості. Основні параметри дисперсного базальтового волокна наведені в табл. 2.8.

Таблиця 2.8

Основні характеристики базальтових волокон

Показники	Значення
Довжина, мм	12, 24, 36
Діаметр елементарних ниток (монофіламентів), мкм	13 – 20
Термічна стійкість, °С	145
Міцність на розтяг, МПа	<6

Для випробування портландцементів та дисперсно-армованих цементуючих систем використано поліфракційний кварцовий пісок згідно ДСТУ Б В.2.7-189:2009 та EN 196-1. Як дрібні заповнювачі для приготування самоущільнювальних бетонів, армованих базальтовою фіброю, використовували кварцовий пісок Жовківського родовища Львівської області

та щебневий відсів фракції 2-5 мм. Зерновий склад дрібних заповнювачів представлений на рис. 2.4. Аналіз отриманого гранулометричного розподілення свідчить, що пісок Жовківського родовища Львівської області визначається високим вмістом дрібних фракцій (рис. 2.4, а) і відноситься до групи дрібних ($M_k=1,77$). Крива розсіювання Жовківського піску не входить в область пісків, що допускаються для важкого бетону згідно ДСТУ Б В.2.7-32-95 (рис. 2.3, б), і вимагає збагачення крупними фракціями. Основна мета збагачення - забезпечення необхідного зернового складу піску. Для покращення гранулометрії дрібного заповнювача його змішували з піском з відсіву подрібнення фракції 2-5 мм (модуль крупності $M_k=4,97$). Пісок з відсіву подрібнення фракції 2-5 мм відноситься до крупних пісків, крива розсіювання якого виходить за область допустимих значень гранулометричного складу дрібних заповнювачів для бетонів. Показники якості кварцового піску та піску з відсіву подрібнення для виготовлення важких бетонів наведено в табл. 2.9.

Таблиця 2.9

Показники якості заповнювачів (ДСТУ Б В.2.7-232:2010)

Заповнювач	Характеристики				
	Модуль крупності, M_k	Насипна густина, ρ_n , кг/м ³	Істинна густина, $\rho_{іст}$, г/см ³	Пустотність, %	Вміст пиловидних і глинистих домішок, %
Жовківський пісок	1,77	1472	2,62	43,8	0,6
Відсів щебеню (2-5 мм)	4,97	1385	2,64	47,5	-
Щебінь (5-10 мм)	-	1520	2,62	42,0	-

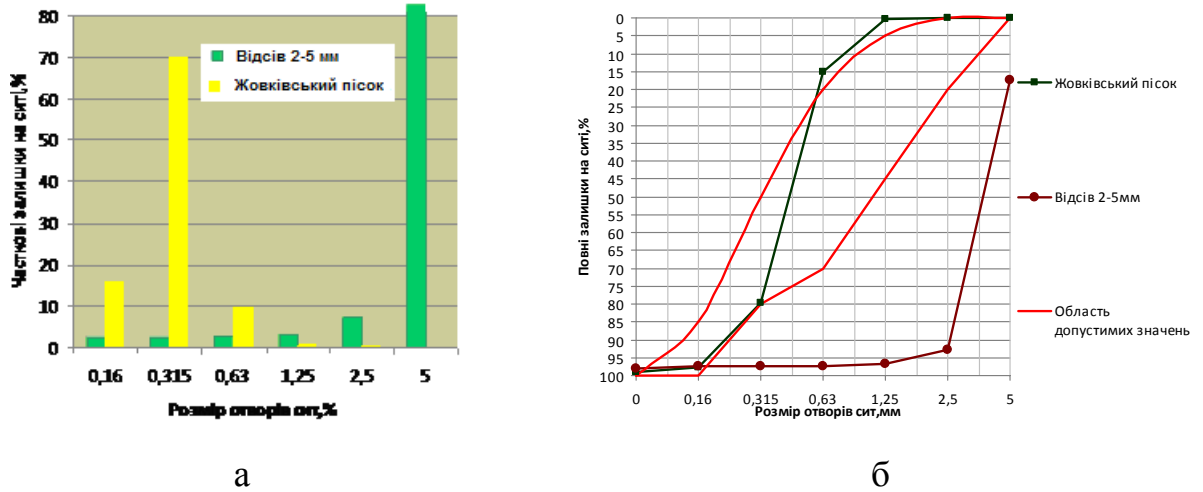


Рис. 2.4. Фракційні склади (а) та криві розсіювання (б) дрібних заповнювачів

Крупним заповнювачем для приготування самоущільнювальних бетонів служив гранітний щебінь Віровського родовища фракції 5-10 мм з насипною густиною – 1520 кг/м^3 , пустотністю – $42,0\%$, істинною густиною – $2,62 \text{ г/см}^3$, дробимістю $D_p=8\%$, без глинистих та пилюватих частинок. Використаний щебінь Віровського родовища відповідає вимогам ДСТУ Б В.2.7-74-98 для приготування важких бетонів за гранулометричним складом (рис. 2.5) та показниками якості (табл. 2.9).

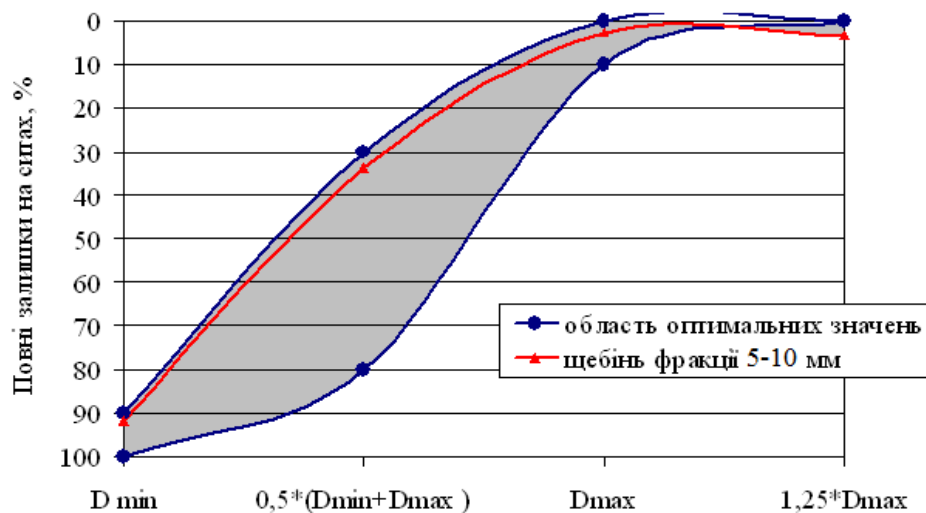


Рис. 2.5. Крива розсіювання щебеню Віровського родовища

Модифікування структури та реологічних властивостей дисперсно-армованих цементуючих систем та бетонних сумішей на їх основі

здійснювали за допомогою суперпластифікаторів полікарбоксилатного типу (ПК) Basf Glenium ACE 430 (табл. 2.10). Суперпластифікатори на основі полікарбоксилатів – суміш синтетичних, розчинних у воді поверхнево-активних розгалужених прищеплених кополімерів та полімерів, що відрізняються від традиційних типом і значно меншою кількістю іонних груп. За показниками вмісту хлоридів та лугів суперпластифікуюча добавка Glenium ACE 430 відповідає вимогам ДСТУ Б В.2.7-65.

Для отримання оптимальної в'язкості та однорідності самоущільнювальної бетонної суміші використовували високоефективну добавку на основі водного розчину високомолекулярного синтетичного полімеру - RheoMATRIX®100. Використана добавка дозволяє досягти оптимальної в'язкості бетонної суміші, забезпечуючи баланс між рухливістю і стійкістю до розшарування. Технічна характеристика хімічного модифікатора Basf RheoMATRIX®100 наведена в табл. 2.10.

Таблиця 2.10

Технічна характеристика хімічних модифікаторів

Добавка	Вміст сухої речовини, %	Густина при 20 °С, г/см ³	рН при 20°С	Вміст хлоридів, мас.%	Вміст лугів (Na ₂ O екв.), мас.%
Glenium ACE 430	25 ±1,25	1,060±0,02	5,5±1,5	≤ 0,01	менше 0,6
RheoMATRIX 100	-	1,0 – 1,02	6 – 9	≤ 0,1	-

2.2. Фізико-механічні випробування

Фізико-механічні випробування портландцементів та дисперсно-армованих цементуючих систем для самоущільнювальних бетонів проводили

згідно з ДСТУ Б.В. 2.7-185:2009, ДСТУ Б.В. 2.7-187:2009 та ДСТУ Б.В. 2.7-188:2009 і охоплювали визначення нормальної густоти та термінів тужавіння цементного тіста, границі міцності на стиск та згин, тонини помелу. Дослідження тонини розмелювання портландцементів й мінеральних добавок проводили ситовим аналізом та визначенням питомої поверхні на поверхнемірі ПМЦ-500, а розподіл частинок за розмірами – за допомогою лазерного аналізатора зернистості Cilas 990 Liquid. З метою уніфікації та гармонізації якісних показників в'язучих проведені фізико-механічні випробування портландцементів та дисперсно-армованих цементуючих систем згідно з ДСТУ EN 196-1:2007 при В/Ц=0,50. Седиментаційну стійкість портландцементів та цементуючих систем з ультра дисперсними мінеральними добавками оцінювали за показником водовідділення згідно з ДСТУ Б В. 2.7-186:2009.

Показники міцності портландцементів та цементуючих систем досліджували на зразках-кубиках $2 \times 2 \times 2$ см та зразках-балочках $4 \times 4 \times 16$ см дрібнозернистого бетону складу 1:1,5; 1:2; 1:3. Міцність зразків визначали через 2, 7 та 28 діб тверднення в нормальних та повітряно-сухих умовах.

Проектування складу бетону проводили методом абсолютних об'ємів з врахуванням рекомендацій ДСТУ Б В.2.7-215:2009. Технологічні властивості самоущільнювальних бетонних сумішей дисперсно-армованих бетонів визначали згідно з ДСТУ Б В.2.7-114-2002 та аналізували за допомогою спеціальних методів оцінки якості, рекомендованих європейською комісією з самоущільнювального бетону (EFRAКС) згідно EN 12350. Показник текучості визначали як середнє значення діаметру розпливання конуса, а умовну в'язкість – як час до розпливання конуса 500 мм. Визначення здатності до самоущільнення за можливістю долати перешкоди у вигляді близьковстановлених арматурних стержнів проводили J-кільцевим методом (EN 12350-12:2010). Розшаровування бетонних сумішей SR оцінювали як відношення мас щебеню бетонної суміші із верхньої і

нижньої частини трубчастої форми після її вібрування тривалістю 10 с (за аналогією з ДСТУ Б В.2.7-114-2002).

Визначення повітревтягування бетонної суміші здійснювали згідно ДСТУ Б В.2.7-114:2000. Об'єм втягнутого повітря у суміші на щільному заповнювачі визначали об'ємним методом (з допомогою об'ємоміра Testing) (рис. 2.6).

Виготовлення зразків високоміцних самоущільнювальних фібробетонів та самоущільнювальних фібробетонів з високим вмістом золи-винесення проводили за ДСТУ Б В.2.7-214:2009 та ДСТУ Б В.2.7-176:2008 (EN 206-1:2000, NEQ) у металевих формах-кубах розміром 10x10x10 та 15x15x15 см. Зразки зберігали в нормальних умовах тверднення (температура 20 ± 2 °C, відносна вологість $95 \pm 2\%$), а також при знакозмінних температурах.



Рис. 2.6. Об'ємомір для визначення повітревтягування бетонної суміші

Введення комплексних хімічних добавок до цементуючих систем та бетонних сумішей на їх основі і визначення ефективності їх дії здійснювали згідно ДСТУ-Н Б В.2.7-175:2008, ДСТУ Б В.2.7-69-98 та ДСТУ Б В.2.7-171:2008 (EN 934-2:2001)

Границю міцності при стиску самоущільнювальних фібробетонів визначали за ДСТУ Б В.2.7-214:2009. Призмову міцність, модуль пружності та коефіцієнт Пуассона самоущільнювальних бетонів, армованих дисперсним

базальтовим волокном, визначали згідно з ДСТУ Б В.2.7-217:2009 на зразках-призмах розміром 10x10x40 см (рис. 2.7).

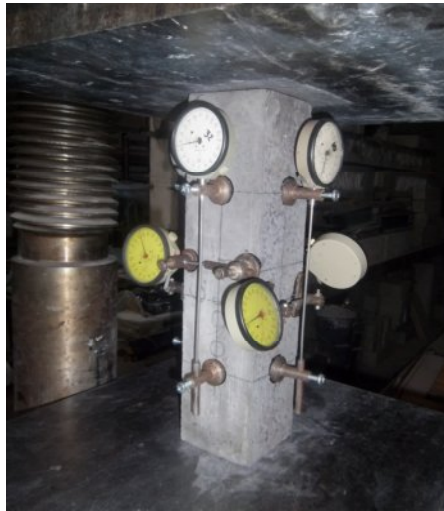


Рис. 2.7. Визначення модуля пружності та коефіцієнта Пуассона самоущільнювальних фібробетонів

Випробування самоущільнювальних фібробетонів на розтяг при згині проводили на зразках-призмах розміром 10x10x40 см за схемою, наведеною на рис. 2.8.

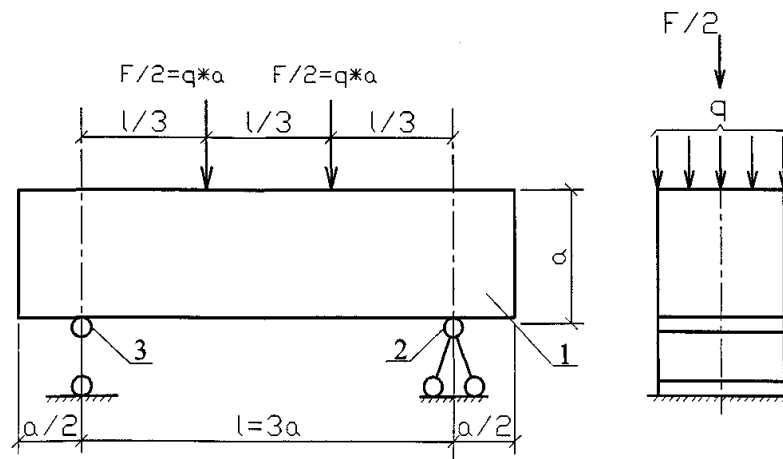


Рис. 2.8. Схема випробувань на розтяг при згині: 1 – зразок-призма; 2 – нерухома опора; 3 – рухома опора

Визначення середньої густини, водопоглинання, пористості та водонепроникності самоущільнювальних дисперсно-армованих бетонів, здійснювали згідно з ДСТУ Б В.2.7-170:2008. Характер порової структури

каменю, отриманого в результаті тверднення дисперсно-армованих суперпластифікованих цементуючих систем, визначали за кінетикою водопоглинання при насиченні їх водою шляхом дискретного зважування.

Для цементного каменю характерні значні деформації усадки, які викликають появу тріщин в бетоні, що зменшує міцність, водонепроникність та морозостійкість виробів та конструкцій. Деформації усадки вимірювали за допомогою індикатора годинникового типу (ціна поділки 0,001 мм) у терміни визначені ДСТУ Б В.2.7-216:2009 (рис. 2.9).



Рис. 2.9. Визначення деформацій усадки дисперсно-армованих цементуючих систем

Випробування корозійної стійкості (клас впливу навколишнього середовища ХА) самоущільнювальних фібробетонів проводили згідно з ДСТУ Б ГОСТ 27677:2011 шляхом порівняння міцності на стиск та згин зразків, виготовлених з фібробетонної суміші, з якої мокрим розсіюванням видалена крупна фракція, поміщених в агресивне середовище натрію сульфату (концентрація $\text{SO}_4^{2-}=10$ г/л), з аналогічними показниками зразків, які зберігались в неагресивному середовищі (питна вода).

Корозійну стійкість дрібнозернистих самоущільнювальних фібробетонів (Ц:П=1:2) також визначали згідно з прискореною методикою

KVP за зміною міцності зразків в сульфатному середовищі (концентрація $\text{SO}_4^{2-}=30$ г/л) [44]. Частину зразків через одну добу тверднення поміщали у воду з температурою $+20$ °С, а другу частину – в розчин Na_2SO_4 . Корозійну стійкість оцінювали за коефіцієнтом корозійної стійкості при згині (Кзг), що рівний відношенню міцності на згин після витримування 8 тижнів в агресивному середовищі ($R_{\text{агр}8}$) до міцності на згин зразків, що тверднули 8 тижнів у воді ($R_{\text{в}8}$).

Визначення стираності розроблених самоущільнювальних високонаповнених бетонів проводили згідно з ДСТУ Б В.2.7-212:2009 на крузі стирання ЛКИ-3, застосовуючи зразки-куби $7,07 \times 7,07 \times 7,07$ см (рис. 2.10). Як абразивний матеріал використовували монодисперсний пісок з модулем крупності $M_k=2,3$.



Рис. 2.10. Визначення стираності самоущільнювального бетону на крузі стирання ЛКИ-3

Випробування розроблених самоущільнювальних бетонів, армованих дисперсною базальтовою фіброю, на стійкість до ударних навантажень визначали за допомогою маятникового механічного копра МК-0,5 (рис. 2.11). Ударна в'язкість або границя міцності самоущільнювальних дисперсно-армованих при ударному згині чисельно характеризується величиною роботи, яку треба затратити, щоб зруйнувати досліджуваний зразок.



Рис. 2.11. Визначення ударної міцності бетону

Дослідження висолостійкості серії зразків-балочок 40x130x160 мм дрібнозернистого самоущільнювального бетону проводили згідно з ДСТУ Б В.2.7-65-97. Через 28 діб тверднення в нормальних умовах зразки на 30 мм занурювали гранню 40x130 мм у дистильовану воду. Поверхню зразків, що знаходилась над водою, обдували повітрям з температурою $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ не менше 3 год щоденно протягом 7 діб.

Дослідження морозостійкості (стійкість до впливу навколишнього середовища клас XF) розроблених самоущільнювальних армованих бетонів проводили за прискореною методикою в термокамері HS280/75 при температурі -50°C згідно ДСТУ Б В.2.7-49-96. Розморожування зразків здійснювали у ванні з 5%-ним водним розчином натрію хлориду при температурі $20 \pm 2^\circ\text{C}$. Визначення марки за морозостійкістю розроблених бетонів проводили згідно ДСТУ Б В.2.7-47-96.

2.3. Фізико-хімічні методи дослідження

Розподілення частинок за розмірами порошкоподібних дисперсних систем досліджували за допомогою лазерного аналізатора Cilas 990 Liquid з

діапазоном вимірювань 0,2 до 500 мкм. Для оброблення даних використовувався програмний комплекс Size Expert Software. Вимірювання полягало в проходженні проби порошкоподібного матеріалу перпендикулярно до лазерного пучка та визначення розподілу дисперсності за розмірами в дифракційному спектрі.

Хімічні склади досліджуваних цементів та активних мінеральних добавок визначали рентгеноспектрометром ARL 9800 XP, в основі роботи якого лежить рентгено-флюоросцентний метод: на радієву рентгенівську трубку подається висока напруга, проходить вибивання електронного пучка, який попадає на пробу та вибиває електрони, які попадають на кристал. Від кристалу пучок заломлюється і поступає на детектор, який зчитує інтенсивність хвилі кожного елемента. Результати надходять до розрахункової програми в комп'ютер, котрий видає кількісний аналіз.

Визначення температури, при якій змінюється фізичний стан речовини або її хімічний склад, проводили методом диференційно-термічного аналізу на дериватографі ОД-1500Q. Дериватограми гідратованого ПЦ I-500-Н, ПЦ II/A-III-500 та самоармованих цементуючих систем знімали при масі наважки 500 мг та швидкості піднімання температури 10°C/хв [44].

Визначення фазового складу цементуючих систем проводили за допомогою методу рентгенофазового аналізу [17]. Дослідження виконували методом порошків на дифрактометрі ДРОН-4.0 при CuK_α -випромінюванні. Експериментальні зразки подрібнювали до повного проходження крізь сито № 008. Приготовану пробу наносили на кварцову кювету, яка встановлювалась на гоніометричний пристрій ГУР-5. За допомогою детектора рентгенівського випромінювання, в якості якого застосовувався сцинтиляційний лічильник з швидкістю підрахунку 500 імп/с, записували дифрактограми в інтервалі кутів $2\theta=6-45^\circ$.

Дослідження мікроструктури каменю та основі дисперсно-армованого дрібнозернистого бетону проводили за допомогою растрового електронного мікроскопу РЕМ-106И.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА САМОУЩІЛЬНЮВАЛЬНИХ БЕТОНІВ, АРМОВАНИХ БАЗАЛЬТОВОЮ ФІБРОЮ

Однією з найголовніших фундаментальних проблем розроблення та впровадження самоущільнювальних бетонів є забезпечення їх високої технологічності, що визначає максимальне уникнення трудомістких операцій при спорудженні будівельних об'єктів, і широкого спектру функціональних можливостей та властивостей, які окреслюють довговічність та безпеку будівельних конструкцій в різних умовах експлуатації [23, 28]. На сучасному етапі розвитку будівельного матеріалознавства можливість розроблення бетонів з необхідними експлуатаційними властивостями, в т. ч. підвищеною ударною міцністю та тріщиностійкістю досягається за рахунок керованого структуроутворення та комплексного багаторівневого модифікування його структури добавками різного функціонального призначення в поєднанні з армувальними волокнами.

3.1. Вплив хімічних модифікаторів та мінеральних добавок на властивості цементуючих систем, армованих базальтовою фіброю

Отримання довговічних самоущільнювальних бетонів досягається за рахунок виконання багатьох вимог: використання якісних цементів та заповнювачів, максимально низького водоцементного співвідношення, високої максимально допустимої витрати портландцементу, застосування суперпластифікаторів нової генерації і комплексних органо-мінеральних добавок, що сприяють ущільненню структури бетону, особливо ретельне

перемішування, транспортування та вкладання бетонної суміші, створення найсприятливіших умов тверднення бетону.

Використання дисперсно-армованих бетонних сумішей підвищеної рухливості у густоармованих конструкціях із збереженням однорідності та відсутністю розшарування компонентів при вкладанні та транспортуванні вимагає використання комплексних хімічних і мінеральних добавок. При цьому застосування хімічних добавок на основі полікарбоксилатів є ефективним засобом регулювання реологічних властивостей бетонних сумішей, необхідного модифікування структури цементного каменю в бетоні та самого бетону, а отже, покращання його фізико-механічних характеристик і довговічності.

У зв'язку з цим, в роботі досліджено вплив добавки пластифікуючої групи на основі полікарбоксилатів Glenium ACE 430 (ПК) на реологічні та фізико-механічні властивості дрібнозернистих бетонів номінального складу Ц:П=1:2, що відповідає співвідношенню в'язуче:дрібний заповнювач у бетонах, з вихідним водоцементним співвідношенням В/Ц=0,32 (рис. 3.1).

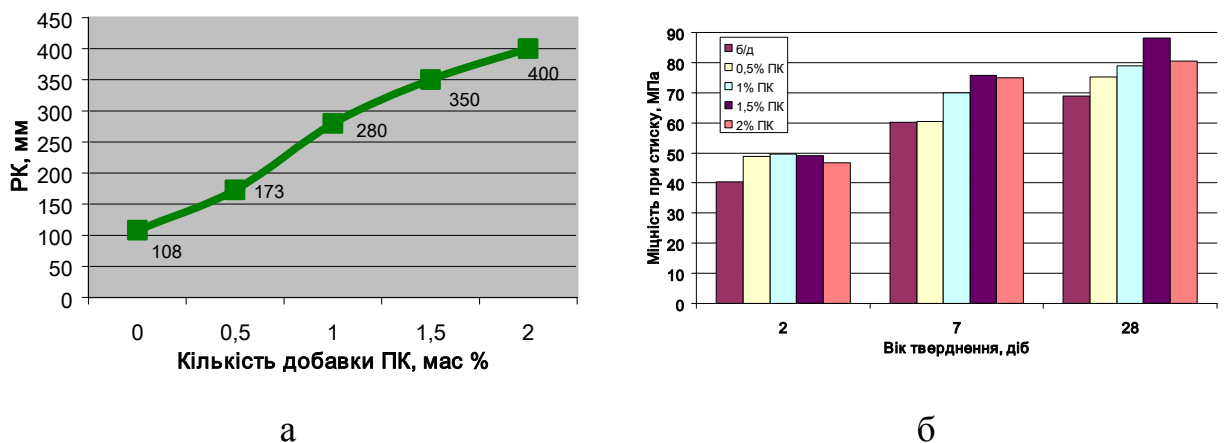


Рис. 3.1. Вплив суперпластифікатора Glenium ACE 430 на рухливість (а) та міцність на стиск (б) дрібнозернистих бетонів

При введенні суперпластифікатора на полікарбоксилатній основі рухливість дрібнозернистих бетонів (Ц:П=1:2, В/Ц=0,32) суттєво зростає із збільшенням кількості добавки. Так, введення 0,5 мас.% добавки Glenium

АСЕ 430 забезпечує зростання рухливості дрібнозернистої бетонної суміші з 110 до 173 мм. При введенні 1,5 та 2 мас. % добавки розплив конуса зростає до 350 мм та 400 мм відповідно, що відповідає вимогам щодо самоущільнення. Пластифікуючий ефект введення полікарбоксилатного пластифікатора становить 60 і 270% при використанні 0,5 і 2 мас.% добавки відповідно (рис. 3.1, а). Слід відзначити, що міцність при стиску (рис. 3.1, б) дрібнозернистого бетону, модифікованого 0,5-1,5 мас. % добавки СП, збільшується із зростанням рухливості суміші в усі терміни тверднення. Так, збільшення міцності на стиск дрібнозернистого бетону з 1 мас. % добавки суперпластифікатора, через 2 доби зростає на 17%, через 7 діб міцність збільшується в 1,4 рази порівняно із дрібнозернистим бетоном без добавок, а через 28 діб досягає 78,4 МПа. При вмісті 2 мас.% суперпластифікатора спостерігається незначний спад міцності дрібнозернистого бетону з високорухливих сумішей ($R_K=400$ мм) в усі терміни тверднення порівняно з композитом, модифікованим 1,5 мас.% суперпластифікатора.

Аналогічно відбувається приріст міцності на згин модифікованих дрібнозернистих бетонів з високорухливих сумішей, модифікованих добавкою Glenium ACE 430 (рис. 3.2). При збільшенні дозування суперпластифікатора до 1,5 мас.% спостерігається максимальне зростання міцності на згин через 2 та 28 діб в 1,5 рази порівняно з міцністю на згин дрібнозернистого бетону без добавок.

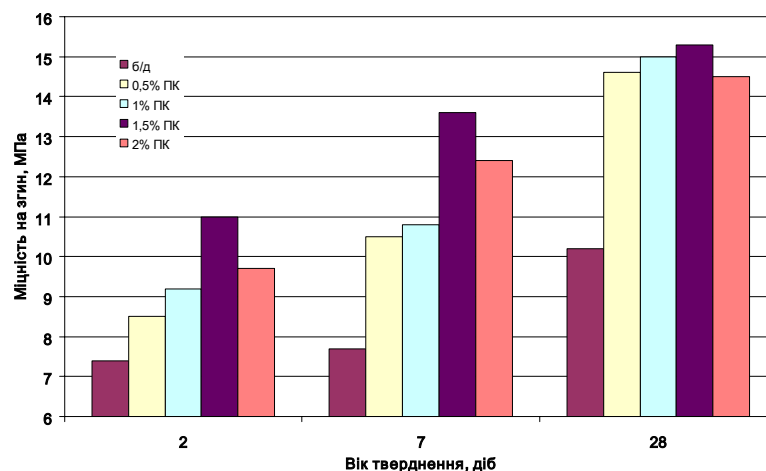


Рис. 3.2. Міцність на згин дрібнозернистих бетонів з добавкою суперпластифікатора Glenium ACE 430

При введенні 2 мас.% Glenium ACE 430 міцність на згин дрібнозернистого бетону знижується на 12-15% в ранні терміни порівняно з бетоном, модифікованим 1,5 мас.% добавки-суперпластифікатора. З часом тверднення бетон при введенні 2 мас. % добавки Glenium ACE 430 інтенсивніше набирає міцність на згин і через 28 діб вона зменшується на 5,3% порівняно з міцністю бетону, модифікованого 1,5 мас.% добавки.

Для отримання в'язучого з необхідними реологічними та високими міцнісними властивостями значний практичний інтерес представляє регулювання дисперсності системи за рахунок використання різних типів мінеральних компонентів. Дисперсні мінеральні добавки здатні оптимізувати умови використання хімічних добавок-модифікаторів за рахунок підвищення однорідності та водоутримувальної здатності високорухливих сумішей, знижуючи вміст портландцементу, суттєво впливають на фізико-механічні показники завдяки підвищенню якості контактної зони „мінеральна добавка – портландцемент”. Мінеральні добавки беруть участь у формуванні структури цементного каменю, вступаючи у взаємодію з продуктами гідратації портландцементу з утворенням високодисперсних продуктів гідратації.

Основною характеристикою бетонної суміші для одержання бетонів нової генерації, зокрема самоущільнювальних, є її висока текучість без сегрегації фаз при транспортуванні та формуванні, що визначається оптимальними показниками рухливості та в'язкості, механізмом для контролю яких є присутність ефективного суперпластифікатора, якість цементного тіста і хімія поверхні частинок дрібної фракції (портландцементу, мікронаповнювачів, мінеральних добавок). Показник рухливості цементного тіста з добавками-модифікаторами визначали як середнє значення діаметру розпливу циліндра Суттарда, а умовну в'язкість – як час до розпливання 250 мм.

Рухливість цементних систем, що задовольняє вимоги до самоущільнення (розплив РЦ, виміряний за допомогою циліндра Суттарда,

становить понад 300 мм), досягається за рахунок використання суперпластифікаторів полікарбоксилатного типу. Для усунення негативних явищ у високорухливих портландцементних системах, а також зростання їх седиментаційної стійкості та швидкості тверднення необхідно використовувати цементуючі системи на основі портландцементу із застосуванням активних мінеральних добавок, мікронаповнювачів та хімічних добавок.

У роботі вивчено вплив ультрадисперсної мінеральної добавки метакаоліну, полікарбоксилатного суперпластифікатора Glenium ACE 430 на реологічні та фізико-механічні властивості портландцементу ПЦ ІІ/А-ІІІ-500. Дослідженнями впливу добавки суперпластифікатора на полікарбоксилатній основі на рухливість цементного тіста встановлено, що введення 2 мас.% ПК при постійному водовмісті В/Ц=0,25 забезпечує розплив циліндра Сутгарда 335 мм, а сумісне введення 2 мас.% ПК та 10 мас.% метакаоліну – 360 мм (рис. 3.3).

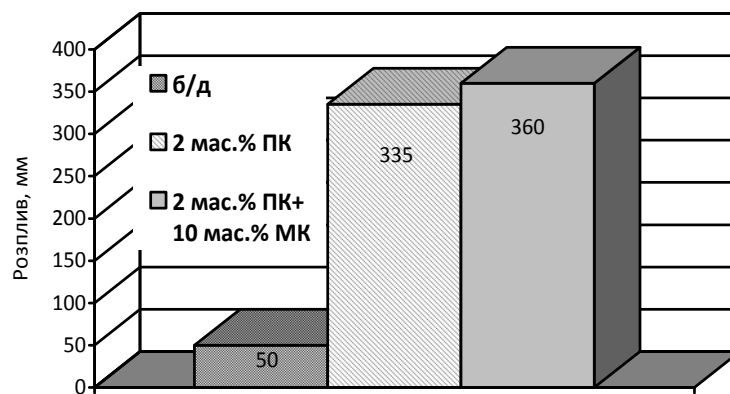


Рис. 3.3. Вплив добавок-модифікаторів на рухливість цементного тіста (1:0)

Синергічний ефект введення орґано-мінеральної добавки на рухливість цементних систем обумовлений оптимальним розподілом твердих частинок в системі, внаслідок чого вода розташовується не в пустотах, а між зернами матеріалу, відіграючи роль змазки, що створює сприятливі умови для ковзання частинок, мінімізації внутрішнього тертя і збільшення рухливості при однаковому водоцементному відношенні. Крім цього, в

присутності високодисперсних мінеральних добавок зростає ефективність дії суперпластифікаторів, адсорбційна дія яких максимально реалізується на межі розділу фаз.

Слід відзначити, що умовна в'язкість цементного тіста ($V/C=0,25$), визначена за часом розпливання до 250 мм, при введенні 2 мас.% полікарбоксилатного суперпластифікатора становить $\tau_{250}=4,5$ с. Введення до портландцементу, пластифікованого полікарбоксилатним суперпластифікатором, метакаоліну забезпечує збільшення умовної в'язкості цементного тіста до $\tau_{250}=5,6$ с при зростанні його рухливості (розплив циліндра Сутгарда 360 мм) (рис. 3.4), що створює оптимальні умови для одержання високорухливої, однорідної та стійкої бетонної суміші.

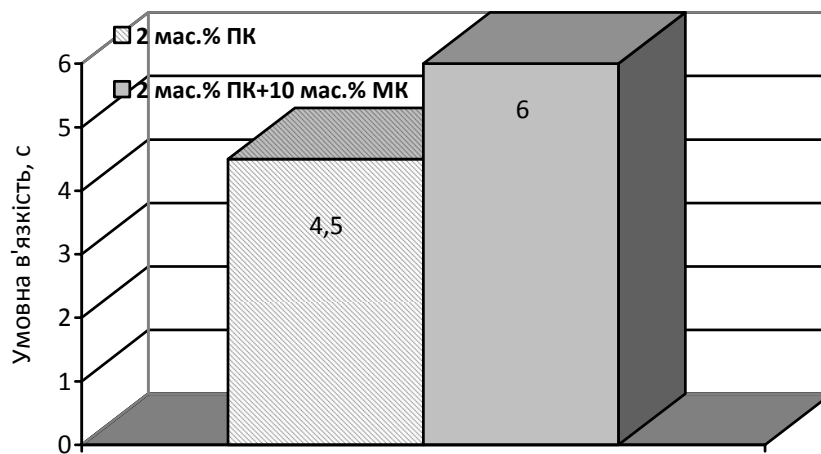


Рис. 3.4. Вплив добавок-модифікаторів на умовну в'язкість цементного тіста (1:0)

Дослідженнями впливу суперпластифікаторів полікарбоксилатного типу та метакаоліну на фізико-механічні властивості портландцементу встановлено (табл. 3.1), що портландцементний камінь з 1 мас.% добавки Glenium ACE 430 характеризується дещо нижчими показниками міцності на стиск і згин, порівняно з каменем без добавок, що зумовлено сповільненням гідратації в'язучого в присутності пластифікатора. Збільшення кількості суперпластифікатора забезпечує приріст міцності цементного каменю на стиск і згин у всі терміни тверднення. Так, приріст міцності на стиск

цементного каменю з 2 мас.% суперпластифікатора полікарбоксилатного типу через 2 доби тверднення складає $\Delta R_{ct2}=20\%$, через 7 діб – $\Delta R_{ct7}=14\%$, через 28 діб – $\Delta R_{ct28}=27\%$, а приріст міцності при згині $\Delta R_{зг2}=36\%$ і $\Delta R_{зг28}=14\%$ через 2 та 28 діб тверднення відповідно. Слід відзначити, що сумісне введення суперпластифікатора та метакаоліну (МК) спричиняє незначне зниження міцності на згин в ранні терміни, однак через 28 діб тверднення при введенні 2 мас.% та 10 мас.% МК приріст міцності цементного каменю на згин становить $\Delta R_{зг}=25\%$, на стиск $\Delta R_{ct}=17\%$.

Таблиця 3.1

Вплив суперпластифікатора полікарбоксилатного типу та метакаоліну на властивості портландцементу ПЦ ІІ/А-ІІІ-500 (тісто 1:0)

Вид і кількість добавок	В/В	Границя міцності на стиск/згин, МПа, у віці, діб		
		2	7	28
б/д	0,25	60,7/7,5	76,4/9,1	80,3/11,2
1 мас.% ПК	0,25	58,0/4,3	73,3/8,9	75,1/11,1
2 мас.% ПК	0,25	72,8/8,1	87,2/10,2	102,1/13,9
1 мас.% ПК + 10 мас.%МК	0,25	54,3/6,9	67,2/9,8	73,3/12,2
2 мас.% ПК + 10 мас.%МК	0,25	60,0/4,5	76,7/12,9	93,7/15,3

Одним із ефективних способів підвищення показників міцності та зниження деформативних характеристик бетонів є дисперсне армування. Волокна за своєю природою здатні сприймати більші напруження, ніж матриця розчину, тим самим зміцнюючи матеріал. Властивості дисперсно-армованого бетону визначаються властивостями його компонентів, а сам матеріал є композиційним матеріалом з додатково розподіленою в об'ємі фібровою арматурою. Основною функцією волокон у бетоні є зменшення в

ньому концентрації напружень, при цьому введення дисперсної арматури буде суттєво впливати на рухливість бетонних сумішей.

У роботі досліджено вплив довжини базальтової фібри на реологічні властивості високорухливих цементних систем на основі портландцементу ПЦ ІІ/А-Ш-500. Кількість фібри у дослідженнях приймали 0,5 мас.%. Дослідженнями рухливості цементного тіста, пластифікованого 1 мас.% добавки Glenium ACE 430, встановлено (рис. 3.5), що введення волокон базальтової фібри довжиною 12 мм спричиняє зниження рухливості цементного тіста від 335 до 320 мм, збільшення довжини фібри до 24 мм спричиняє зменшення розпливу до 310 мм, використання фібри довжиною волокон 36 мм – спричиняє зменшення розпливу до 300 мм. Зниження рухливості дисперсно-армованих цементних систем пов'язано із структуруванням суміші фібровими елементами, зростанням поверхні розділу фаз та необхідністю підвищення кількості води для її змочування, збільшенням внутрішнього тертя, обмеженим переміщенням компонентів матриці в присутності волокон. При цьому пластифіковані цементні системи, армовані базальтовою фіброю, за показниками рухливості задовольняють вимоги до самоущільнення ($РЦ \geq 300$ мм).

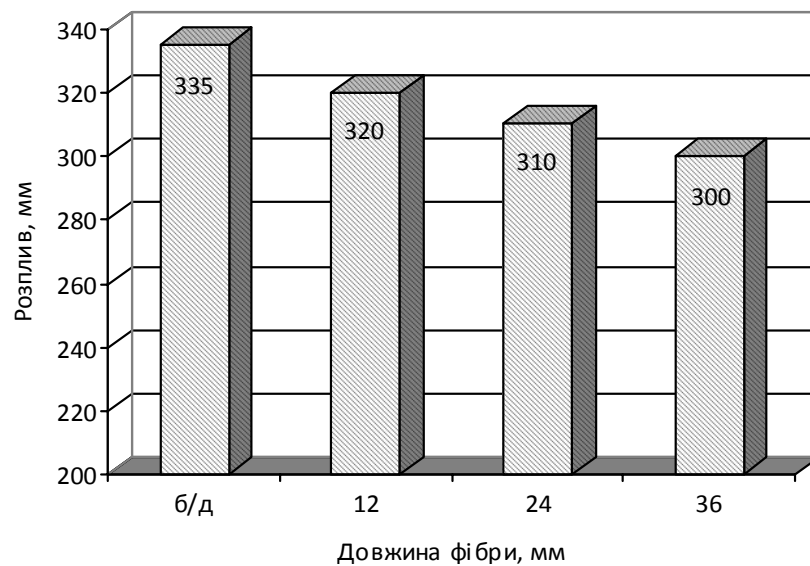


Рис. 3.5. Вплив довжини базальтової фібри на рухливість суперпластифікованого цементного тіста

Слід відзначити, що із збільшенням довжини фібри зростає і в'язкість цементного тіста (рис. 3.6). Так, умовна в'язкість цементного тіста з 2 мас. % полікарбоксилатного суперпластифікатора за часом розпливання до 250 мм становить 4,5 с. При введенні фібри довжиною волокон 12 мм показник в'язкості дисперсно-армованого цементного тіста зростає до 6,4 с. При використанні фібри довжиною 36 мм спостерігається різке збільшення в'язкості до 15,8 с.

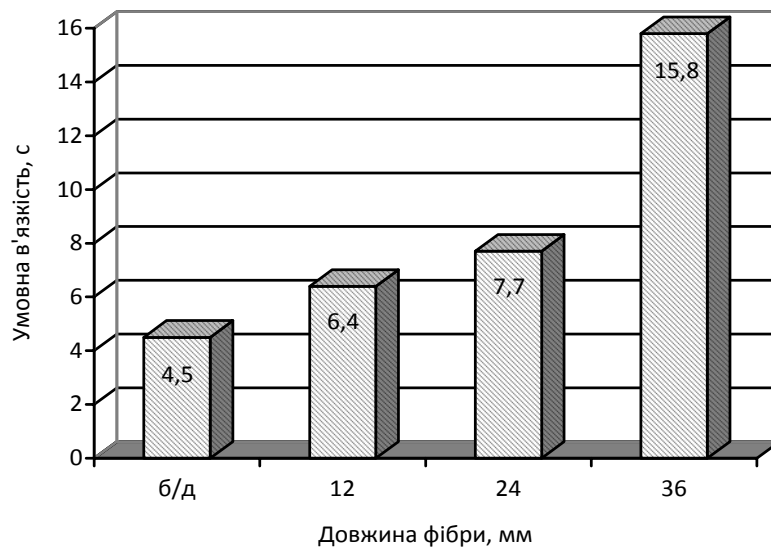


Рис. 3.6. Вплив довжини базальтової фібри на умовну в'язкість суперпластифікованого цементного тіста

Результати впливу довжини базальтової фібри на міцність цементного тіста показали (табл. 3.2), що найвищими показниками міцності на стиск та згин характеризуються зразки, армовані дисперсним волокном довжиною 24 мм. Так, міцність на стиск при введенні даної фібри в кількості 0,5 мас.% зростає на 6-12% у всі терміни тверднення, у той час як міцність на згин зростає на 12 % через 2 доби та на 20,5 % через 28 діб. Введення базальтової фібри довжиною 36 мм призводить до деякого зниження міцності при стиску цементного каменю, що зумовлено неоднорідністю розподілення фібри в об'ємі матеріалу. У зв'язку з цим, для подальших досліджень використано базальтову фібру довжиною 24 мм.

**Вплив довжини базальтової фібри на властивості портландцементу
ПЦ П/А-Ш-500 (тісто 1:0)**

Довжина волокон фібри, мм	НГТ	Границя міцності на стиск/згин, МПа, у віці, діб,		
		2	7	28
б/д	0,25	60,7/7,5	76,4/9,1	80,3/11,2
12	0,25	61,7/8,0	79,7/9,8	89,2/13,0
24	0,25	64,5/8,4	81,9/12,4	88,4/13,5
36	0,25	58,3/7,9	71,2/9,5	78,6/12,9

Суттєвий вплив на забезпечення необхідних експлуатаційних характеристик самоущільнювальних бетонів мають належні умови приготування, транспортування та догляду за бетоном, що залежить від навколишніх умов і визначається температурою та вологістю середовища. Це передбачає необхідність дослідження властивостей каменю на основі суперпластифікованих дисперсно-армованих портландцементних систем у нормальних ($t=20\pm 3^{\circ}\text{C}$, $\varphi\geq 95\%$) та повітряно -сухих ($t=20\pm 3^{\circ}\text{C}$, $\varphi=50-60\%$) умовах. Внаслідок нерівномірного розподілу вологісних та температурних деформацій за об'ємом, а також через обмеження деформацій зовнішніми зв'язками, їх поява супроводжується розвитком напружень в матеріалі та зниженням його міцності.

Тому в даній роботі проводили вивчення особливостей вологісних деформацій портландцементного каменю, модифікованого добавками полікарбоксилатного суперпластифікатора Glenium ACE 430 (ПК), метакаоліну МК та армованого базальтовою фіброю (ФБ), в повітряно-сухих умовах. Для порівняння досліджували деформації усадки цементного каменю на основі ПЦ П/А-Ш-500 з В/Ц=0,6, що забезпечує одержання рівнорухливого тіста з портландцементною системою, модифікованою 2

мас. % суперпластифікатора. Результати досліджень показали (рис. 3.7), що інтенсивні деформації усадки зразків відбуваються до 6 тижнів тверднення в повітряно-сухих умовах. Максимальними деформаціями усадки характеризується камінь на основі портландцементу ПЦ II/A-III-500 з підвищеним водоцементним відношенням ($V/C=0,6$). При цьому усадка стабілізується при значенні 2,6 мм/м. Введення полікарбоксилатного модифікатора забезпечує зменшення кількості води замішування для одержання високорухливого цементного тіста, при цьому деформації усадки становлять 1,7 мм/м.

Зниження внутрішньої відносної вологості призводить до виникнення в порах капілярних сил, які зумовлюють зменшення об'єму штучного каменю (процес „самообезводнення”) [30, 99], а також спричиняє деформації усадки та підвищення чутливості до тріщиноутворення. Усунення цих негативних явищ досягається шляхом дисперсного армування базальтовою фіброю за рахунок чого забезпечується створення початкового структурного каркасу і армований цементний камінь характеризується найменшими деформаціями усадки через 90 діб – 1,49 мм/м.

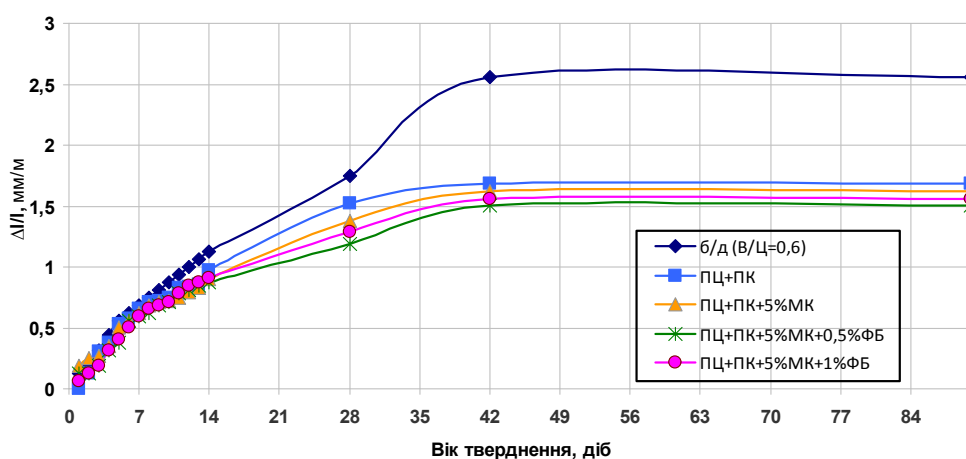


Рис. 3.7. Деформації усадки модифікованого портландцементного каменю

Для вивчення процесів структуроутворення при твердненні портландцементу, модифікованого органо-мінеральними добавками та базальтовою фіброю, визначали зміну маси зразків з часом тверднення в повітряно-сухих умовах.

Таблиця 3.3

**Зміна маси зразків портландцементного каменю у повітряно-сухих умовах тверднення
(зразки-балочки 4x4x16 см)**

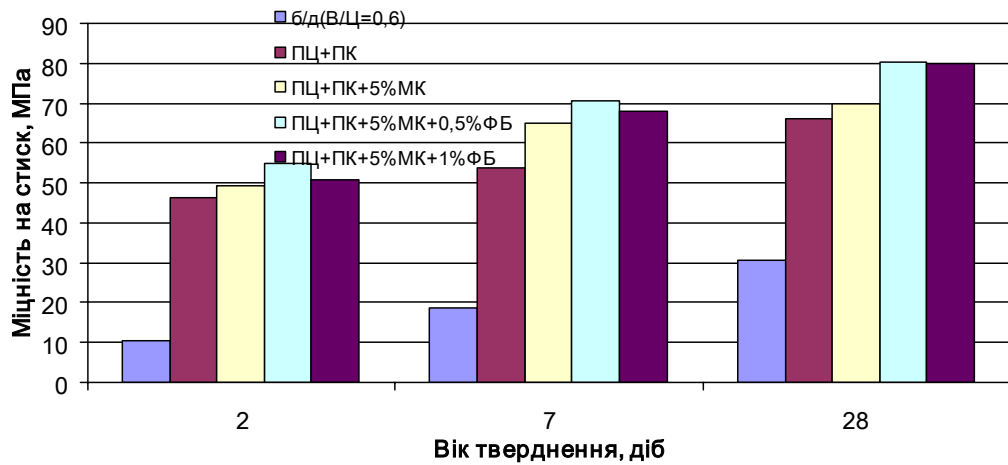
Цементна система	Характеристика зразка	Вік тверднення зразків, діб										
		1	2	3	4	5	6	7	14	28	42	90
б/д (В/Ц=0,6)	маса, г	384,6	383,4	380,8	375,1	374,6	372,3	371,2	368,0	359,4	355,2	355,2
	маса, %	100,00	99,09	99,01	97,53	97,40	96,80	96,52	95,68	93,45	92,36	92,36
ПЦ+ 2 мас.% ПК	маса, г	524,1	520,6	520,4	520,2	520,2	520,1	519,9	519,2	515,9	513,9	513,9
	маса, %	100,00	99,13	99,09	98,16	97,26	97,24	97,20	97,07	96,44	96,05	96,05
ПЦ+2 мас.% ПК+5%МК	маса, г	546,4	541,5	541,1	540,3	540,2	540,1	539,9	539,3	535,1	533,0	533,0
	маса, %	100,00	99,18	99,13	98,88	98,87	98,85	98,81	98,70	97,93	97,55	97,55
ПЦ+ПК+5% МК+0,5%ФБ	маса, г	528,5	524,4	523,8	523,4	523,2	523,1	523,1	522,5	518,3	516,4	516,4
	маса, %	100,00	99,22	99,11	99,04	99,00	98,98	98,98	98,86	98,07	97,71	97,71
ПЦ+ПК+5% МК+1%ФБ	маса, г	524,1	520,0	519,4	518,9	518,8	518,8	518,5	517,9	514,5	512,5	512,5
	маса, %	100,00	99,22	99,10	99,01	98,99	98,99	98,93	98,82	98,17	97,79	97,79

Значення зміни вологи в портландцементних системах в повітряно-сухих умовах гідратації корелюються із зміною деформацій усадки цих зразків. Згідно з даними табл. 3.3 інтенсивна втрата маси зразків у повітряно-сухих умовах спостерігається протягом 7 діб гідратації. Через 42 доби тверднення в повітряно-сухих умовах значення вологовмісту цементних систем стабілізується. Найбільшої втрати маси зазнає цементний камінь без добавок з підвищеним водоцементним відношенням ($V/C=0,6$), що становить 6,6 % через 28 діб тверднення і максимальне значення 7,7% досягається через 42 доби тверднення.

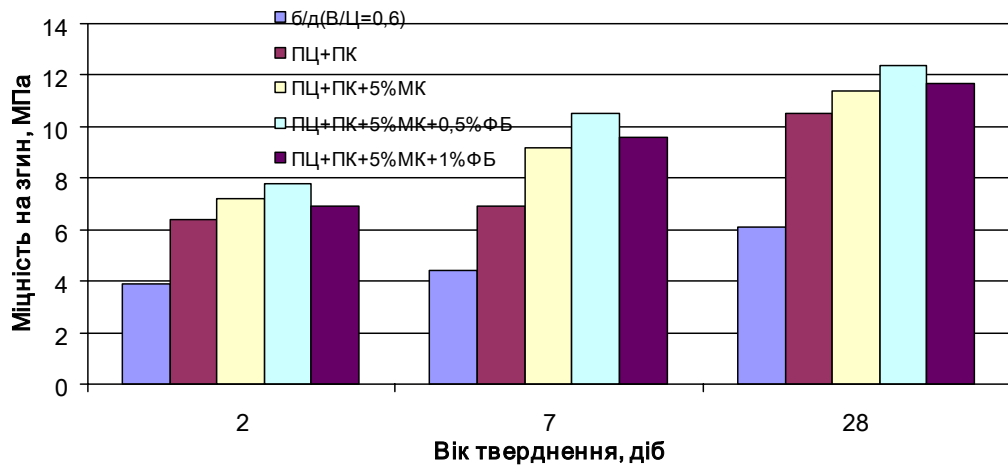
Тверднення високорухливої портландцементної системи, модифікованої 2 мас.% СП ($V/C=0,25$, $R_C=360$ мм), супроводжується значними втратами маси зразків в початковий період, що зумовлено переведенням води з адсорбційно зв'язаної в механічно зв'язану при адсорбції молекул ПАР на поверхні частинок в'язучого, сили зв'язку якої є меншими і така вода швидко випаровується, при цьому втрати маси становлять 2,8 % через 7 діб. Втрати вологовмісту каменю на основі ПЦ ІІ/А-ІІІ-500, модифікованого 2 мас. % ПК та метакаоліном, через 7 діб тверднення в 2 рази менші порівняно з втратами каменю на основі цементуючої системи з добавкою суперпластифікатора. При дисперсному армуванні базальтовою фіброю, волокна якої збільшують поверхню розділу фаз, підвищують водопотребу, забезпечується зменшення втрати маси цементного каменю, модифікованого органо-мінеральними добавками та базальтовою фіброю на 5,6% порівняно з каменем на основі ПЦ ІІ/А-ІІІ-500.

Досліджено міцність модифікованих портландцементних систем, що тверднули в різних температурно-вологісних умовах. Міцність каменю на основі ПЦ ІІ/А-ІІІ-500 ($H/C=0,60$; $R_C=370$ мм) в нормальних умовах тверднення через 2; 7 та 28 діб складає 10,6; 18,6 і 30,8 МПа, а при використанні рівнорухливої портландцементної системи ($R_C=370$ мм) – 46,3; 53,6 і 66,2 МПа відповідно (рис. 3.8, а). Використання 5 мас.% добавки метакаоліну та 0,5 мас.% базальтової фібри забезпечує зростання міцності на

стиск порівняно з міцністю каменю на основі високорухливої цементної системи на 20-30%. Слід відзначити, що збільшення кількості фібри до 1 мас.% спричиняє зменшення міцності на стиск на 5-8% порівняно з модифікованим каменем, армованим 0,5 % фібри.



а



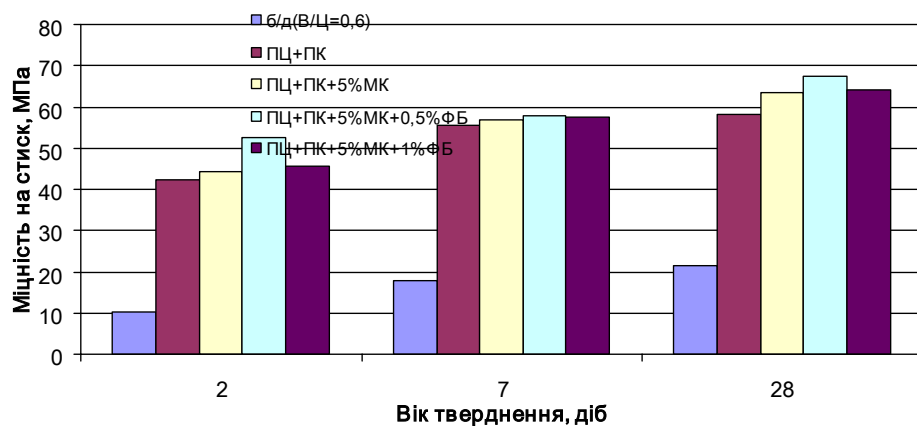
б

Рис. 3.8. Міцність цементних систем на основі ПЦ II/A-III-500 на стиск (а) та згин (б) в нормальних умовах тверднення

Міцність на згин високорухливої цементуючої системи на основі ПЦ II/A-III-500, суперпластифікатора та метаколіну зростає на 8-19 % порівняно з портландцементом, модифікованим 2 мас.% добавки СП. Введення 0,5 мас.% базальтових волокон до складу пластифікованої системи забезпечує армування каменю на макро- та мезоструктурних рівнях, що

дозволяє підвищити міцність на згин на 13,0; 28,0 та 10,7 % через 2, 7 та 28 діб тверднення в нормальних умовах порівняно з неармованим каменем.

Результати випробувань на міцність зразків, які тверднули повітряно-сухих умовах, показали, що для них характерні недобори міцності, спричинені випаровуванням води та збільшенням деформацій усадки порівняно із зразками, що тверднули в нормальних умовах. Так, міцність на стиск каменю на основі ПЦ П/А-Ш-500 з В/Ц=0,60 через 2; 7 та 28 діб в повітряно-сухих умовах тверднення знижується на 3,9; 14,5 та 43,9 % відповідно порівняно з міцністю каменю, що тверднув у нормальних умовах (рис. 3.9, а). Недобори міцності на згин є ще більш суттєвими для каменю на основі ПЦ П/А-Ш-500 з високорухливих сумішей (РЦ=360 мм), спад міцності на стиск становить 60,5 % через 28 діб тверднення.



а

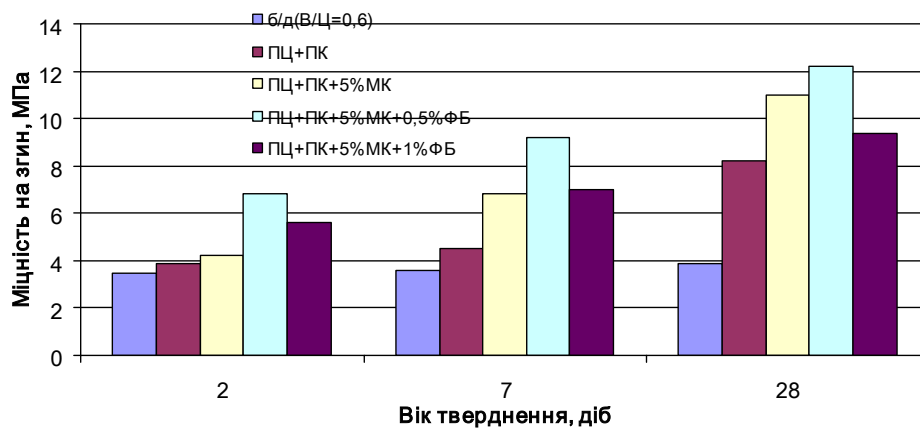


Рис. 3.9. Міцність модифікованого цементного каменю на стиск (а) та згин (б) в повітряно-сухих умовах тверднення

Оптимізація упакування частинок цементуючої системи тонкомеленою мінеральною добавкою метакаоліну, що визначає початкову щільність системи та рівномірне протікання процесів гідратації, а наявність енергетичноактивних ультрадисперсних частинок у складі мінеральної добавки на основі метакаоліну, які взаємодіють з $\text{Ca}(\text{OH})_2$ з одержанням додаткової кількості гідроалюмінатних та субмікроармувальних гідросилікатних і гідросульфалюмінатних фаз на ранніх стадіях, забезпечують отримання підвищеної міцності цементуючої системи як на стиск, так і на згин в повітряно-сухих умовах. Так, міцність на стиск пластифікованої системи «ПЦ П/А-Ш-500-метакаолін-суперпластифікатор» зростає на 2,1 та 8,7% відповідно через 7 та 28 діб порівняно портландцементом ПЦ П/А-Ш-500, модифікованим добавкою ПК.

Армування базальтовим волокном на макроструктурному рівні у кількості 0,5 мас.% забезпечує суттєве зростання міцності на згин зразків, що тверднули у повітряно-сухих умовах, при незначному зростанні міцності на стиск. Приріст міцності на згин зразків пластифікованої системи «ПЦ П/А-Ш-500-метакаолін-суперпластифікатор», армованої базальтовою фіброю, становить 61,9, 35,6 та 10,6 % відповідно через 2, 7 та 28 діб порівняно з неармованою системою. Порівняно із зразками, що тверднули в нормальних умовах міцність на згин зразків дисперсно-армованої системи, що тверднули в повітряно-сухих умовах, знизилась на 14,7; 28,0 та 1,6 % через 2, 7 та 28 діб відповідно.

Отримані експериментальні результати підтверджують необхідність застосування мінеральних добавок, суперпластифікаторів та армувальних базальтових волокон для багаторівневого армування цементної матриці самоущільнювальних бетонів з метою забезпечення підвищених експлуатаційних характеристик. Для визначення раціональних співвідношень компонентів дисперсно-армованої цементної системи високоякісних бетонів необхідно провести її оптимізацію методом математичного планування експерименту.

3.2. Оптимізація складів самоущільнювальних дисперсно-армованих бетонів

Ефективність проектування бетонів з покращеними показниками якості, які забезпечують довговічність бетонних виробів та конструкцій, досягається за рахунок застосування математичних моделей, що враховують і описують реологію бетонних сумішей, оптимальний розподіл заповнювачів у структурі матеріалу, а також апроксимаційних статистичних залежностей, що оцінюють вплив мікронаповнювачів на експлуатаційні характеристики будівельних матеріалів. При проектуванні складу дрібнозернистого самоущільнювального бетону, армованого базальтовою фіброю, виконано експериментально-статистичне моделювання з вирішенням багатопараметричних задач оптимізації з позиції адекватності властивостей критеріям функціональності. При цьому використаний один з методів статичної математичної обробки результатів – метод ортогонально-центрального композиційного планування (ОЦКП) []. Суть планування експериментів з використанням математичного методу полягає у встановленні математичної залежності між заданими властивостями і складом чи витратою матеріалів, вирішенні завдань з оцінки ступеня впливу вибраних факторів і встановлення їх взаємодії; пошуку оптимальних умов протікання процесів.

Факторами оптимізації дрібнозернистого самоущільнювального бетону (Ц:П=1:1,5) – рівень мезоструктури – вибрана кількість суперпластифікатора полікарбоксилатного типу ПК ($X_1 = 1; 2; 3$ мас.%) та мінеральної добавки метакаоліну МК ($X_2 = 0; 5; 10$ мас.%) за стабілізованих значень витрати регулятора в'язкості (0,1 мас. %) та фібри базальтової довжиною 24 мм (0,5 мас.%). Основні характеристики змінних факторів наведені в табл. 3.4. При зміні рецептурних рівнів вибраних факторів водовміст бетонної суміші залишався постійним ($B/C=0,3$).

Таблиця 3.4

Характеристика планування експерименту

Характеристика	Вміст добавок, мас.%	
	ПК (X ₁)	МК (X ₂)
Основний рівень “0”	2	5
Нижній рівень “-1”	1	0
Верхній рівень “+1”	3	10
Інтервал варіювання	1	5

При плануванні експерименту були вибрані наступні контрольні параметри:

Y₁ – розплив стандартного конуса дрібнозернистого бетону, мм;

Y₂ – умовна в’язкість дрібнозернистого бетону, τ₂₅₀, с;

Y₃, Y₄, Y₅ – границя міцності зразків бетону на стиск через 2, 7 та 28 діб тверднення відповідно, МПа;

Y₆, Y₇, Y₈ – границя міцності зразків бетону на згин через 2, 7 та 28 діб тверднення відповідно, МПа.

Метод ОЦКП дає можливість отримати математичний опис процесу у вигляді рівняння регресії (3.1):

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_{12} X_1 X_2 + b_{11} X_1^2 + b_{22} X_2^2, \quad (3.1)$$

де b₀, b₁, b₂, b₁₂, b₁₁, b₂₂ – коефіцієнти регресії, що розраховуються за формулами (3.2-3.7):

$$b_1 = \frac{\sum_{i=1}^N y(i) \cdot x_1(i)}{\sum_{i=1}^N x_1(i)^2} \quad (3.2) \quad b_2 = \frac{\sum_{i=1}^N y(i) \cdot x_2(i)}{\sum_{i=1}^N x_2(i)^2} \quad (3.3)$$

$$b_{11} = \frac{\sum_{i=1}^N y(i) \cdot x_1^*(i)}{\sum_{i=1}^N x_1^*(i)^2} \quad (3.4) \quad b_{12} = \frac{\sum_{i=1}^N y(i) \cdot x_1(i) \cdot x_2(i)}{\sum_{i=1}^N (x_1(i) \cdot x_2(i))^2} \quad (3.5)$$

$$b_{22} = \frac{\sum_{i=1}^N y(i) \cdot x_2^*(i)}{\sum_{i=1}^N x_2^*(i)^2} \quad (3.6) \quad b_0^* = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y(i) \quad (3.7)$$

Перевірку коефіцієнтів регресії на значимість та адекватність рівнянь регресії виконували з допомогою критеріїв Стьюдента та Фішера.

Матриця планування і результати повного двофакторного експерименту наведені в табл. 3.5.

Таблиця 3.5

**Матриця планування і результати повного двофакторного експерименту
(Ц:П=1:1,5; В/Ц=0,30)**

№ п/п	Матриця планування		РК, мм	τ_{250} , с	Границя міцності, МПа, у віці, діб					
					на стиск			на згин		
	X_1	X_2			Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_6
1	-1	-1	160	-	42,5	57,7	67,6	9,4	10,1	11,8
2	-1	0	200	-	51,3	64,3	83,1	10,9	11,7	12,6
3	-1	+1	220	25,8	47,3	63,1	78,1	10,0	11,2	12,5
4	0	-1	280	15,1	48,5	64,1	70,8	9,0	9,7	12,2
5	0	0	315	18,5	55,2	70,5	90,7	9,8	13,1	13,4
6	0	+1	320	19,2	51,8	62,3	81,3	9,5	12,1	12,5
7	+1	-1	300	8,9	48,2	63,2	79,3	8,5	9,3	12,7
8	+1	0	310	10,2	45,8	66,7	76,7	9,3	12,5	13,5
9	+1	+1	300	12,8	44,0	61,7	74,4	9,1	12,0	13,3

Для пошуку значень змінних факторів X_1 (ПК) і X_2 (МК), при яких досліджувані функції приймають максимальні значення, використали дисоціативно-кроковий метод оптимізації. Розрахунок коефіцієнтів рівнянь регресії проведено з використанням матричного підходу до регресивного аналізу. Отримані результати коефіцієнтів рівнянь регресії наведені в

табл. 3.6. Незначимі коефіцієнти прирівнюють до нуля, а відповідні члени виключають з рівнянь регресії. Розрахунками критерія Фішера встановлено, що отримані рівняння регресії адекватно описують експериментальні дані.

Таблиця 3.6

Коефіцієнти рівнянь регресії

Функції відгуку	Коефіцієнти регресії					
	b_0	b_1	b_2	b_{11}	b_{12}	b_{22}
Y_1	309,44	60,00	11,67	51,67	22,50	-6,67
Y_2	13,97	-0,47	-3,12	-1,90	-1,15	4,23
Y_3	54,31	-0,57	0,65	-5,32	2,25	-3,72
Y_4	67,57	-0,52	1,10	-1,20	3,70	-2,90
Y_5	83,63	1,91	6,28	-6,05	5,70	-4,05
Y_6	9,67	-0,57	0,28	-0,59	0,03	-0,59
Y_7	12,81	0,13	1,07	-0,57	0,40	-1,67
Y_8	13,14	0,43	0,27	-0,03	0,43	-0,67

Аналіз впливу досліджуваних факторів на рухливість дрібнозернистого бетону показав, що зростання даного показника визначається переважачою дією добавки-суперпластифікатора ПК (коефіцієнт $b_1=60,0$), порівняно з дією добавки МК (коефіцієнт $b_2=11,67$), при цьому забезпечується суттєвий пластифікуючий ефект (рис. 3.10). Показник збільшення рухливості (пластифікуючий ефект дії добавок) дрібнозернистих дисперсно-армованих бетонних сумішей визначали за формулою (3.8):

$$\Delta PK = (PK_0 - PK_k) / PK_k \cdot 100\% \quad (3.8)$$

де PK_0 - розплив стандартного конуса основного складу, мм;

PK_k - розплив контрольного складу, мм.

Як видно з даних рис. 3.10, введення 2 мас.% полікарбосилатного суперпластифікатора забезпечує суттєве зростання пластифікуючого ефекту в присутності мінерального компоненту МК у складі дисперсно-армованого дрібнозернистого бетону ($\Delta PK=75-100\%$), що визначає високу реологічну

активність використаних добавок-модифікаторів. Сумісне введення 3 мас.% добавки ПК та метакаоліну спричиняє незначне зниження пластифікуючого ефекту і є неефективним.

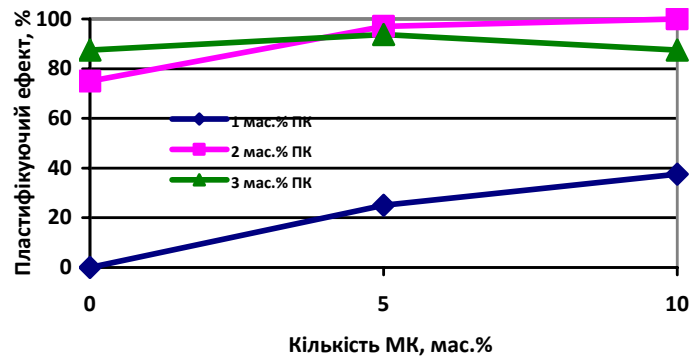


Рис. 3.10. Пластифікуючий ефект добавок-модифікаторів

Позитивний вплив на рухливість дрібнозернистої бетонної суміші добавки метакаоліну є незначний ($b_2=11,67$), що пов'язано з оптимізацією упакування цементуючої системи. Збільшення вмісту метакаоліну спричиняє негативний вплив на рухливість дрібнозернистої бетонної суміші ($b_{22}=-6,67$), зумовлений збільшенням поверхні розділу фаз, яку потрібно змочити водою. Як видно з табл. 3.6, сумісний вплив добавок суперпластифікатора та метакаоліну на реологічні властивості дрібнозернистої бетонної суміші – рухливість та умовну в'язкість – є позитивним, про що свідчать додатні значення коефіцієнтів b_{12} .

Використання добавок, крім реологічних властивостей, повинно забезпечити необхідну швидкість тверднення, що визначається високою марочною міцністю. Від'ємні значення коефіцієнта b_1 свідчать про негативний вплив суперпластифікатора на міцність бетону на стиск через 2 та 7 діб тверднення, що пов'язано із зростанням рухливості та збільшенні відстані між зернами тверднучої системи. Через 28 діб тверднення негативний вплив суперпластифікатора ПК нівелюється. Слід відзначити позитивний вплив добавки метакаоліну на міцність на стиск і згин у всі терміни тверднення (додатні знаки при коефіцієнтах b_2), роль якої у синтезі міцності з часом зростає. Позитивною дією на міцність при стиску та згині у

всі терміни тверднення характеризується сумісне використання оптимальної кількості добавок суперпластифікатора та метакаоліну, про що свідчать додатні знаки коефіцієнтів b_{12} .

За отриманими рівняннями регресії побудовані ізопараметричні поверхні та діаграми, що адекватно описують залежність розпливу конуса, умовної в'язкості, міцності при стиску та згині через 2, 7 та 28 діб тверднення дрібнозернистого бетону від змінних параметрів (рис. 3.11-3.14).

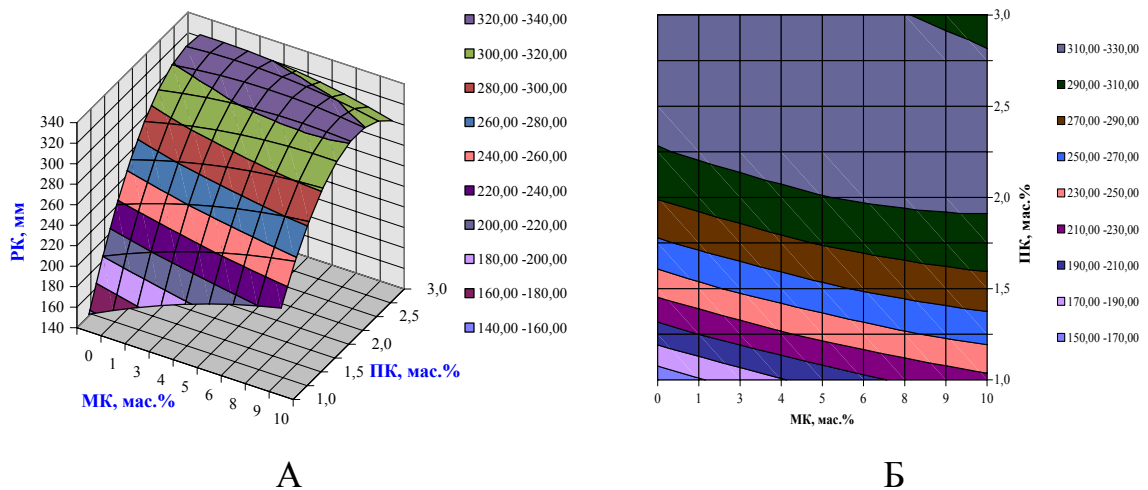


Рис. 3.11. Ізопараметрична поверхня (а) та діаграма (б) рухливості дрібнозернистих бетонів, армованих базальтовим волокном

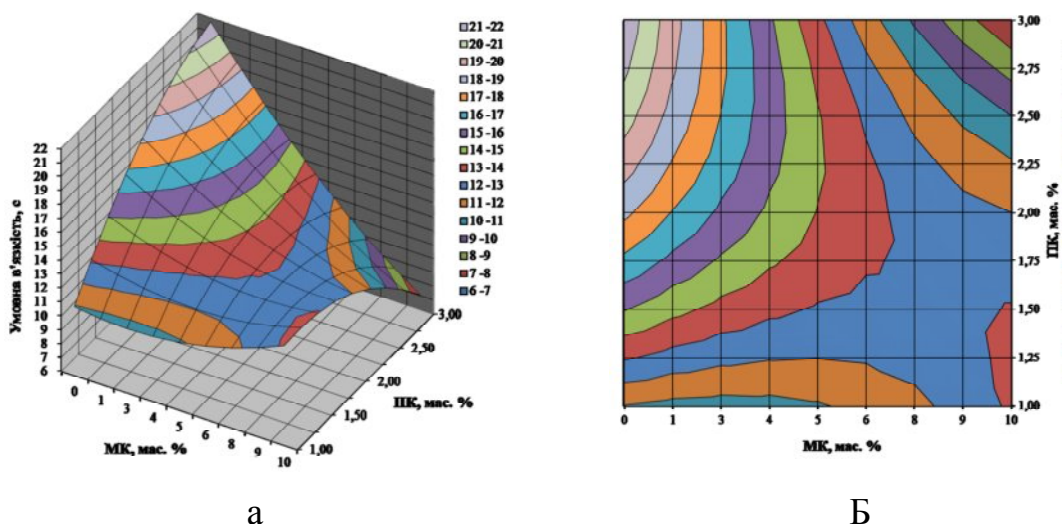
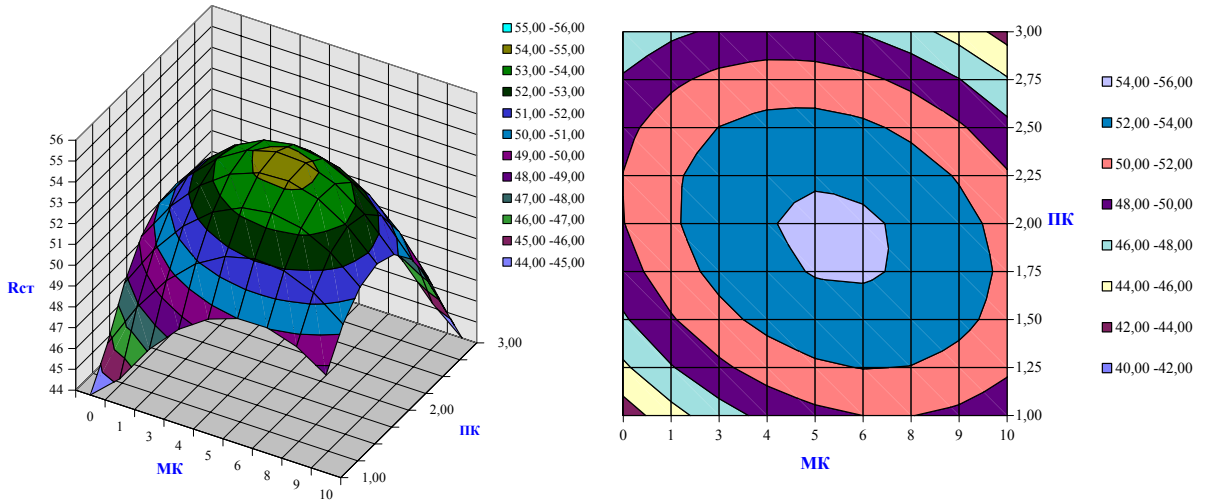
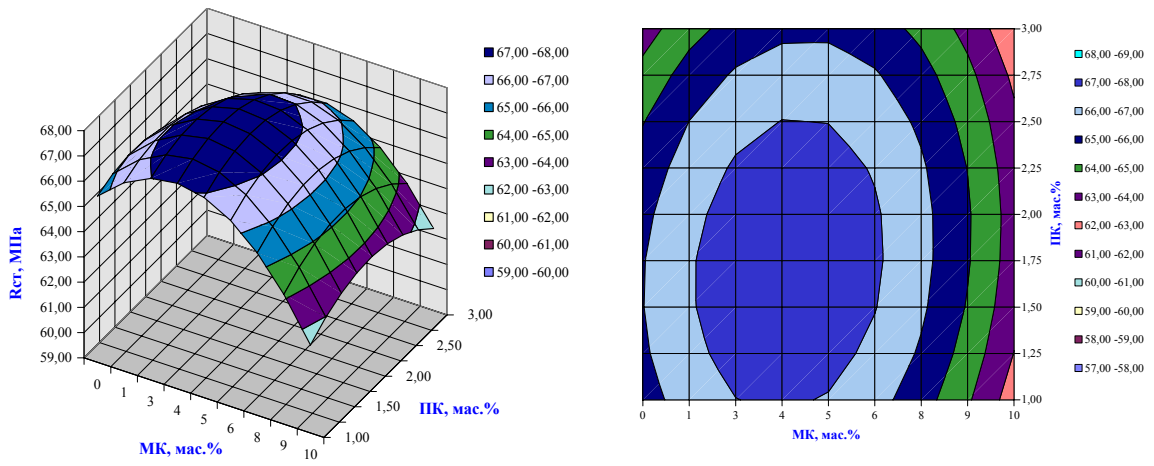


Рис. 3.12. Ізопараметрична поверхня (а) та діаграма (б) умовної в'язкості дрібнозернистих бетонів, армованих базальтовою фіброю

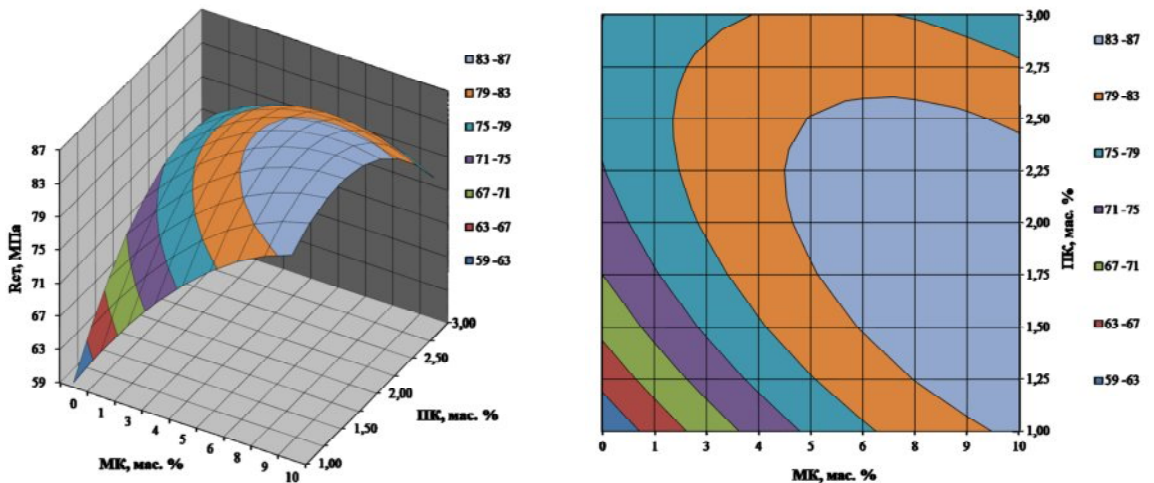
2 доби



7 діб



28 діб

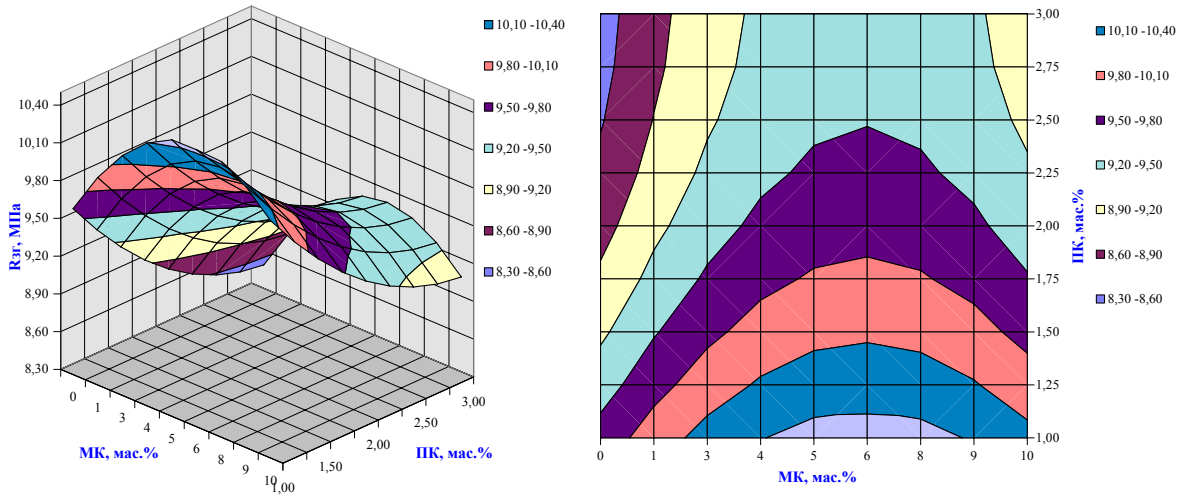


а

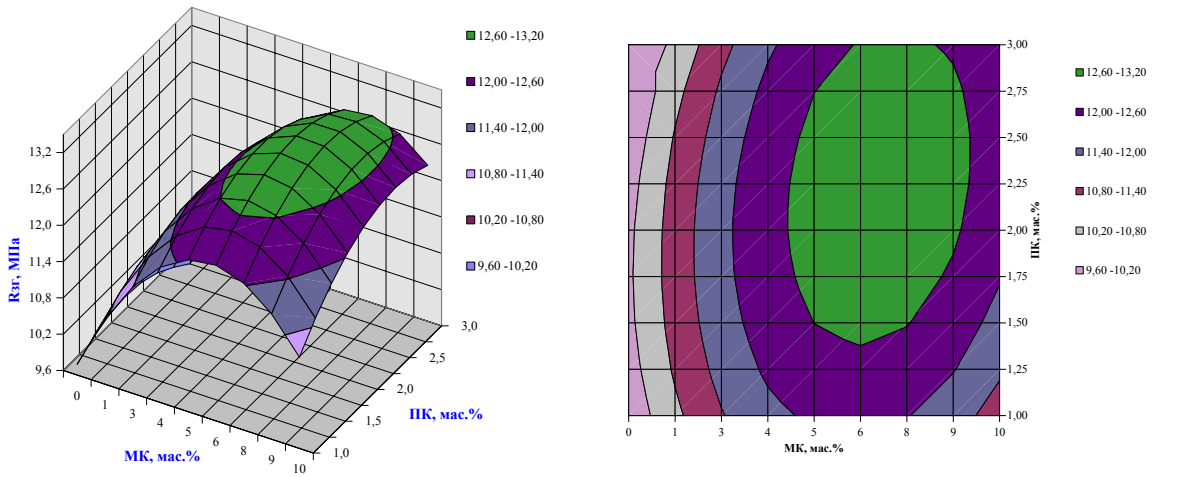
б

Рис. 3.13. Ізопараметричні поверхні (а) та діаграми (б) міцності на стиск дрібнозернистих бетонів, армованих базальтовою фіброю

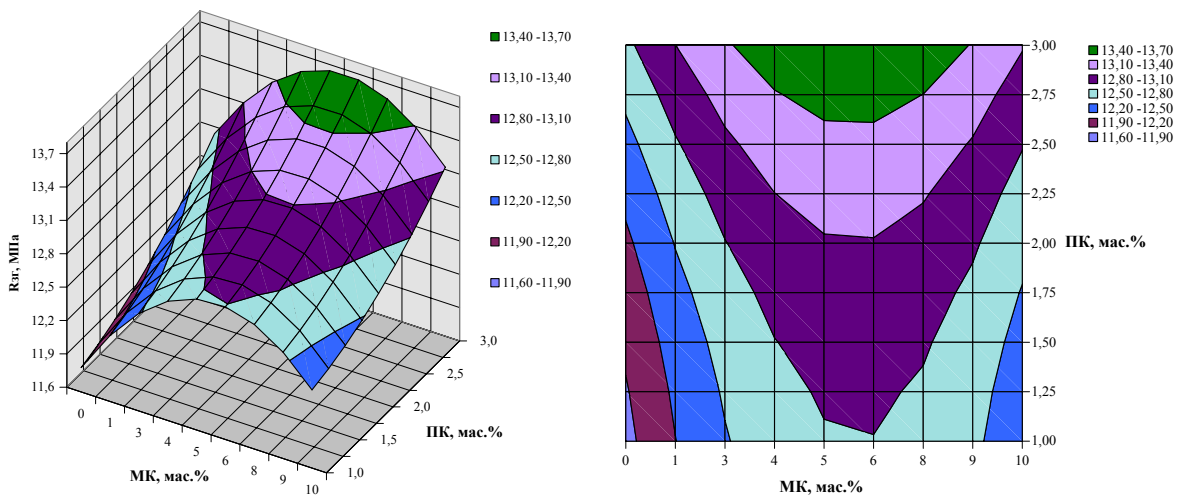
2 доби



7 діб



28 діб



а

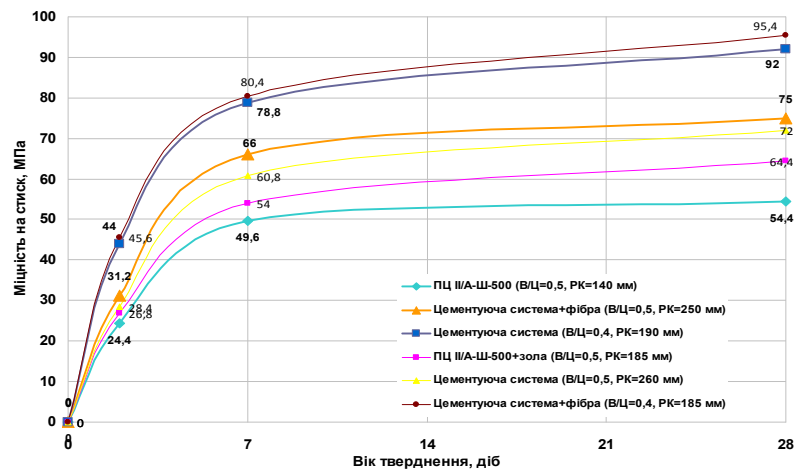
б

Рис. 3.14. Ізопараметричні поверхні (а) та діаграми (б) рівної міцності на згин дрібнозернистих бетонів, армованих базальтовою фіброю

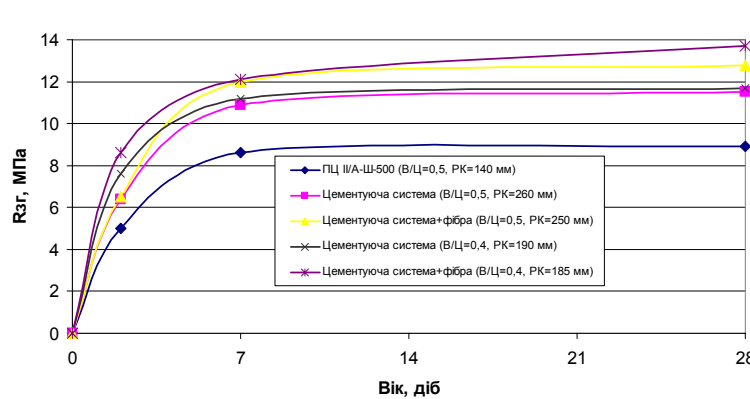
Аналіз отриманих математичних залежностей, а також їх графічна інтерпретація дозволяють визначити оптимальний склад дисперсно-армованої цементуючої системи, який забезпечує її високу рухливість та ранню міцність. Так, використання 2 мас.% полікарбоксилатного пластифікатора та 5 мас.% метакаоліну у складі дисперсно-армованих систем забезпечує одержання екстремумів значень ранньої (55,2 МПа) та стандартної (90,7 МПа) міцностей при стиску, що дозволяє отримати швидкотверднучі ($R_{ct2}/R_{ct28} \geq 0,50$) та високоміцні портландцементні композиції, армовані дисперсним базальтовим волокном, в умовах підвищеної рухливості системи ($R_K=315$ мм).

Проведено випробування оптимізованих дисперсно-армованих цементуючих систем згідно з ДСТУ EN 196-1:2007. Результати випробувань розроблених систем ($B/C=0,50$) показали, що із забезпеченням пластифікуючого ефекту ($\Delta R_K=78,6\%$) рання міцність системи зростає на 16,6%, а при дисперсному армуванні базальтовою фіброю – в 1,3 рази (рис. 3.15, а). Стандартна міцність дисперсно-армованої системи ($B/C=0,5$) становить $R_{ct}^{28}=75$ МПа, що перевищує міцність ПЦ II/A-III-500 на 37,9%. За рахунок суттєвого водоредукуючого ефекту ($\Delta B/C=20\%$) рання міцність дисперсно-армованої цементуючої системи зростає в 1,9 рази порівняно з ПЦ II/A-III-500 і становить 45,6 МПа, а стандартна міцність досягає 95,4 МПа. За показниками стандартної міцності дисперсно-армована цементуюча система відповідає вимогам, що ставляться до високоміцних ($R_{ct}^{28} > 60$ МПа) в'язучих.

Ультрадисперсні частинки мінеральної добавки на основі метакаоліну забезпечують ранню взаємодію з $Ca(OH)_2$ з одержанням додаткової кількості гідроалюмінатних та субмікроармувальних гідросилікатних і гідросульфалюмінатних фаз на ранніх стадіях, з отриманням підвищеної ранньої, стандартної міцності армованої цементуючої системи як на стиск, так і на згин.



а



б

Рис. 3.15. Міцність на стиск (а) та згин (б) цементуючих систем згідно з ДСТУ EN 196-1:2007

При армуванні на мікрорівні гідратними новоутвореннями забезпечується зростання міцності на згин високорухливої цементуючої системи (В/Ц=0,5) у всі терміни тверднення на 27-30% порівняно з вихідним портландцементом. Зниження водоцементного відношення сприяє підвищенню міцності на згин в 1,5 рази через 2 доби та 1,3 рази через 28 дб порівняно з ПЦ II/A-Ш-500. За рахунок дисперсного армуванні на макрорівні базальтовою фіброю міцність на згин дисперсно-армованої цементуючої системи з В/Ц=0,5 через 28 дб зростає в 1,4 рази, а при зниженні водовмісту до 0,4 – в 1,7 рази порівняно з портландцементом ПЦ II/A-Ш-500.

За відношенням значень міцності на згин до показників міцності на стиск дисперсно-армованої високорухливої цементуючої системи

розраховано коефіцієнти крихкості у різні періоди тверднення (рис. 3.16). Приріст міцності на згин відбувається повільніше порівняно з міцністю на стиск, тому коефіцієнти крихкості цементуючих систем зменшуються з часом тверднення, однак через 28 діб їх значення перевищують 0,125, що дозволяє класифікувати цементуючі системи як некрихкі.

Використання мінеральної добавки на основі метаксаоліну у складі армованих суперпластифікованих цементуючих систем забезпечує зростання міцності на стиск у ранній період тверднення за рахунок „ефекту мікронаповнювача” та утворення додаткової кількості гідратних фаз в неклінкерній частині цементуючої системи, а підвищення міцності на згин – за рахунок ефекту самоармування кристалогідратами, які характеризуються голчастим і волокнистим габітусом, що призводить до збільшення жорсткості матричної складової та зростання коефіцієнту тріщиностійкості порівняно з портландцементною системою без добавок з 0,215 до 0,225 через 2 доби тверднення. Дисперсне модифікування цементуючої системи базальтовою фіброю забезпечує вирівнювання пружних властивостей компонентів структури із зростанням коефіцієнта тріщиностійкості високоміцного дрібнозернистого бетону через 28 діб до 0,171 порівняно з 0,163 для портландцементу ПЦ ІІ/А-Ш-500.

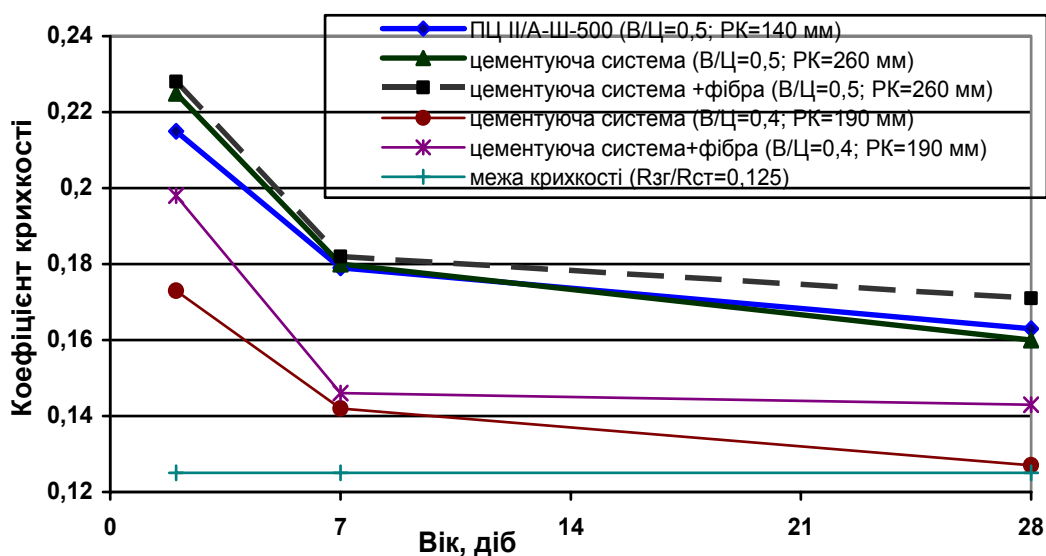


Рис. 3.16. Зміна коефіцієнта крихкості цементуючих систем при випробуванні згідно з EN 1961:2007

Показники ефектів використання оптимізованих високоміцних дисперсно-армованих цементуючих систем (табл. 3.7) вказують на ефективність дисперсного армування базальтовою фіброю.

Таблиця 3.7

**Пластифікуючий і водоредукуючий ефекти та швидкість
тверднення високоміцних цементуючих систем**

Позначення	без фібри	армована базальтовою фіброю
$\Delta R_K, \%$	85,7	78,6
$\Delta B/C, \%$	20,0	20,0
$\Delta R_{ct}^2, \%$	82,0	86,9
$\Delta R_{ct}^{28}, \%$	69,1	75,4
R_{ct}^2/R_{ct}^{28}	0,47	0,48
$\Delta R_{zg}^2, \%$	52,0	72,0
$\Delta R_{zg}^{28}, \%$	31,4	53,9
R_{zg}^{28}/R_{ct}^{28}	0,160	0,171

Важливою експлуатаційною характеристикою бетонів є їх здатність протистояти динамічним та ударним навантаженням. Ударну міцність цементуючих матриць самоущільнювальних бетонів оцінювали за величиною роботи, що затрачається на руйнування зразка під дією ударних навантажень, віднесеної до його площі. Ударна міцність пластифікованої матриці на основі ПЦ II/A-III-500 (B/C=0,28) через 7 діб становить 0,97 кДж/м², а через 28 діб – 1,13 кДж/м² (рис. 3.17). У той же час ударна міцність самоармованої цементуючої системи через 28 діб зростає до 1,23 кДж/м². Дисперсне армування базальтовою фіброю самоармованої цементуючої системи забезпечило зростання ударної міцності дрібнозернистого бетону на її основі порівняно з пластифікованою системою на основі ПЦ II/A-III-500 в 1,2 та 1,4 рази через 7 та 28 діб відповідно.

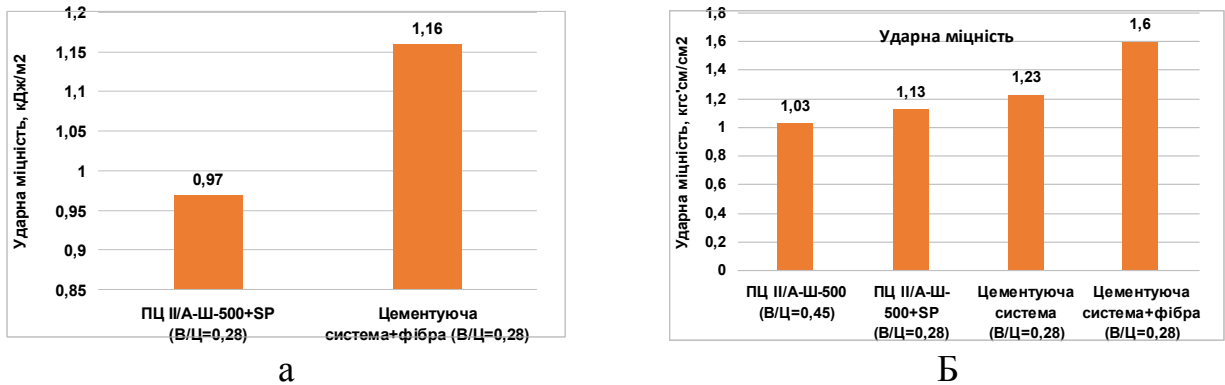


Рис. 3.17. Ударна міцність цементуючих матриць самоущільнювального бетону через 7 (а) та 28 (б) діб

Отже, багаторівневе армування портландцементних систем за рахунок сумісного використання оптимальної кількості активних мінеральних добавок, суперпластифікатора полікарбонатного типу та базальтової фібри дозволяє одержувати самоущільнювальні ($R_K > 300$ мм) дисперсно-армовані високоміцні ($R_{ct}^{28} = 94,4$ МПа) дрібнозернисті бетони з покращеними показниками ударної міцності ($1,6$ МДж/м²), що вимагає дослідження процесів їх структуроутворення.

3.3. Фізико-хімічні особливості структуроутворення самоущільнювальних бетонів, армованих базальтовою фіброю

Використання дисперсно-армованих цементуючих систем зумовлює зміну процесів раннього структуроутворення, фазового складу, ущільнення мікроструктури й зростання міцності цементної матриці самоущільнювальних бетонів. Згідно даних рентгенофазового аналізу при гідrataції цементного каменю на основі ПЦ II/AШ-500 через 28 діб на дифрактограмах фіксуються основні лінії гідратних фаз, зокрема еtringіту ($d/n = 0,973$; $0,561$ нм та ін.) та $Ca(OH)_2$ ($d/n = 0,493$; $0,263$ нм та ін.), при цьому

зменшується інтенсивність ліній негідратованого цементу ($d/n= 0,302; 0,277; 0,275; 0,218$ нм) (рис. 3.18).

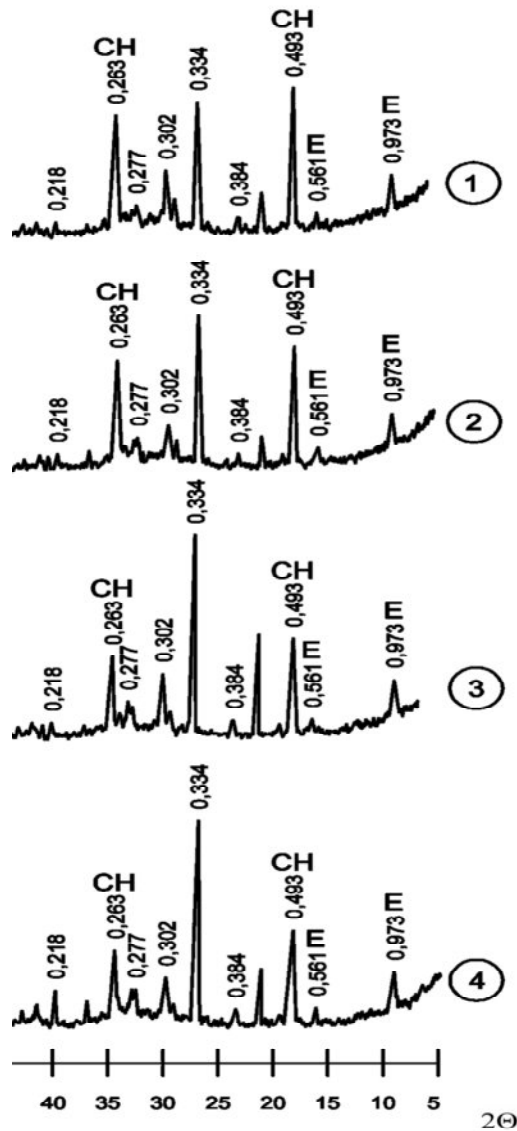


Рис. 3.18. Дифрактограми каменю на основі: 1 – ПЦ П/АШ-500; 2 – ПЦ П/АШ-500+ПК; 3 – ПЦ П/АШ-500+ПК+МК; 4 – ПЦ П/АШ-500+ПК+МК+ФБ, гідратованого 28 діб

У процесі тверднення цементуючої системи „ПЦ П/А-Ш-500 – комплексна мінеральна добавка – суперпластифікатор полікарбоксилатного типу” зменшується інтенсивність ліній $\text{Ca}(\text{OH})_2$ внаслідок його зв’язування введеними мінеральними добавками, зокрема активними Al_2O_3 та SiO_2 метакаоліну з утворенням еtringіту, гексагональних гідроалюмінатів кальцію C_4AH_{13} ($d/n=0,810; 0,395$ нм та ін.) та гідросилікатів кальцію.

Мінеральні добавки в складі цементуючих систем сприяють ущільненню каменю, за рахунок ефекту „дрібних порошоків” відіграють активну структуроутворюючу роль та прискорюють процеси тверднення, створюючи можливість утворення гідратних фаз, що характеризуються в'язучими властивостями, в мінеральній неклінкерній частині композицій, зокрема низькоосновних гідросилікатів типу CSH(B) та структурно-активних AF_m-фаз [9]. Інтенсивність ліній негідратованого цементу є незначною, що свідчить про активне протікання процесів гідратації. Слід відзначити, що введення базальтової фібри не впливає на механізм процесу гідратації і на дифрактограмі дисперсно-армованого каменю спостерігаються лінії основних гідратних фаз, зокрема еtringіту ($d/n=0,973$; $0,561$ нм та ін.), Ca(OH)₂ ($d/n=0,493$; $0,263$ нм та ін.).

Результати рентгенофазових досліджень добре корелюють з даними диференційно-термічного аналізу. На кривих ДТА каменю на основі дисперсно-армованої цементуючої системи чітко виявлено три ендоефекти при 140, 500 і 805°C (рис. 3.19). Перший з них відповідає розкладу еtringіту та виділенню води з гідросилікатів, другий – розкладу портландиту, а третій – розкладу гідрокарбоалюмінатів та карбонатів кальцію.

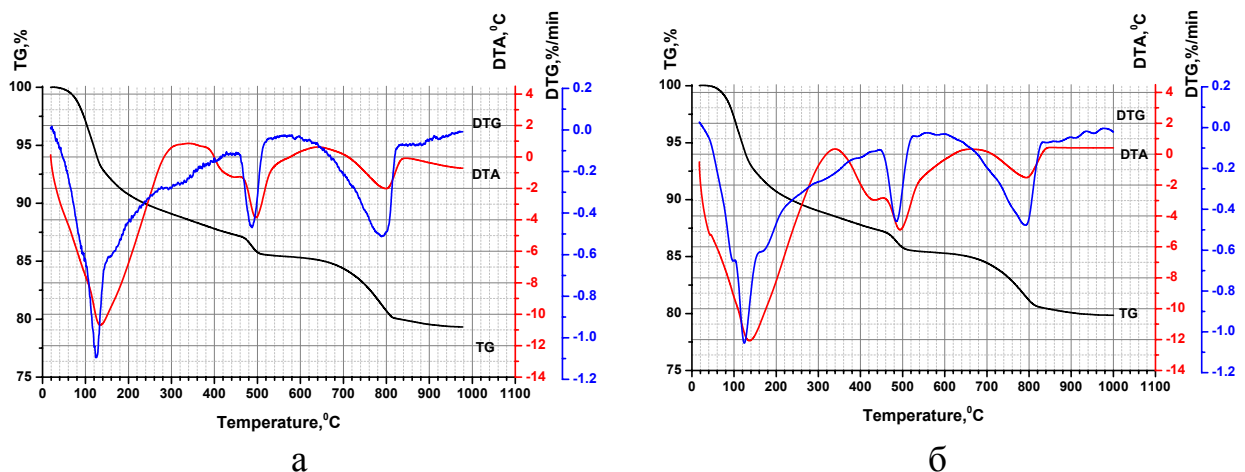
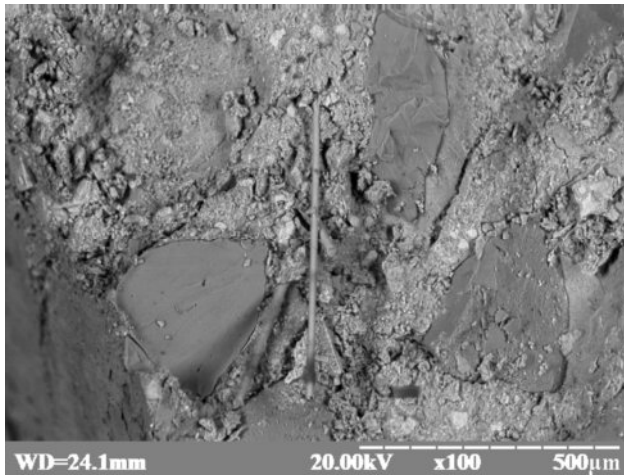


Рис. 3.19. Дериватограма каменю на основі ПЦ II/A-III-500 (а) та високорухливої дисперсно-армованої цементуючої системи (б), гідратованих 28 діб

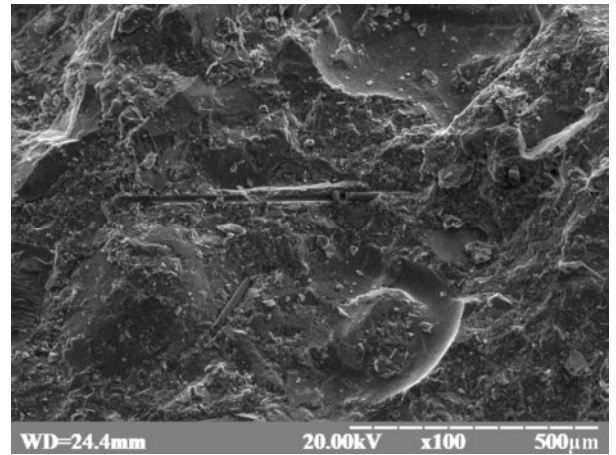
Згідно з даними термогравіметричного аналізу в камені на основі дисперсно-армованої цементуючої системи через 28 діб гідратації загальні втрати маси при прожарюванні за рахунок водоредукуючого ефекту зменшуються від 27 до 24 мас.%, а розрахункове значення кількості $\text{Ca}(\text{OH})_2$ знижується від 24,7 до 16,4 мас.% порівняно з каменем на основі портландцементу ПЦ II/A-III-500.

Метод растрової електронної мікроскопії доповнює дані про формування структури дисперсно-армованої цементної матриці самоущільнювального дрібнозернистого бетону ($\text{B}/\text{Ц}=0,5$, $\text{PK}=260$ мм). Міжзерновий простір самоущільнювального бетону заповнений однорідною малопористою цементуючою матрицею (рис. 3.20, а). Аналіз формування мікроструктури показує, що використання дисперсно-армованих цементуючих систем забезпечує ущільнення неклінкерної частини цементної матриці і кольматації пор гідратними новоутвореннями, які характеризуються підвищеною дисперсністю, – гідросульфоалюмінатом, гідроалюмінатами та гідросилікатами кальцію, що зумовлює перерозподіл пористості, зростання однорідності та міцності каменю (рис. 3.20, б). Наявність дрібнодисперсних CSH-, AF_m - і AF_t -фаз свідчить про зв'язування портландиту ультрадисперсною мінеральною добавкою метакаоліну.

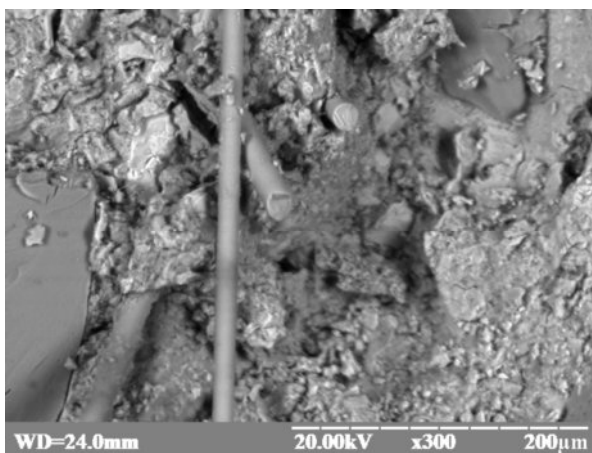
На мікрофотографіях каменю на основі дисперсно-армованого дрібнозернистого бетону видно, що розташування базальтових волокон забезпечує тривимірне армування цементної матриці. Наявність в композиційному матеріалі дисперсних волокон також створює основу, на якій формується міцний та щільний шар новоутворень – контактна зона, що забезпечує підвищення зчеплення базальтової фібри з цементною матрицею і значною мірою визначає будівельно-технічні властивості каменю на її основі (рис. 3.20, в). Електронно-мікроскопічним аналізом підтверджено відсутність хімічної деградації базальтової фібри в середовищі тверднучої модифікованої портландцементної системи (рис. 3.20, г).



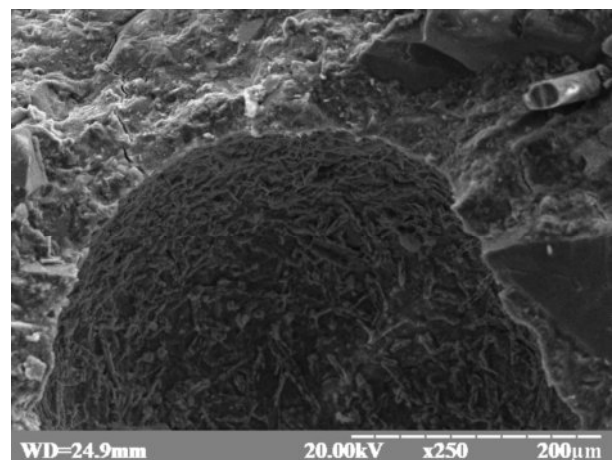
а



б



в



г

Рис. 3.19. Мікроструктура каменю на основі самоущільнювального дисперсно-армованого дрібнозернистого бетону, гідратованого 28 діб

Отже, високі показники міцності на стиск та згин, ударної міцності самоущільнювальних дисперсно-армованих дрібнозернистих бетонів забезпечуються за рахунок направлено формування мікроструктури цементуючої матриці, прискорення реакцій хімічної взаємодії гідратних новоутворень з активними мінеральними добавками в неклінкерній частині композицій, ущільнення цементного каменю внаслідок кольматації пор гідросилкатами і гідроалюмінатами кальцію, а також спільної ефективної роботи базальтової фібри та цементної матриці.

3.4. Будівельно-технічні властивості самоущільнювальних бетонів, армованих дисперсними базальтовими волокнами

Ефективність використання дисперсно-армованих портландцементних композицій в технології будівельного виробництва в значній мірі визначається забезпеченням необхідних технологічних властивостей самоущільнювальної бетонної суміші, а також будівельно-технічними властивостями бетонів на їх основі. Основними реологічними властивостями самоущільнювальних бетонних сумішей, регламентовані EN 12350, є рухливість, в'язкість, долаюча здатність, сегрегативна стійкість. Згідно з методом випробувань Fließmaß – Fließzeit – Blocker – Test показник текучості самоущільнювальних сумішей визначається як середнє значення діаметру розпливання конуса, а показник умовної в'язкості – як час розтікання бетонної суміші із конуса до розпливу 500 мм (t_{500}).

Проведеними дослідженнями реологічних властивостей самоущільнювальних бетонних сумішей номінального складу (рис. 3.21) встановлено, що розплив конуса самоущільнювального бетону становить 780 мм ($t_{500}=6$ с) при водоцементному відношенні ($B/C=0,30$), після введення базальтової фібри – 790 мм, умовна в'язкість при цьому складає $t_{500}=8$ с (рис. 3.21, б). Дисперсно-армовані самоущільнювальні бетонні суміші на основі модифікованих цементуючих систем за діаметром розпливання конуса відповідають марці консистенції бетонної суміші F6 (ДСТУ Б В.2.7-176:2008) та класу розпливу самоущільнювальної суміші SF3 [78]. Клас в'язкості дисперсно-армованих бетонних сумішей за показником умовної в'язкості становить VS2 ($t_{500}=5-8$ с). Самоущільнювальні бетони використовують для бетонування густоармованих конструкцій, тому в роботі визначено долаючу здатність дисперсно-армованих самоущільнювальних бетонних сумішей за J-кільцевим методом.

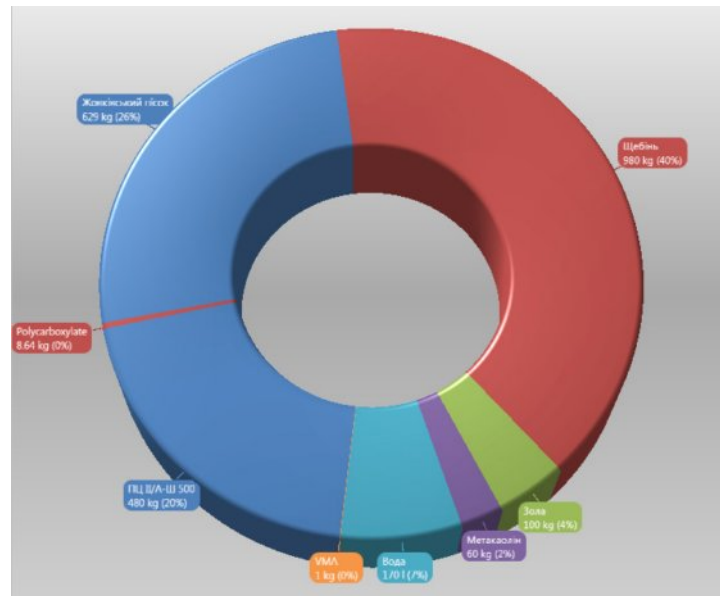


Рис. 3.21. Склад самоущільнювальної фіброармованої бетонної суміші

Визначення здатності до самоущільнення за J-кільцевим методом згідно ASTM C1621 показали відмінну можливість самоущільнювальних бетонних сумішей долати перешкоди у вигляді близьковстановлених арматурних стержнів без блокування (рис. 3.22). Клас здатності до проникнення розроблених самоущільнювальних сумішей становить PJ1 (ступінь блокування PJ=9 мм).



Рис. 3.22. Долаюча здатність самоущільнювальних бетонних сумішей, армованих базальтовою фіброю

Стабільність самоущільнювальної бетонної суміші (здатність протистояти водовідділенню і сегрегації після вкладання сумішей під впливом сили тяжіння з часом) є важливою реологічною характеристикою для забезпечення однорідності розподілу компонентів суміші в конструкціях, ефективної взаємодії між заповнювачем та цементною матрицею, а також між арматурою та бетоном, зниження ризику до тріщиноутворення. За показником індексу сегрегації $SR=12,8$ % дисперсно-армована самоущільнювальна бетонна суміш відноситься до класу стійкості до сегрегації SR1 ($SR=10-15$ %).

Середня густина самоущільнювальної бетонної суміші становить 2420 кг/м^3 (рис. 3.23, а), що визначається оптимальністю упакування частинок компонентів бетону та низьким повітрявмістом. Експериментально встановлено (рис. 3.23, б), що в дисперсно-армованій свіжоприготованій самоущільнювальній бетонній суміші вміст повітря знижується в 2 рази порівняно з неармованою за рахунок підвищеної в'язкості.



а



б

Рис. 3.23. Визначення середньої густини (а) та повітрязахоплення (б) дисперсно-армованих самоущільнювальних бетонних сумішей

Багаторівневе армування цементуючих систем за рахунок як явища „самоармування” на субмікромасштабному рівні структури, так і армування дисперсним базальтовим волокном на рівні мезоструктури дозволяє одержати високоміцні самоущільнювальні бетони, що характеризуються підвищеною щільністю (середня густина становить 2400-2425 кг/м³, водопоглинання $W_m=2,2$ %). Міцність самоущільнювальних дисперсно-армованих бетонів через 2 та 28 діб становить 57,1 і 104,5 МПа відповідно, а через 56 діб – 113 МПа (рис. 3.24). Розроблені дисперсно-армовані високоміцні самоущільнювальні бетони характеризуються також швидким наростанням міцності ($R_{ст}^2/R_{ст}^{28}=0,55>0,50$) згідно з ДСТУ Б В.2.7-176:2008. При армуванні базальтовою фіброю коефіцієнт конструктивної якості (ККЯ) самоущільнювальних бетонів зростає від 41,7 до 43,4 МПа.

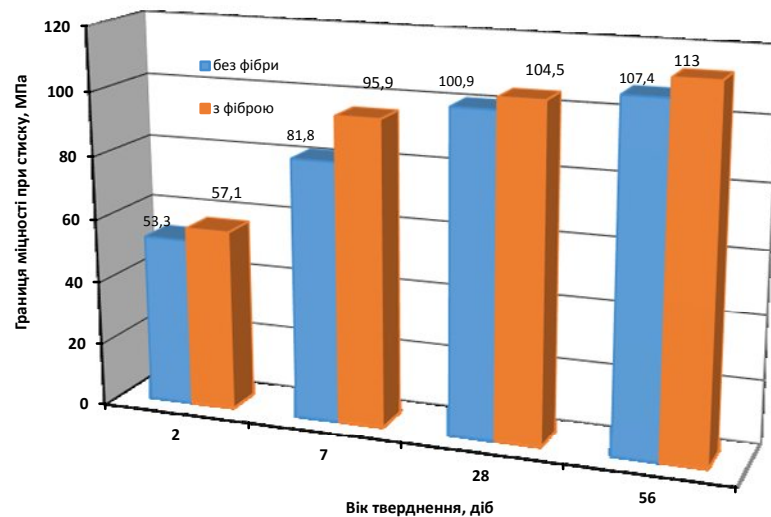
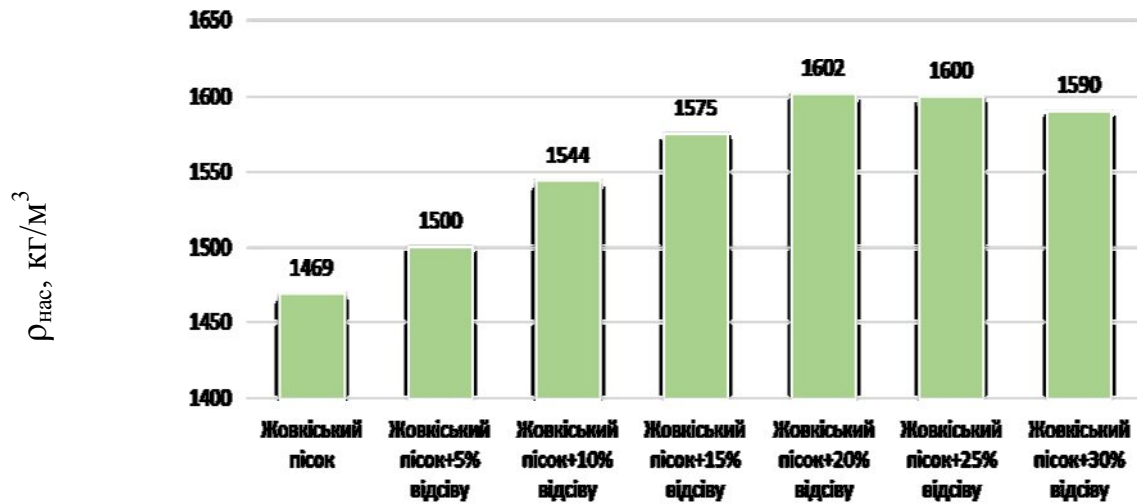


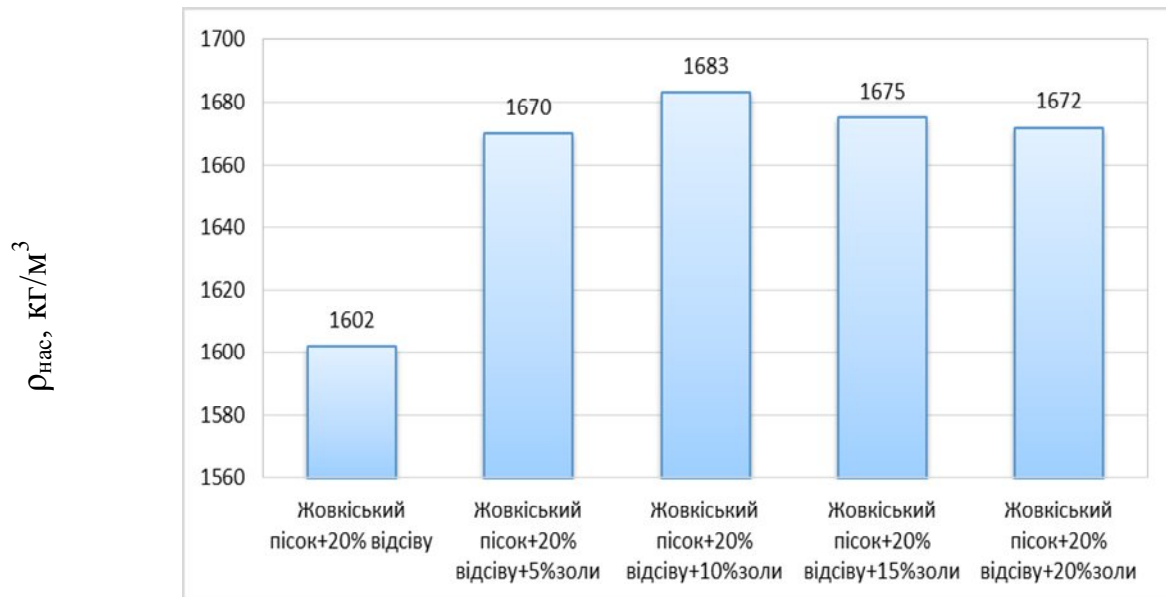
Рис. 3.24. Міцність на стиск високоміцних самоущільнювальних бетонів

З метою зниження витрати портландцементу у складі самоущільнювальних бетонів провели оптимізацію компонентів, що забезпечують мезоструктурний рівень композиту, за критерієм мінімізації об’єму міжзернових порожнеч методом ітерації, який дозволяє за рахунок регулювання співвідношення між фракціями піску Жовківського родовища та піску з відсіву подрібнення одержати максимально щільну упаковку з найменшою порожнечістю. Для підбору оптимального співвідношення суміші

дрібних заповнювачів послідовно збільшували кількість піску з відсіву подрібнення на 5% та визначали насипну густину суміші заповнювачів у вільно насипаному стані. Аналіз графічних залежностей насипної густини дозволяє встановити оптимальне співвідношення між дрібними заповнювачами 80 мас.% Жовківського піску та 20 мас.% піску з відсіву подрібнення відповідно (рис. 3.25, а).



а



б

Рис. 3.25. Насипна густина суміші дрібних заповнювачів (а) та дрібних заповнювачів і золи-винесення (б)

Для подальшого зменшення міжзернової пористості дрібного заповнювача, що визначає мінімізацію витрати в'язучого, як мікронаповнювач використали золю-винесення. При цьому визначали насипну густину суміші у вільнонасіпаному стані, послідовно збільшуючи кількість золю-винесення. Як показали результати випробувань (рис. 3.25, б). максимальним значенням насипної густини ($\rho_{\text{нас}}=1683 \text{ кг/м}^3$) характеризується суміш 80 мас.% Жовківського піску, 20 мас.% піску з відсіву подрібнення та 10 % золю-винесення.

Проведено проектування складу самоущільнювального бетону, дисперсно-армованого базальтовим волокном, з використанням дрібного заповнювача, що визначає мезоструктурний рівень бетону, при цьому досягається зменшення витрати портландцементу на 25% (360 кг) (рис. 3.26).

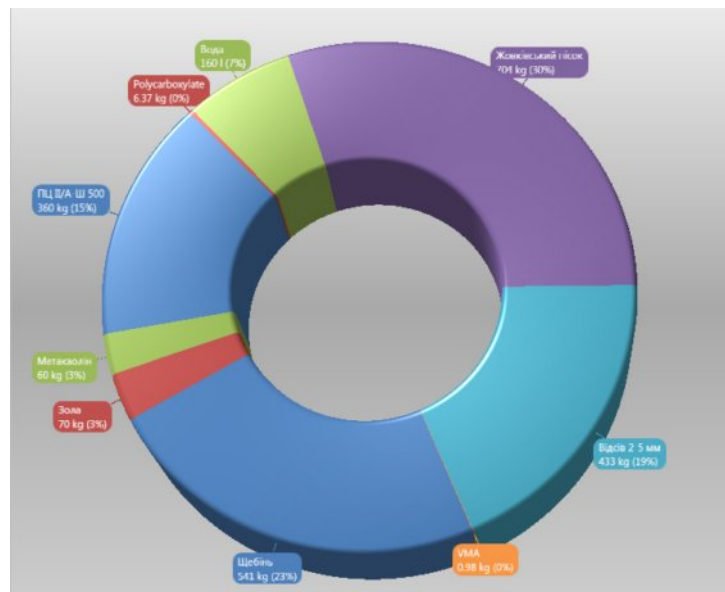


Рис. 3.26. Склад самоущільнювального бетону з використанням заповнювачів щільного упакування

При визначенні реологічних характеристик самоущільнювальної бетонної суміші з витратою портландцементу 360 кг/м^3 встановлено, що розплив конуса становить 650 мм при водоцементному відношенні ($V/C=0,44$), умовна в'язкість при цьому складає $t_{500}=9$ с. За діаметром розпливання конуса самоущільнювальна суміш відповідає марці консистенції

бетонної суміші F6 та класу розпливу самоущільнювальної суміші SF1 [78]. Клас в'язкості дисперсно-армованих бетонних сумішей за показником умовної в'язкості становить VS3 ($t_{500}=5-8$ с).

Результати випробувань показали, що міцність при стиску дисперсно-армованого самоущільнювального бетону при зниженні витрати портландцементу на 25% ($C=360$ кг) через 2 доби знижується на 29,1 % порівняно з бетоном з витратою портландцементу 480 кг (рис. 3.27, а). Разом з тим, за рахунок щільної упаковки заповнювачів та дисперсного армування міцність на стиск самоущільнювального бетону через 7 та 28 діб тверднення становить 76,6 та 98 МПа відповідно.

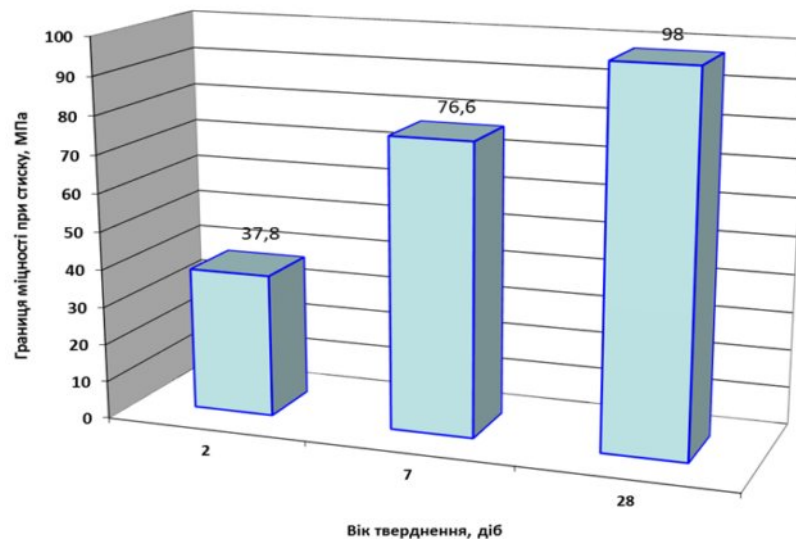


Рис. 3.27. Міцність дисперсно-армованих самоущільнювальних бетонів з витратою портландцементу 360 кг/м^3

Функціональність самоущільнювальних дисперсно-армованих бетонів забезпечується можливістю їх застосування при монолітному бетонуванні протягом року, в т. ч. в зимовий період. Тверднення портландцементу при від'ємних температурах сповільнюється та супроводжується інтенсивним льодоутворенням, що призводить до виникнення незворотних структурних деформацій і руйнування цементного каменю [140]. При бетонуванні в зимових умовах необхідно забезпечити досягнення бетоном критичної міцності, яка гарантує збереження структури і подальше тверднення після

розмерзання. Результати дослідження міцнісних показників самоущільнювальних дисперсно-армованих бетонів, що тверднули в умовах знакозмінних температур (рис. 3.28, а), показали, що вони характеризуються вищою міцністю через 7 та 28 діб тверднення на 21,4 та 5,0 % відповідно, порівняно з самоущільнювальними бетонами без фібри (рис. 3.28, б). В умовах знакозмінних температур самоущільнювальний фібробетон набирає 51,4 % міцності бетону через 28 діб, що тверднув у нормальних умовах. Самоущільнювальні бетони, армовані базальтовим волокном, після розмерзання продовжують набирати міцність і через 28 діб тверднення в умовах знакозмінних температур і 28 діб у нормальних умовах її показник становить 70,4 МПа.

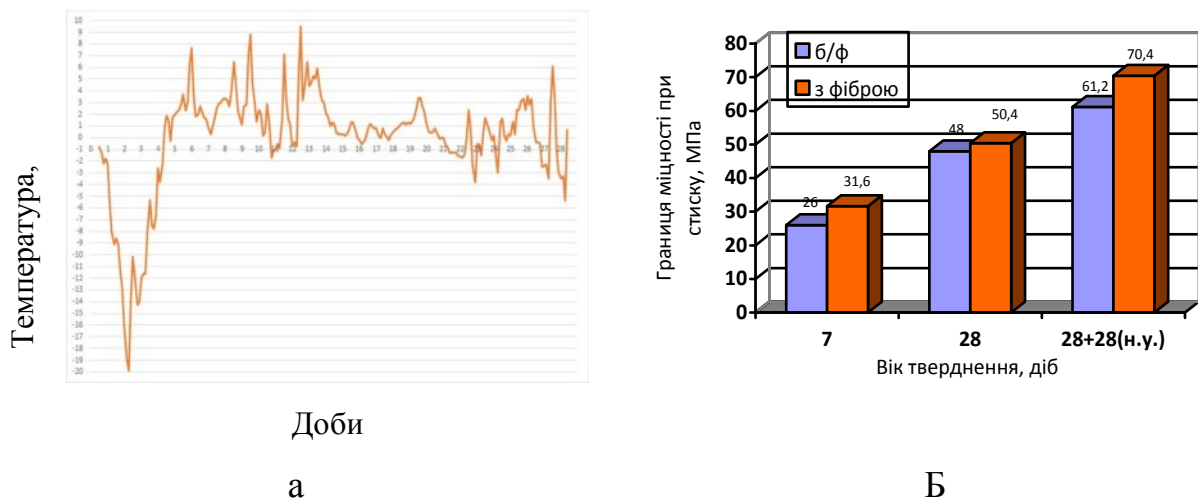


Рис. 3.28. Зміна температури тверднення (а) та міцність при стиску самоущільнювальних бетонів ($\rho = 360 \text{ кг/м}^3$) в умовах знакозмінних температур (б)

Деформативні та фізико-механічні властивості визначали при випробуванні двох серій призм $100 \times 100 \times 400 \text{ мм}$ та кубів $100 \times 100 \times 100 \text{ мм}$ самоущільнювального бетону на основі портландцементу ПЦ П/А-Ш-500 номінального складу $\text{Ц:П:Щ} = 1:1,52:2,04$ ($\rho = 480 \text{ кг/м}^3$), марка за консистенцією бетонної суміші F6 та самоущільнювального дисперсно-армованого бетону через 28 діб тверднення в нормальних умовах до рівня навантаження $\sim 0,6 R_p$ (R_p – руйнівне навантаження).

Дослідженнями деформативних властивостей фіброармованих самоущільнювальних бетонів встановлено, що в межах вимірюваних деформацій практично відсутнє збільшення відносних поздовжніх та поперечних деформацій швидконапливаючої повзучості, що характерне для високоміцних бетонів. Чим більшою є міцність бетону, тим більше залежність σ – ε близька до прямої лінії. На рис. 3.29 наведено залежність поздовжніх та поперечних деформацій бетонів від прикладеного навантаження через 28 діб тверднення в нормальних умовах.

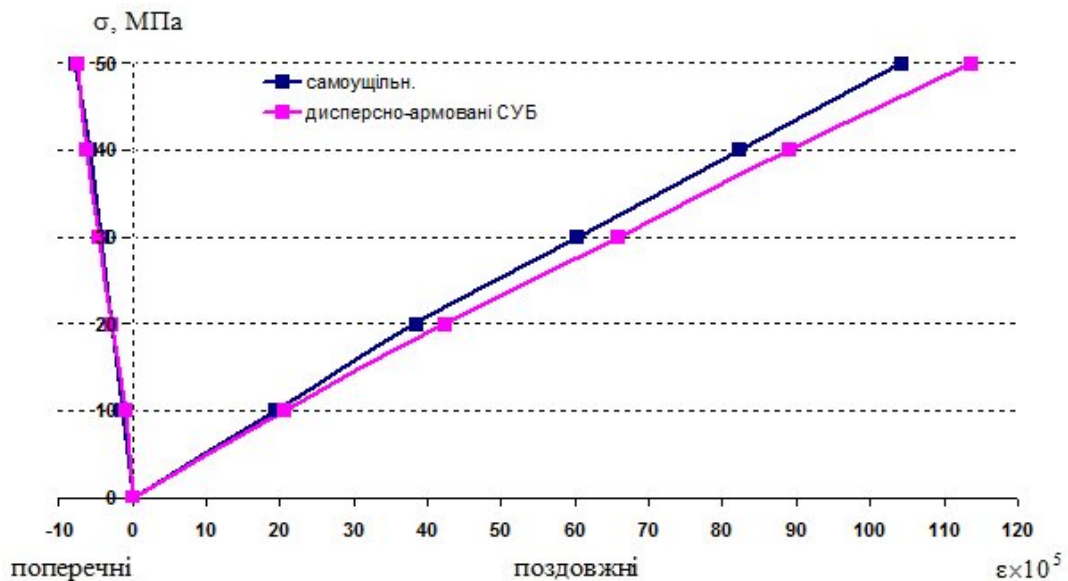


Рис. 3.29. Залежність поздовжніх та поперечних деформацій самоущільнювального неармованого та дисперсно-армованого бетонів

Коефіцієнт поперечних деформацій бетону збільшується зі збільшенням навантажень. Результати випробувань деформативних властивостей бетонів під навантаженням наведені в табл. 3.8. Модуль пружності самоущільнювального бетону, армованого дисперсним базальтовим волокном, зростає від 51,6 до 63,9 ГПа, а коефіцієнт Пуассона знижується від 0,19 до 0,17 порівняно із самоущільнювальним бетоном без фібри. Призмова міцність самоущільнювального бетону становить 71,7 МПа, тоді як самоущільнювальних бетонів, армованих базальтовою фіброю, – 96,2 МПа.

Таблиця 3.8

Показники деформативних властивостей самоущільнювальних бетонів

Самоущільнювальний бетон	Призмova міцність, $f_{ck, prism}$, МПа	Кубикова міцність $f_{cm, cube}$, МПа	Модуль пружності, E_{cm} , ГПа	Коефіцієнт Пуассона, μ
Неармований	71,7	100,9	51,6	0,19
Дисперсно-армований	96,2	104,5	63,9	0,17

Результати проведених досліджень на висолостійкість згідно з ДСТУ Б В.2.7-65-97 показали, що на відкритій поверхні зразків самоущільнювального високоміцного фібробетону не спостерігаються зміни, пов'язані з висолами, що є наслідком формування щільної малопористої структури композиту в результаті зв'язування кальцію гідроксиду активними мінеральними добавками.

Стійкість до корозії, спричиненої впливом хімічних речовин – сульфатної корозії (клас ХА), дрібнозернистої матриці самоущільнювальних дисперсно-армованих бетонів (Ц:П=1:2) визначали за зміною міцності зразків після 6 місяців їх зберігання в агресивному сульфатному середовищі – розчин Na_2SO_4 (концентрація $SO_4^{2-}=10$ г/л) і розраховували коефіцієнт корозійної стійкості (K_{C6}) як відношення міцності зразків, що зберігались у воді, до міцності зразків в сульфатному середовищі. Коефіцієнт корозійної стійкості K_{C6} самоущільнювальних бетонів, армованих дисперсним базальтовим волокном, становить 1,1, що свідчить про підвищення його стійкості до агресивних середовищ.

Результати порівняльних досліджень будівельно-технічних властивостей самоущільнювальних бетонів на основі ПЦ II/A-III-500, неармованого та армованого базальтовим волокном, наведені в табл. 3.9. Самоущільнювальні дисперсно-армовані бетони характеризуються середньою густиною 2400-2430 $кг/м^3$, підвищеною, їх водопоглинання знижується від 2,2 до 1,9 мас.%, а пористість від 6,7 до 5,3 %, марка за

водонепроникністю становить W20 та за морозостійкістю F400. Модуль пружності самоущільнювального бетону зростає від 51,6 до 63,9 ГПа, а коефіцієнт Пуассона знижується від 0,19 до 0,17 порівняно із самоущільнювальним неармованим бетоном, що сприяє зменшенню можливості тріщиноутворення.

Таблиця 3.9

Будівельно-технічні властивості самоущільнювальних бетонів

Найменування показника	Одиниці вимірювання	Значення показника	
		неармованого	армованого фіброю
Діаметр розпливання конуса бетонної суміші	мм	≥ 760	≥ 760
Марка за консистенцією бетонної суміші		F6 / SF3	F6 / SF3
Об'єм втягнутого повітря, V_n	%	0,7	0,35
Середня густина бетону, ρ	кг/м ³	2400	2420
Пористість, П	%	13,9	7,6
Водопоглинання за масою, W_m	%	2,2	1,9
Міцність на стиск $f_{cm,u}$ у віці, діб	МПа		
2			
28	100	104,5	
Оцінка питомої міцності, f_{cm2}/f_{cm28}		0,53	0,54
Міцність на розтяг при згині, f_{ctd}	МПа	8,0	11,6
Модуль пружності, E_{cm}	ГПа	51,6	63,9
Призмova міцність, $f_{ck, prism}$	МПа	71,7	96,2
Коефіцієнт Пуассона, ν		0,19	0,17
Ударна міцність	кДж/м ²	1,23	1,6
Марка за водонепроникністю		W 20	W 20
Марка за морозостійкістю		F 300	F 400
Корозійна стійкість, КС ₆		1,1	1,1
Коефіцієнт конструктивної якості (ККЯ)	МПа	41,7	43,4

Отже, розроблені дисперсно-армовані самоущільнювальні бетонні суміші характеризуються підвищеною рухливістю та однорідністю, а бетони на їх основі за рахунок багаторівневого армування високою ранньою та кінцевою міцністю, покращеними деформативними властивостями, щільністю, підвищеною морозостійкістю, а в кінцевому результаті довговічністю, що забезпечує широку область їх використання в будівництві, особливо в умовах, що вимагають підвищеної тріщиностійкості, міцності на стиск і згин, високої ударної в'язкості.

Висновки до розділу

1. Рухливість портландцементних систем, яка задовольняє вимоги самоущільнення ($R_{Ц} \geq 300$ мм), досягається при дозуванні полікарбоксилатного пластифікатора 1,5-2 мас.%. При цьому міцність на стиск та згин дрібнозернистого бетону, модифікованого 2 мас.% ПК, знижується на 5-15% в усі терміни тверднення порівняно з бетоном, модифікованим 1,5 мас.% добавки-суперпластифікатора.

2. Встановлено синергічний ефект введення орґано-мінеральної добавки на рухливість цементних систем, який обумовлений оптимальним розподілом твердих частинок в системі, створенням сприятливих умов для ковзання частинок, мінімізації внутрішнього тертя. Введення мінерального компоненту сприяє зростанню в'язкості, що забезпечує седиментаційну стійкість високорухливих цементних систем.

3. Досліджено, що введення базальтової фібри довжиною 24 мм спричиняє зниження рухливості та збільшення в'язкості модифікованих цементних систем, що пов'язано із структуруванням суміші фібровими елементами, збільшенням внутрішнього тертя та обмеженим переміщенням компонентів матриці. При цьому пластифіковані цементні системи, армовані базальтовою фіброю, за показниками рухливості задовольняють вимоги до

самоущільнення ($R_{Ц} \geq 300$ мм). Дисперсно-армовані цементні системи характеризуються збільшенням міцності на стиск та згин на 20-30% як в нормальних, так і повітряно-сухих умовах тверднення, зниженням деформацій усадки на 42%, порівняно з неармованим каменем.

4. Методом експериментально-статистичного моделювання встановлено оптимальне співвідношення між добавками-модифікаторами у складі дисперсно-армованої портландцементної системи – 2 мас.% полікарбоксилатного суперпластифікатора та 5 мас. % метакаоліну. Розроблена дисперсно-армована цементуюча система характеризується розпливом стандартного конуса $R_K \geq 180$ мм (пластифікуючий ефект $\Delta R_K = 78,6\%$), що дозволяє віднести її до суперпластифікованих (технологічний ефект), високою ранньою ($R_{ct}^2 = 31,2$ МПа) і стандартною ($R_{ct}^{28} = 75$ МПа) міцністю (ДСТУ EN 196-1:2007). За рахунок суттєвого водоредуруючого ефекту ($\Delta B/C = 20\%$) рання та стандартна міцність цементуючої системи зростають відповідно до 45,6 та 95,4 МПа (технічний ефект), що задовольняє вимоги щодо високоміцних в'язучих.

5. Показано, що коефіцієнт тріщиностійкості самоармованої цементуючої системи в ранній період тверднення зростає до 0,225 порівняно з портландцементною системою без добавок 0,215, що зумовлено зростанням міцності на стиск за рахунок „ефекту мікронаповнювача” та утворення додаткової кількості гідратних фаз в неклінкерній частині цементуючої системи, а підвищення міцності на згин – за рахунок ефекту самоармування кристалогідратами, які характеризуються голчастим габітусом і призводить до збільшення жорсткості матричної складової. Дисперсне модифікування самоармованої цементуючої системи базальтовою фіброю забезпечує вирівнювання пружних властивостей компонентів структури із зростанням коефіцієнта тріщиностійкості високоміцного дрібнозернистого бетону через 28 діб до 0,171 порівняно з 0,16 для портландцементу ПЦ II/A-III-500.

6. Комплексом методів фізико-хімічного аналізу встановлено особливості процесів структуроутворення, формування мікроструктури та

міцності каменю на основі дисперсно-армованих цементуючих систем. Комплексна мінеральна добавка на основі метакаоліну сприяє зниженню в мікроструктурі цементної матриці кількості та розмірів закристалізованих гідратних новоутворень (гідроксиду кальцію) при одночасному збільшенні волокнистих низькоосновних гідросилікатів та гідросульфоалюмінатів кальцію, що забезпечує самоармування системи на мікрорівні, компенсацію усадки та приріст міцності цементуючої системи.

7. Виявлено зростання міцності цементуючої матриці фібробетону в умовах динамічних навантажень. Показник роботи, затраченої на руйнування пластифікованої матриці на основі ПЦ II/A-III-500 ($V/C=0,28$) через 7 діб становить $0,97 \text{ кДж/м}^2$, а через 28 діб – $1,13 \text{ кДж/м}^2$. Використання цементуючої системи, армованої базальтовою фіброю, забезпечило зростання ударної міцності дрібнозернистого бетону на її основі порівняно з пластифікованою системою на основі ПЦ II/A-III-500 в 1,2 та 1,4 рази через 7 та 28 діб відповідно.

8. Дослідженнями реологічних властивостей бетонних сумішей з дисперсним базальтовим волокном встановлено, що вони задовольняють вимоги щодо самоущільнення: клас розпливу SF3 (діаметр розпливу 760-790 мм), клас в'язкості VS2 ($T_{500}=8 \text{ с}$), клас здатності до проникнення PJ1 (ступінь блокування $PJ=9 \text{ мм}$), клас стійкості до сегрегації SR1 (індекс сегрегації $SR=12,8\%$).

9. Розроблені дисперсно-армовані самоущільнювальні бетони характеризуються швидким наростанням міцності ($R_{ct}^2/R_{ct}^{28}=0,55>0,50$) та відносяться до високоміцних ($R_{ct}^{28}=104,5 \text{ МПа}$). При армуванні базальтовою фіброю коефіцієнт конструктивної якості (ККЯ) самоущільнювальних бетонів зростає від 41,9 до 43,4 МПа. Модуль пружності фіброармованого самоущільнювального бетону зростає від 51,6 до 63,9 ГПа, а коефіцієнт Пуассона знижується від 0,19 до 0,17 порівняно із самоущільнювальним бетоном без фібри. Призмova міцність самоущільнювальних бетонів, армованих базальтовою фіброю – 96,2 МПа.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ САМОУЩІЛЬНЮВАЛЬНИХ ФІБРОБЕТОНІВ З ВИСОКИМ ВМІСТОМ ЗОЛИ ВИНЕСЕННЯ

Одним з основних завдань сучасного будівництва є виконання проектів у гармонії з природою та дотриманням концепції сталого розвитку, пов'язаної з застосуванням високофункціональних екологічно чистих матеріалів. В контексті бетону, який є найбільш застосовуваним будівельним матеріалом, необхідно визначити менш дорогі замітники цементу. В останні роки багато досліджень присвячено використанню додаткових цементуючих матеріалів (supplementary cementitious materials (SCM)), таких як зола винесення, мікрокремнезем, метакаолін та ін., для покращення властивостей бетонів та зниження витрат на будівництво [1]. Фундаментальними елементами екологічних технологій бетону для підтримки навколишнього середовища відповідно до стратегії сталого розвитку є збереження первинних матеріалів, підвищення довговічності бетонних конструкцій і цілісний підхід до технології [2]. Однією з інноваційних галузей технології бетону є технологія самоущільнювальних бетонів (Self-Compacting Concrete (SCC)).

Самоущільнювальний бетон містить велику кількість додаткових цементуючих матеріалів, суперпластифікатора та добавки, що регулює в'язкість бетонної суміші. Характеристики цього бетону (великий вміст цементного тіста та мінеральних наповнювачів, співвідношення крупного та дрібного заповнювача близьке до 1), пов'язані з умовами його укладання, можуть змінити його механічну поведінку, порівняно з традиційний бетоном, який вкладається вібруванням. Використання мінеральних добавок, таких як зола винесення, може призвести до збільшення деформацій зсідання такого бетону [3, 4].

4.1. Дослідження впливу золи-винесення на властивості в'язучих систем

При розробці нових рецептур бетонних сумішей крім класичних вимог все більшого значення набуває довговічність бетону та споживання енергії на його виробництво. При цьому для підтримання екологічного балансу вирішальну роль відіграє вміст портландцементного клінкеру в складі бетонної суміші. Для сучасних бетонів підвищуються вимоги щодо текучості і можливості їх самоущільнення, тому в складі бетонної суміші повинен бути використаний дрібнодисперсний наповнювач. Особливу увагу в цьому випадку необхідно звернути на такий матеріал як зола винесення, який в даний час розцінюється як відходи виробництва [5].

Для підтримання високої текучості та попередження розшаровування бетонної суміші, вільнотекуче цементне тісто, яке є основою самоущільнювальних бетонів, повинно характеризуватись певною в'язкістю. Механізмом для контролю текучості без сегрегації фаз при транспортуванні та формуванні є присутність хімічних добавок, якість цементного тіста і хімія поверхні частинок дрібної фракції (портландцементу, мікронаповнювачів, мінеральних добавок).

Дослідженнями впливу суперпластифікатора полікарбоксилатного типу (СП) та регулятора в'язкості (РВ) самоущільнювальних бетонів встановлено, що введення в цементуючу систему при постійному $V/C=0,25$ 1,3 мас.% суперпластифікатора забезпечує зростання діаметра розпливу тіста за циліндром Суттарда до 300 мм. Для одержання рівнорухливого цементного тіста без добавок необхідно збільшувати кількість води до $V/C = 0,55$ (рис. 3.1). При цьому зміна водопотреби портландцементу становить $\Delta V/C=54,5\%$. Введення в цементну систему регулятора в'язкості спричиняє незначне зростання водопотреби цементного тіста. Зміна водопотреби портландцементу з добавками суперпластифікатора полікарбоксилатного типу та регулятора в'язкості становить $\Delta V/C=47,27\%$.

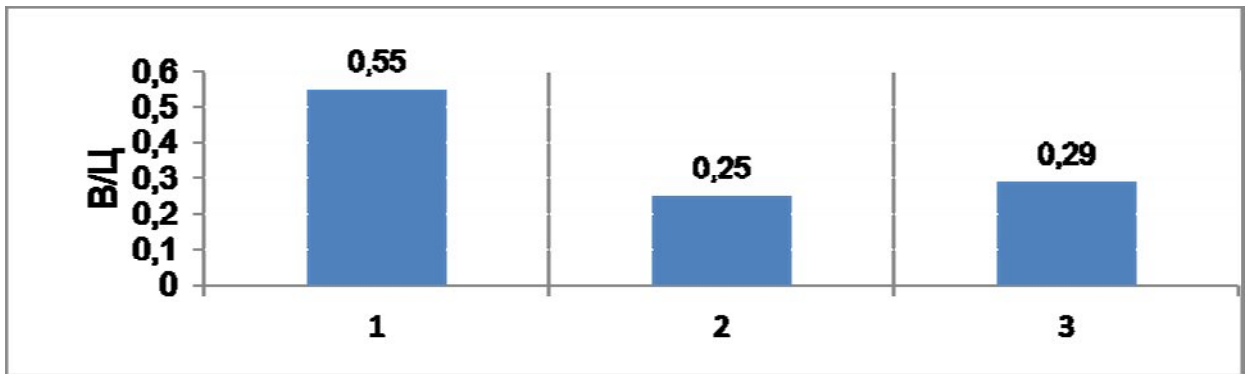


Рис. 4.1. Вплив хімічних добавок на водопотребу портландцементу ПЦ II/A-III-500 (РЦ=300 мм): 1 – без добавок; 2 – 1,3 мас. % СП; 3 – 1,3 мас. % СП та 0,25 мас. % РВ

Дослідженнями впливу хімічних добавок на нормальну густоту цементного тіста встановлено (рис. 4.2), що нормальна густота цементного тіста при введенні 1,3 мас.% суперпластифікатора полікарбоксилатного типу знижується від 26 % до 18 %. Використання 0,25 мас.% регулятора в'язкості призводить до незначного зростання нормальної густоти цементного тіста (НГТ=19 %).

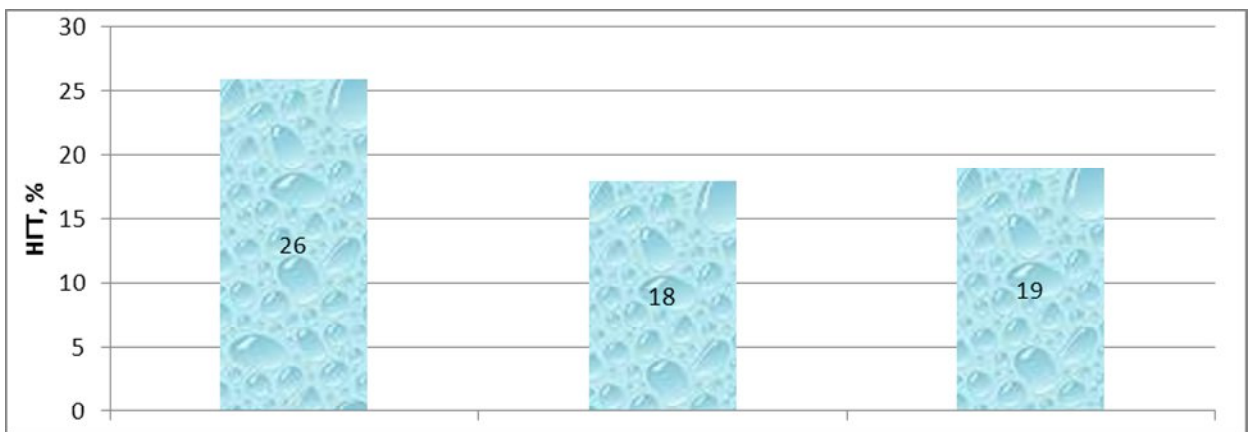


Рис. 4.2. Вплив хімічних добавок на нормальну густоту цементного тіста: 1 – без добавок; 2 – 1,3 мас. % СП; 3 – 1,3 мас. % СП та 0,25 мас. % РВ

Слід відзначити, що при одержанні рівнорухливого цементного тіста (РЦ=300 мм) з добавкою суперпластифікатора та регулятора в'язкості водопотреба портландцементу дещо зростає, разом з тим збільшується і в'язкість

цементного тіста (час розливу тіста до 250 мм за циліндром Стуттарда)
(рис. 4.3).

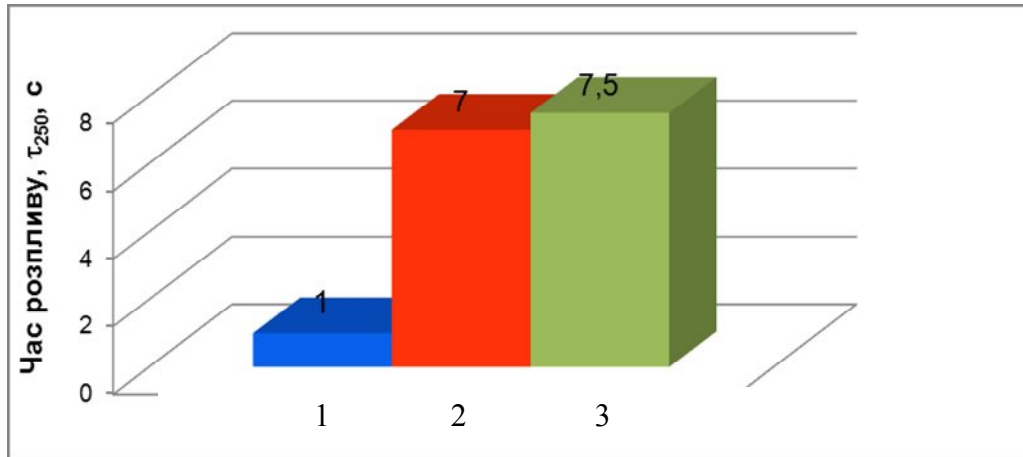


Рис. 4.3. Вплив хімічних добавок на умовну в'язкість портландцементу ПЦ П/А-Ш-500: 1 – без добавок; 2 – 1,3 мас. % СП; 3 – 1,3 мас. % СП та 0,25 мас. % РВ

Використання бетону з підвищеним вмістом золи-винесення одержало популярність в якості ресурсозберігаючої технології, яка дозволяє одержувати міцний і стійкий до різних впливів бетон. Бетон, що містить золу-винесення, більше, ніж на 50 відсотків за масою від загальної кількості цементуючих матеріалів вважається бетоном з високим вмістом золи винесення. Виробництво портландцементу є не тільки дорогим і енергоємним, але це також супроводжується виділенням великої кількості двоокису вуглецю. У 2014 році більше 100 тисяч тонн золи-винесення вироблено на Бурштинській ТЕС. Можливість використання цих відходів величезна. Скажімо, у Японії відсоток використання відходів від спалювання вугілля сягає понад 95%. В Україні цей відсоток досить низький – менше 10% [21]. Тому в роботі проводили дослідження впливу золи-винесення на властивості цементного тіста.

При одержанні вільнотекучого цементного тіста (розлив тіста за циліндром Стуттарда до 300 мм) в присутності суперпластифікатора та регулятора в'язкості заміна 55, 70 та 85 мас.% цементу золою винесення призводить до зниження водопотреби цементного тіста з 29 до 27% (рис. 4.4).

Слід відзначити, що збільшення кількості золи виносення в цементному тісті від 55 до 85 мас.% призводить до зменшення умовної в'язкості цементного тіста від 8,3 до 6,4 с відповідно.



Рис. 4.4. Розплив цементного тіста за циліндром Сутгарда

Результатами визначень об'ємного коефіцієнта водовідділення (K_v , %) згідно з ДСТУ Б В.2.7-186:2009 встановлено, що для ПЦ І-500 $K_v=12,1\%$ (рис. 4.5). Використання 1,3 мас.% суперпластифікатора полікарбоксилатного типу та 0,25 мас.% регулятора в'язкості забезпечує зменшення водовідділення портландцементу. Використання 1,3 мас.% суперпластифікатора полікарбоксилатного типу та 0,25 мас.% регулятора в'язкості та 70 мас.% золи виносення забезпечує зменшення водовідділення в'язучого внаслідок гомогенізації суспензії та збільшення дисперсності, що пояснюється вищою седиментаційною стійкістю дрібних часток золи виносення призводить до ефективної стабілізації цементних систем та зменшує об'ємний коефіцієнт водовідділення до 0%.

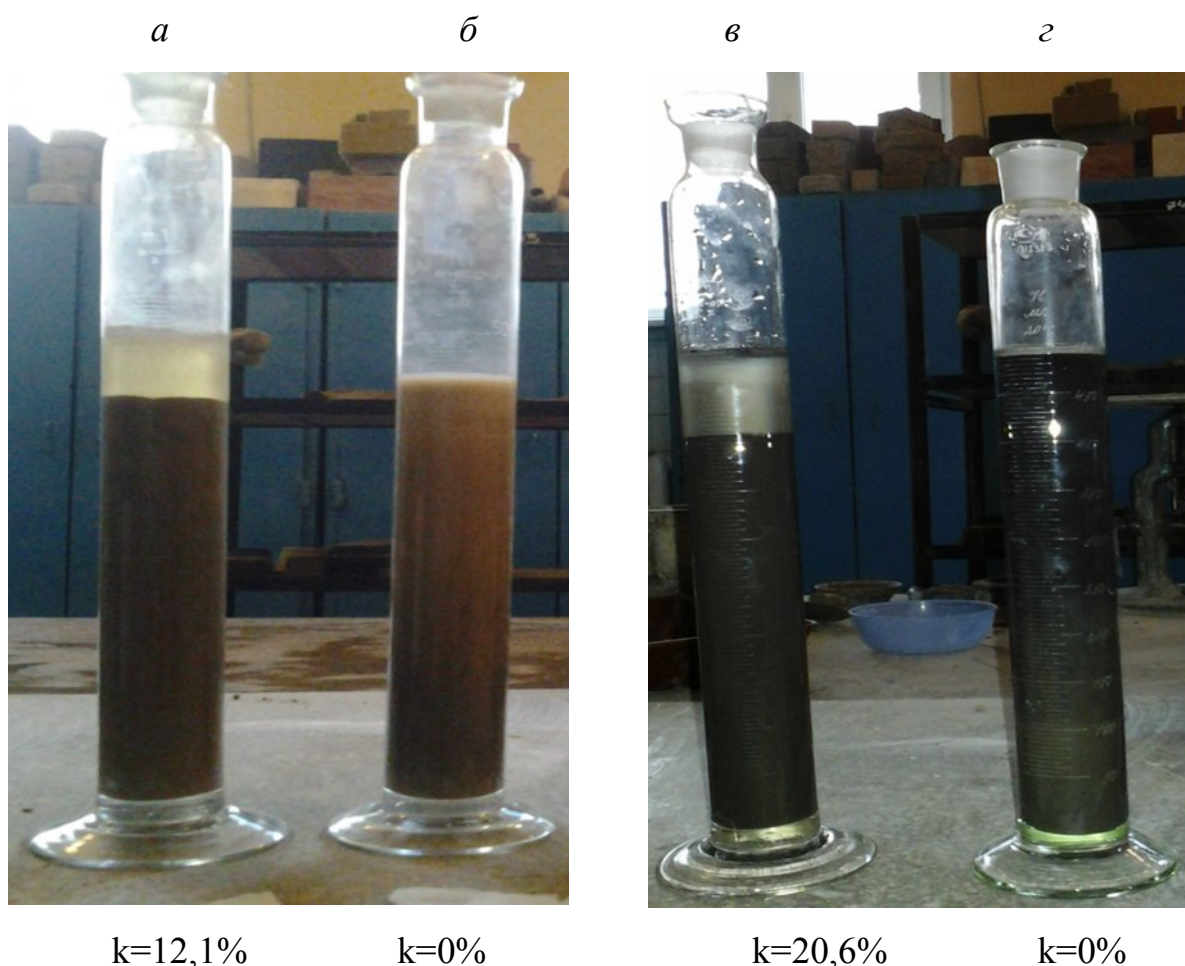


Рис. 4.5. Водовідділення згідно з ДСТУ Б В.2.7-186:2009: а - ПЦ I-500; б - ПЦ I-500 +1,3 мас. % СП та 0,25 мас. % РВ; в - ПЦ I-500 + 70 мас.% ЗВ; г - ПЦ I-500 + 70 мас.% ЗВ+1,3 мас. % СП та 0,25 мас. % РВ

Вплив заміни частини цементу золою винесення на міцність цементного каменю представлено в табл. 4.1. Дослідження проводили при введенні в цементне тісто 1,3 мас. % СП та 0,25 мас. % РВ, розплив тіста за циліндром Суттарда становить 300 мм. Так, при випробуванні цементного каменю, одержаного з рівнорухливого цементного тіста встановлено, що заміна 55 мас. % золою винесення в присутності хімічних добавок вже через 3 доби тверднення забезпечує зростання міцності цементного каменю в 2 рази, через 28 діб тверднення міцність цементного каменю з золою винесення на 47 % вища, порівняно з каменем без добавок. Заміна 70 мас.% цементу золою винесення призводить до спаду міцності цементного каменю в

початкові терміни тверднення, однак через 28 діб тверднення міцність цементного каменю становить 28,8 МПа, в той час як камінь з цементного тіста без добавок характеризується міцністю 25,2 МПа.

Таблиця 4.1

Вплив золи винесення на властивості цементного каменю
(1,3 мас. % СП + 0,25 мас. % РВ, розплив тіста
за циліндром Суттарда 300 мм)

Вміст золи винесення, мас. %	В/Ц	Границя міцності при стиску МПа, через, діб тверднення			
		1	3	7	28
-	0,55	5,8	16,1	24	25,2
55	0,29	5,4	32,3	35,5	37,1
70	0,28	1,8	10,3	11,4	28,8
85	0,27	0,3	4,9	6,5	10,4

Збільшення кількості золи винесення до 85 мас. % призводить до ще більшого спаду міцності цементного каменю. Таким чином, заміна 70 мас. % портландцементу золою винесення та використання 1,3 мас. % суперпластифікатора полікарбоксилатного типу і 0,25 мас. % регулятора в'язкості дозволяє одержувати з рівнорухливого цементного тіста цементний камінь з такою ж міцністю (28,8 МПа), як на портландцементі. Тому виникає необхідність дослідження самоущільнювальних бетонів з високим вмістом золи винесення.

4.2. Оптимізація складів самоущільнювальних бетонів з високим вмістом золи винесення, армованих базальтовою фіброю

Технологія самоущільнювального бетону дозволяє швидше і безпечніше надавати форму будівельним об'єктам порівняно з

використанням бетону із звичайними властивостями. У випадку з самоущільнювальним бетоном надання форми бетонним елементам виконується набагато простіше, а кінцевий результат розширює свободу дій при використанні затверділого бетону. Однією з модифікацій такого композиту є додавання в бетонну масу різних волокон в якості дисперсного армування, що дозволяє збільшити міцність цементної матриці на розтяг, її тріщиностійкість, ударну в'язкість та забезпечує його надійну експлуатацію [5].

Механічні властивості фіброармованих цементних композицій є результатом синергічної взаємодії між властивостями бетонної матриці і ефектом їх підсилення, що надає дисперсне армування. При цьому ефект підсилення залежить від розмірів, геометрії і дозування волокон, їх міцності, розподілу і орієнтації по відношенню до прикладеного навантаження та зв'язків волокно-матриця [6].

За допомогою методу експериментально-статистичного моделювання, суть якого полягає у встановленні математичної залежності між заданими властивостями і складом або витратою матеріалів, досліджено властивості самоущільнювальних бетонів з високим вмістом золи виносення, армованих базальтовим волокном. З цією метою на основі портландцементу ПЦ II/A-III-500 ВАТ "Волиньцемент" з різним вмістом золи виносення (55; 70; 85 %) та змінною витратою базальтової фібри (0; 0,5; 1,0 %) готували самоущільнювальні бетони при сталому вмісті 1,3 мас.% суперпластифікатора та 0,25 мас. % регулятора в'язкості. Дослідження впливу золи виносення проводили на самоущільнювальних бетонах, склад яких представлено на рис. 4.6, В/В=0,32, загальна витрата в'язучої речовини на 1 м³ бетону складала 515 кг.

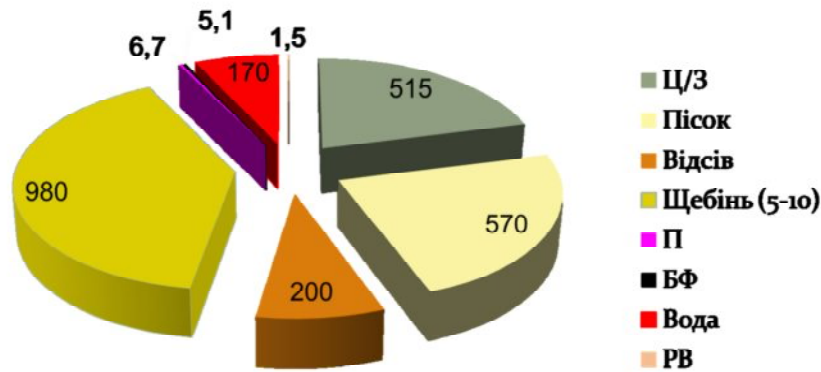


Рис. 4.6. Склад самоущільнювальних бетонів

В результаті проведеного двофакторного експерименту отримана математична модель процесу тверднення самоущільнювального бетону в вигляді рівняння регресії:

$$Y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{12} x_1 x_2 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2,$$

де x_1 – витрата фібри;

x_2 – витрата золи-винесення;

$b_0, b_1, b_2, b_{12}, b_{11}, b_{22}$ – коефіцієнти регресії.

Основні характеристики плану експерименту, матриця планування, склади бетонів результати повного двофакторного експерименту наведені в табл. 4.2, 4.3.

Таблиця 4.2

Характеристика планування експерименту

Характеристика	Вміст дододавок, % від маси в'язучого	
	Витрата фібри (x_1)	Витрата золи (x_2)
Основний рівень "0"	0,5	70
Нижній рівень "-1"	0	55
Верхній рівень "+1"	1	85
Інтервал варіювання	0,5	15

При плануванні експерименту були вибрані наступні контрольні параметри:

U_1 – розплив конуса самоущільнювальних фібробетонів з високим вмістом золи виносення;

U_2 – середня густина самоущільнювальних фібробетонів, $\rho_{\text{сер}}$, кг/м³;

U_3, U_4, U_5, U_6 – границя міцності зразків на стиск через 2, 7, 28 та 90 діб тверднення відповідно;

U_7 – границя міцності зразків на згин через 28 чи 90 діб тверднення.

Для пошуку значення факторів X_1 (вміст фібри) і X_2 (вміст золи виносення), при яких досліджувані функції приймають максимальне значення, використали дисоціативно-кроковий метод оптимізації [16, 17, 43].

Розрахунок коефіцієнтів регресії проведений з допомогою комп'ютерної техніки за спеціально складеною програмою на мові EXSEL, в якій використовується матричний підхід до регресивного аналізу і знаходження коефіцієнтів рівнянь регресії. Коефіцієнти регресії представлені в табл. 4.4.

Таблиця 4.3

Матриця планування і результати повного двофакторного експерименту

Вміст фібри, %	Вміст золи, мас. %	РК, мм	Границя міцності при стиску, МПа, через, діб				Границя міцності на згин, МПа	Середня густина, кг/м ³
			2	7	28	90		
1	85	730	3,8	7,1	22,6	29,0	7,65	2330
1	55	660	15,3	25,8	38,0	48,0	11,57	2350
0	85	680	3,2	8,6	15,0	23,8	4,77	2320
0	55	720	15,8	28,9	38,7	52,2	8,01	2340
1	70	700	7,2	16,3	26,8	36,6	8,46	2330
0	70	700	7,9	18,5	28,7	33,4	4,68	2320
0,5	85	750	3,5	9,1	25,4	28,3	6,66	2310
0,5	55	730	15,5	26,4	41,8	53,8	9,90	2350
0,5	70	700	7,6	21,3	29,5	34,5	6,30	2320

Таблиця 4.4

Коефіцієнти рівнянь регресії

Функції відгуку	Коефіцієнти регресії					
	b_0	b_1	b_2	b_{11}	b_{12}	b_{22}
Розплив конуса						
Y_1	718,889	-1,667	8,333	-28,333	27,500	11,667
Середня густина бетону						
Y_2	2318,70	5,000	-13,333	6,778	2,500	6,778
Міцність бетону при стиску						
Y_3	7,534	-0,097	-6,003	0,026	0,260	1,966
Y_4	19,630	-1,128	-9,378	-1,395	0,407	-1,045
Y_5	31,600	0,833	-8,767	-4,900	2,075	2,400
Y_6	37,450	2,208	-11,092	4,475	2,363	0,575
Міцність бетону на згин						
Y_7	6,544	1,703	-1,733	-0,097	-0,170	1,613

Аналіз представлених коефіцієнтів регресії дозволяє зробити ряд технологічних висновків. Так, додатні значення коефіцієнту b_1 свідчать про позитивний вплив базальтової фібри на середню густина самоущільнювальних бетонів та міцність при стиску через 28 та 90 діб тверднення. Заміна частини портландцементу золою винесення позитивно впливає лише на збільшення рухливості бетонних сумішей, однак на середню густина і міцність самоущільнювальних бетонів введення золи винесення впливає негативно, що підтверджується негативними значеннями коефіцієнтів b_2 . Використання цього наповнювача призводить до збільшення щільності суміші у вільнонасіпаному та ущільненому станах, оскільки тонкодисперсні частинки золи-виносу розсувають зерна портландцементу, звільняючи простір для осадження продуктів реакції і прискорюючи тим самим швидкість гідратації основних клінкерних мінералів (“ефект дрібних порошоків”) [39, 40]. Сумісне введення базальтової фібри та золи винесення позитивно впливає на реологічні властивості бетонних сумішей та міцність бетону, про що свідчать додатні значення коефіцієнтів b_{12} . Однак, від`ємні

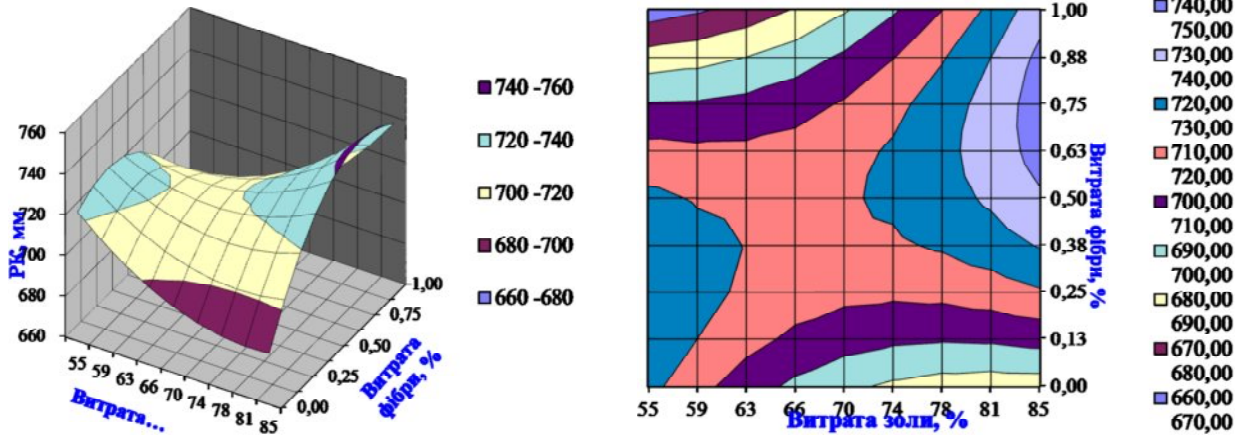
значення коефіцієнтів b_{11} та b_{22} вказують на те, що при введенні максимальної кількості золи-виносу та базальтової фібри міцність бетону знижується. Слід відзначити, що введення базальтової фібри до самоущільнювальних бетонів з високим вмістом золи винесення позитивно впливає на міцність при згині, про що свідчать позитивні значення коефіцієнтів b_1 та b_{11} .

За отриманими рівняннями регресії побудовані ізопараметричні поверхні та діаграми золонаповненого самоущільнювального фіброармованого бетону, що адекватно описують залежність рухливості, середньої густини, міцності на стиск та згин залежно від змінних параметрів (рис. 4.7, 4.8). Аналіз отриманих математичних залежностей, а також їх графічна інтерпретація дозволяють визначити оптимальний склад фіброармованого самоущільнювального бетону з високим вмістом золи винесення за критеріями легковкладальності та міцності.

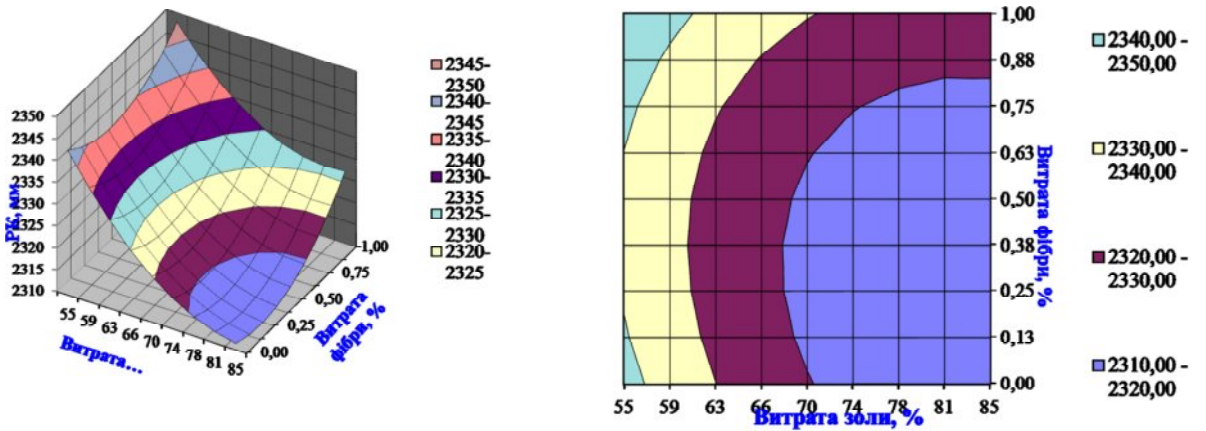
При верифікації фіброармованого самоущільнювального бетону з високим вмістом золи винесення згідно з EN12350 з використанням оптимальної кількості золи винесення (70 % від маси в'язучого) та базальтової фібри (0,5 %) при сталій витраті суперпластифікатора полікарбоксилатного типу та регулятора в'язкості одержали наступні характеристики бетонної суміші: клас розпливу SF2 (діаметр розпливу 660-730 мм), клас в'язкості VS2 ($T_{500}=5-8$ с), клас здатності до проникнення PJ1 (ступінь блокування PJ=8-9 мм), клас стійкості до сегрегації SR1 (індекс сегрегації SR=10-15%).

Середня густина фіброармованих самоущільнювальних бетонів з високим вмістом золи винесення складає 2310-2350 кг/м³, а міцність при стиску через 28 та 90 діб становить 29,5 і 34,5 МПа відповідно, міцність на згин – 6,3 МПа.

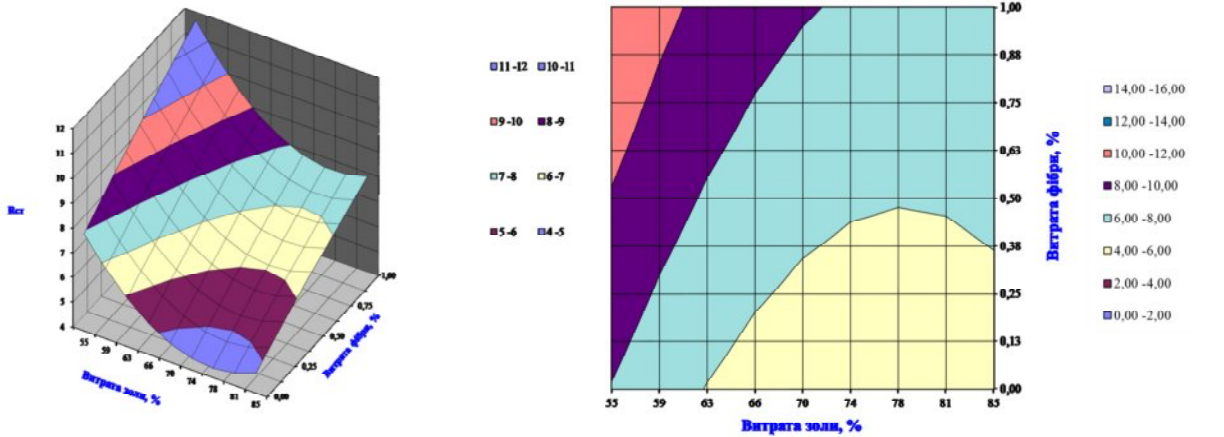
діаметр розпливання конуса бетонної суміші



середня густина бетону



граніця міцності на згин

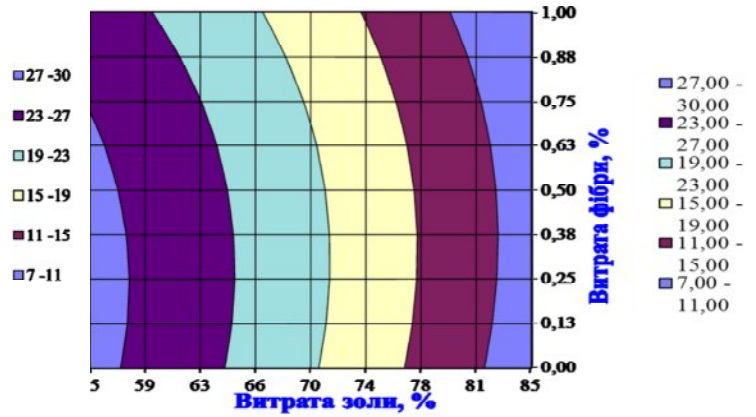
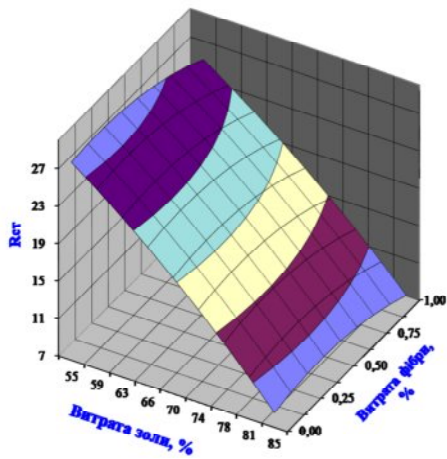


а

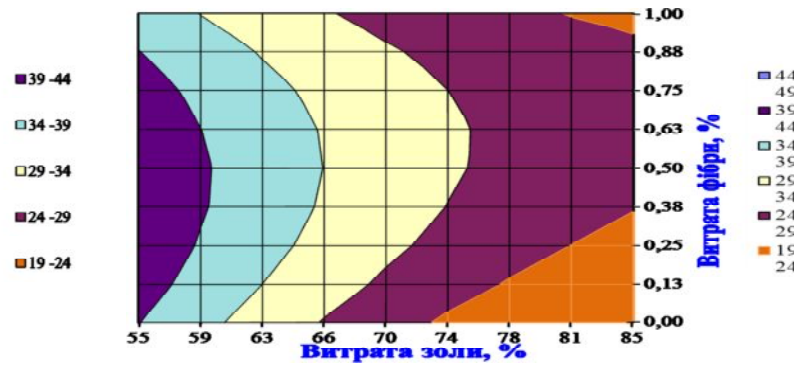
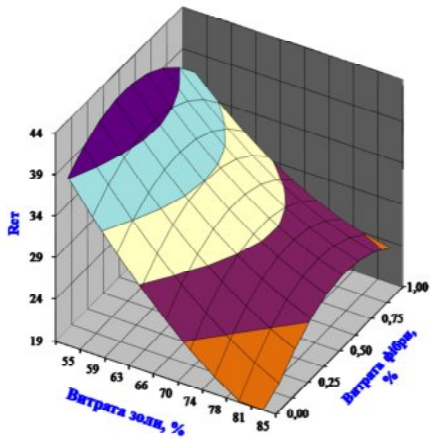
б

Рис. 4.7. Ізопараметричні поверхні (а) і діаграми (б) розпливання стандартного конуса бетонної суміші, середньої густини та границі міцності на згин самоущільнювального бетону залежно від витрати золи винесення та базальтової фібри

7 діб



28 діб



90 діб

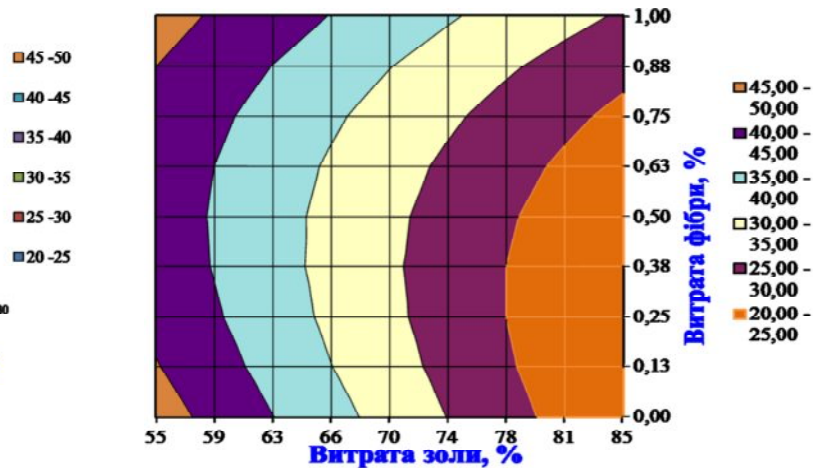
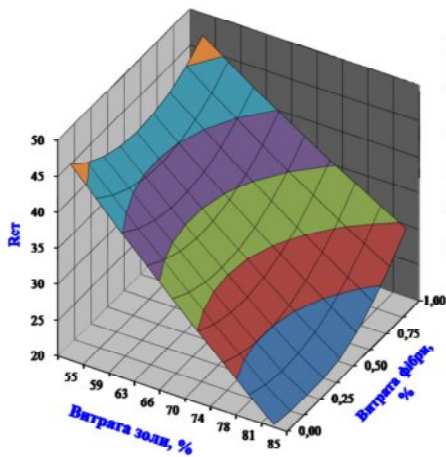


Рис. 4.8. Ізопараметричні поверхні (а) та діаграми (б) границі міцності на стиск фіброармованого самоущільнювального бетону з високим вмістом золи винесення через 7, 28 та 90 діб тверднення в нормальних умовах

Таким чином, для забезпечення необхідної реологічної структури бетонної суміші слід дотримуватися оптимального варіанту – кількість портландцементу має утворювати правильну структуру продуктів гідратації та заповнювати порожнечу між зернами заповнювача та наповнювача.

4.3. Будівельно-технічні властивості фіброармованих самоущільнювальних бетонів з високим вмістом золи винесення

4.3.1. Технологічні властивості фіброармованих самоущільнювальних бетонів з високим вмістом золи винесення.

Відповідно з методом випробувань FFB (Fließmaß – Fließzeit – Blocker – Test) показник текучості бетонної суміші визначається як середнє значення діаметру розпливання конуса, а показник умовної в'язкості – як час розтікання бетонної суміші із конуса до розпливу 500 мм (T_{500}). Проведеними дослідженнями встановлено (рис. 4.9), що заміна в'язучого в складі бетону золою винесення забезпечує розплив конуса самоущільнювальних бетонних сумішей 680-720 мм, введення 0,5 % базальтової фібри практично не впливає на зміну легкоукладальності самоущільнювальної бетонної суміші. Умовну в'язкість самоущільнювальних бетонних сумішей оцінювали за часом розтікання до розпливу конуса 500 мм (T_{500}). Умовна в'язкість самоущільнювальних бетонних сумішей з різним вмістом золи винесення та базальтової фібри знаходиться в межах 5 – 6 с (рис. 4.11), що відповідає вимогам до самоущільнювальних бетонів і дозволяє віднести такі суміші до класу за умовною в'язкістю VS2 ($T_{500} \geq 2$ с).

Слід відзначити, що введення базальтової фібри не спричиняє значної зміни повітрязахоплення бетонних сумішей. Проведеними дослідженнями встановлено, що в свіжоприготованих фіброармованих самоущільнювальних бетонних сумішах вміст повітря становить 0,35 - 0,5%.

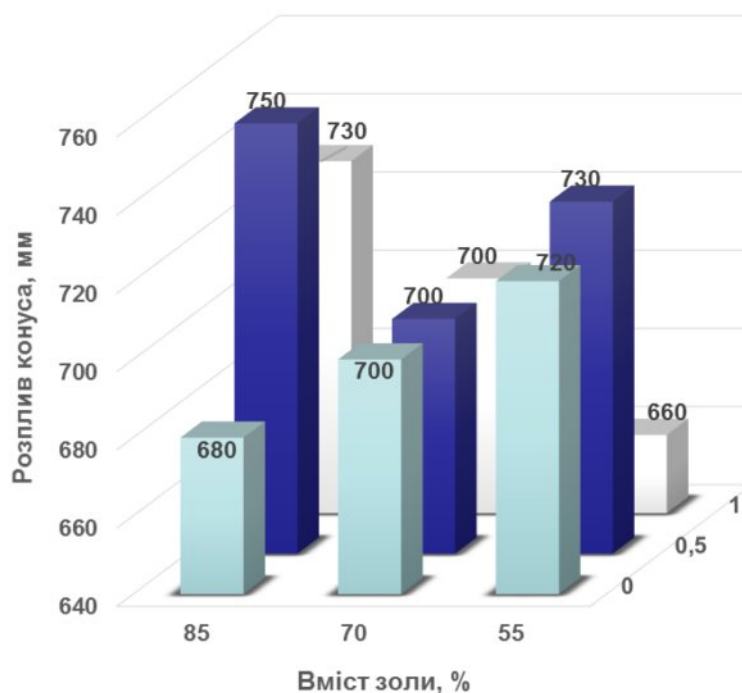


Рис. 4.10. Розпливання стандартного конуса самоущільнювальних фібробетонів з високим вмістом золи винесення

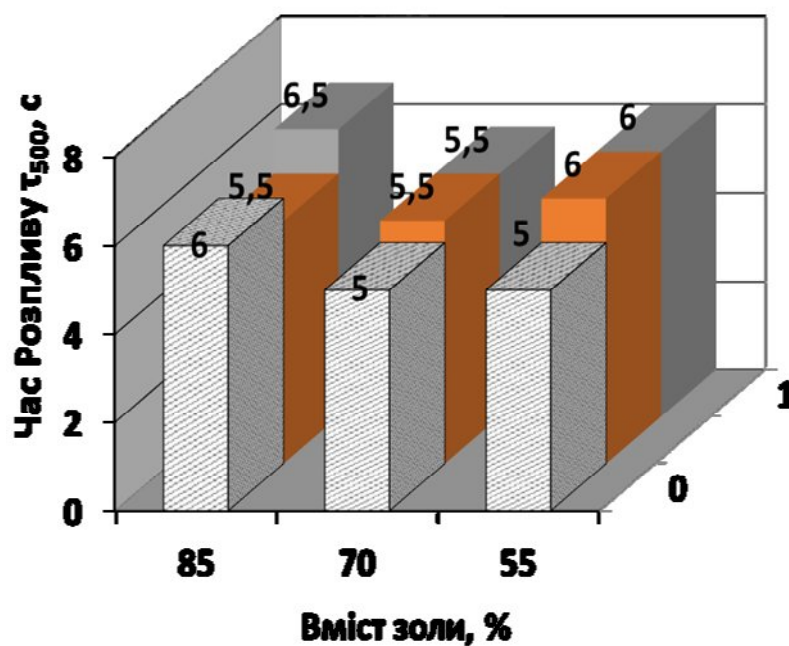


Рис. 4.11. Умовна в'язкість самоущільнювальних фібробетонів з високим вмістом золи винесення

Заповнюючу здатність приготованих фіброармованих самоущільнювальних з високим вмістом золи винесення визначали за

показником текучості та візуально J-кільцевим методом. Визначення здатності до самоущільнення за J-кільцевим методом показали задовільну можливість бетонних сумішей долати перешкоди у вигляді близьковстановлених арматурних стержнів без блокування (рис. 4.12).



Рис. 4.12. Визначення долаючої здатності фіброармованої самоущільнювальної бетонної суміші

Самоущільнювальні суміші з високим вмістом золи винесення за діаметром розпливання конуса ($R_K=660-725$ мм) відповідають марці консистенції бетонної суміші F6 (ДСТУ Б В.2.7-176:2008) [78].

4.3.2. Міцнісні характеристики

Однією з найважливіших характеристик бетону є його міцність. Зі збільшенням кількості золи-винесення, міцність знижується. Заміна 55 мас.% цементу золою винесення дозволяє одержати самоущільнювальний бетон з міцністю 38,7 МПа через 28 діб тверднення в нормальних умовах, введення 0,5 % базальтової фібри забезпечує зростання міцності такого бетону до 41,8 МПа ($\Delta R=10,8$ %). Для бетонів з вмістом 85 мас. % золи винесення через 28 діб тверднення в нормальних умовах міцність складає 15,0 МПа, введення 0,5 % базальтової фібри забезпечує зростання міцності до 25,4 МПа

($\Delta R=69\%$) (рис. 4.13). Результати визначення границі міцності на розтяг при згині наведено на рис. 4.14 та в табл. 4.5.

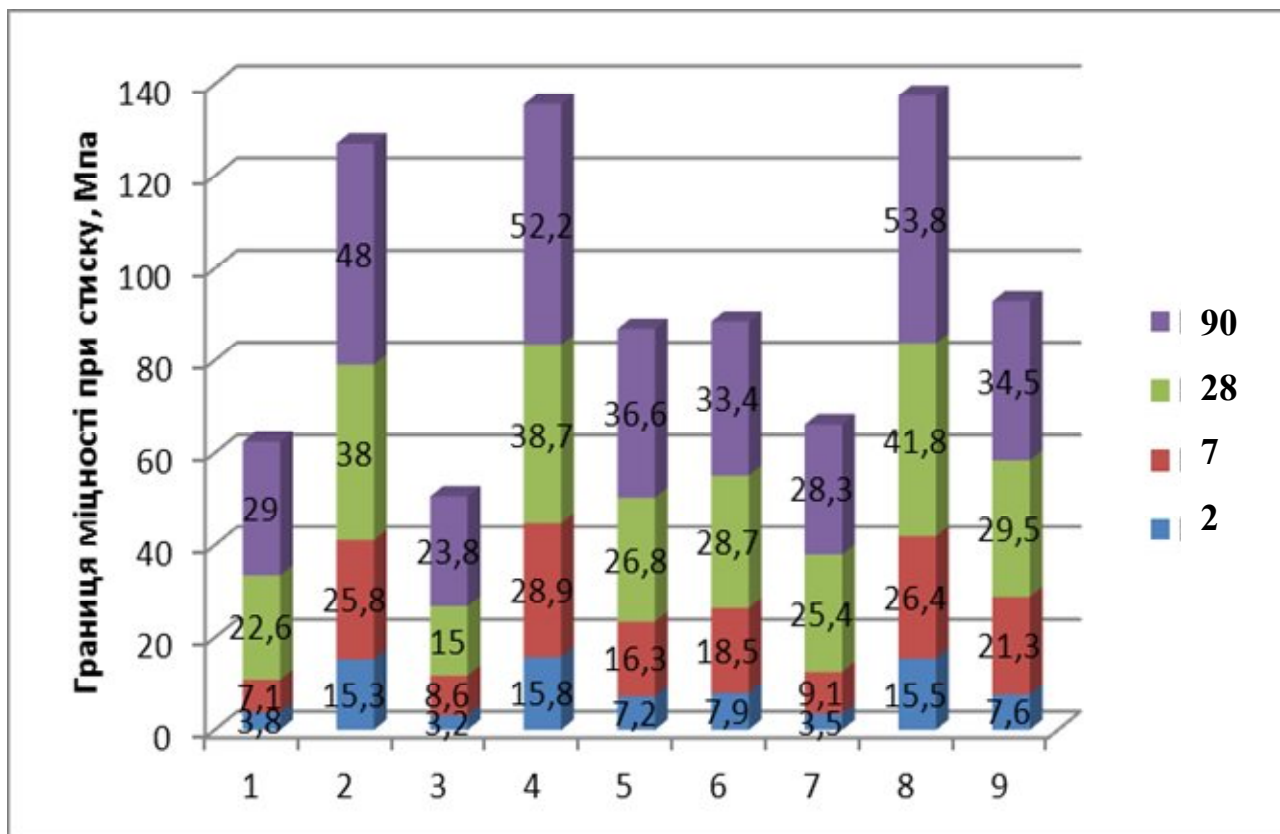


Рис. 4.13. Границя міцності при стиску самоущільнювальних бетонів залежно від вмісту золи виносення та базальтової фібри

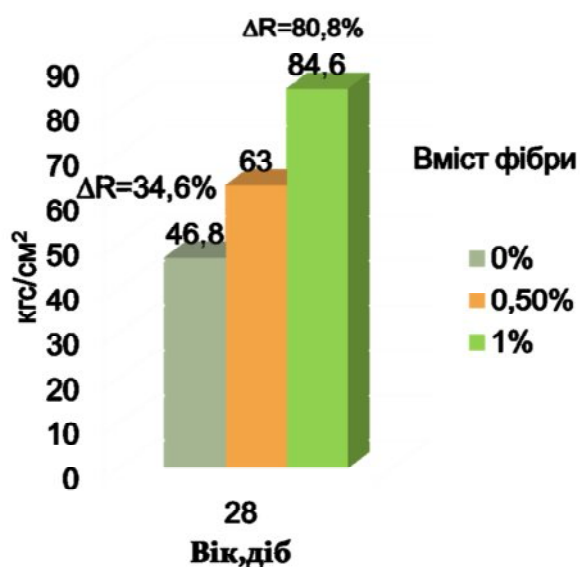


Рис. 4.14. Границя міцності на розтяг при згині самоущільнювальних бетонів з вмістом золи виносення 70 мас.% та базальтовою фіброю

Таблиця 4.5

Результати випробувань зразків на стиск та розтяг при згині

№ п/п	Витрата золи, мас. %	Витрата фібри, %	Результати випробувань кубів 100x100x100 мм			Результати випробувань балок 100x100x400 мм			Відн- ння R/R
			Руйнівне наванта- ження, кН	Міцність бетону на стиск $R_{ст}$, МПа		Руйнівне наванта- ження, кН	Міцність бетону на згин $R_{зг}$, МПа		
				Зразка	Середнє		Зразка	Середнє	
1	55	0	705	67,0	67	17,9	8,0	8,0	0,12
			705	67,0		17,7	8,0		
			700	66,5		17,0	7,7		
2		0,5	837,5	79,6	79,3	21,4	9,6	9,9	0,13
			832,5	79,1		22,2	10,0		
			832,5	79,1		21,8	9,8		
3		1	612,5	58,2	58,5	25,0	11,3	11,6	0,20
			617,5	58,7		25,5	11,5		
			610	58,0		25,9	11,7		
4	70	0	385	36,6	36,6	10,4	4,7	4,7	0,13
			385	36,6		10,1	4,6		
			382,5	36,3		10,4	4,7		
5		0,5	462,5	44,0	44,5	14,2	6,4	6,3	0,14
			467,5	44,4		13,5	6,1		
			470	44,6		13,8	6,2		
6		1	375	35,6	36,1	18,4	8,3	8,5	0,24
			382,5	36,4		19,0	8,5		
			377,5	35,9		18,8	8,5		
7	85	0	330	31,4	32,1	10,7	4,8	4,8	0,15
			337,5	32,1		10,7	4,8		
			337,5	32,1		10,3	4,6		
8		0,5	402,5	38,2	38	15,0	6,8	6,7	0,18
			397,5	37,8		14,5	6,5		
			400	38,0		14,8	6,7		
9		1	340	32,3	32,3	17,1	7,7	7,7	0,24
			340	32,3		17,1	7,7		
			335	31,8		16,4	7,4		

Міцність на розтяг при згині бетону з вмістом 1% базальтової фібри підвищується до 30,8 % для бетонів з вмістом 55 мас. % золи виносення в порівнянні із бетоном без фібри та до 19% з вмістом 0,5% базальтової фібри. Клас бетону за міцністю на розтяг при згині для контрольних зразків бетону R_{t_b} 6,0; для зразків бетону, армованих базальтовою фіброю у кількості 0,5% - R_{t_b} 7,2; для зразків бетону, армованих базальтовою фіброю у кількості 1% - R_{t_b} 8,0. При заміні у в'язучому 70% золи виносу при введенні фібри міцності на згин зростають на 34,6 та 80,8% відповідно, що відповідає класу бетону за міцністю на розтяг при згині R_{t_b} 3,2, 4,8 та 6,4. При вмісті у в'язучому 85% золи виносу при вмісті базальтової фібри 0% міцність на згин складає 47,7 кгс/см². При введенні в склад 0,5 і 1% фібри міцності на згин зростають відповідно на 39,6 та 60,4%.

Так, самоущільнювальні бетони з вмістом золи виносення 70 мас. % характеризуються міцністю при згині 46,8 кгс/см², введення 0,5 % базальтової фібри забезпечує зростання міцності при згині 63 кгс/см² ($\Delta R=34,6$ %), збільшення вмісту фібри до 1 мас. % забезпечує зростання міцності до 84,6 кгс/см² ($\Delta R=80,8$ %).

4.3.3. Параметри порової структури

Основні властивості матеріалу – міцність, водопроникність, стійкість до зовнішніх впливів та довговічність визначаються характером пористості матеріалів [39]. З цією метою вивчено параметри порової структури дисперсноармованого самоущільнювального бетону з високим вмістом золи виносення згідно з ДСТУ Б В.2.7-170:2008 (табл. 4.6).

Слід відзначити, що чим нижче водопоглинання та значення коефіцієнта середнього розміру пор (λ) і чим вищий показник однорідності пор за розмірами (α), тим рівномірніше розподілені пори за розмірами, що забезпечує отримання щільної структури матеріалу. Як показали результати досліджень, що із збільшенням вмісту золи виносення в складі

самоушільнювального бетону відбувається деяке ущільнення структури бетону. Так, об'ємне водопоглинання самоушільнювального бетону з вмістом золи винесення в складі в'язучого 85 мас.% (РК=680 мм, В/В'яж=0,32), що характеризує його відкриту капілярну пористість (W_o), не перевищує 7,57-7,85 %.

Таблиця 4.6

Основні параметри пористої структури бетону

Вид та кількість добавки, мас. %			Водопоглинання, %		Показник середнього розміру пор, λ_1	Показник однорідності пор за розмірами, α
			за масою, W_m	за об'ємом, W_o		
Ц	З	Ф				
15	85	0	3,28	7,85	1,05	0,52
30	70	0	3,88	9,01	2,84	0,59
45	55	0	4,23	9,75	2,70	0,60
15	85	0,5	3,16	7,57	1,00	0,60
30	70	0,5	4,31	8,71	2,65	0,56
45	55	0,5	3,71	8,79	1,29	0,55

Дослідженнями впливу золи винесення та базальтової фібри на показники пористості бетонів встановлено, що збільшення кількості золи винесення в складі в'язучої композиції з 55 до 85 мас.% забезпечує зменшення показника середнього розміру пор з 2,7 до 1,05, при цьому показник однорідності пор за розмірами зменшується з 0,6 до 0,52.

Використання 0,5% базальтової фібри забезпечує зменшення показника середнього розміру пор з 2,7 до 1,29, при цьому показник однорідності пор за розмірами зменшується з 0,6 до 0,55.

Результати досліджень пористості свідчать, що об'єм пор самоущільнювальних бетонів із збільшенням вмісту в складі в'язучого золи виносення незначно зростає (рис. 4.15).

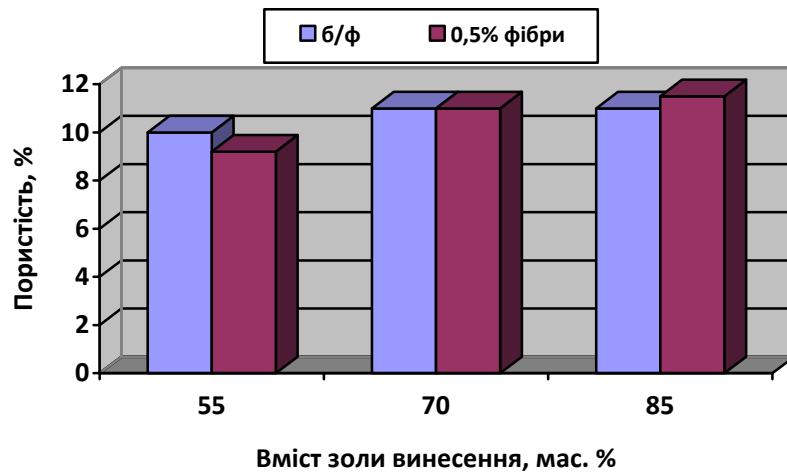


Рис. 4.15. Зміна пористості самоущільнювальних бетонів залежно від вмісту золи виносення в складі в'язучого

Таким чином, самоущільнювальні бетони з використанням в'язучих композицій, що містять від 55 до 85 мас.%, характеризуються покращеною поровою структурою – меншим середнім розміром пор, кількістю макропор та підвищеною однорідністю пор за розміром із забезпеченням дрібнопористої структури.

4.3.4. Водонепроникність

Особливості порової структури бетону, зокрема об'єм та розміри наскрізних пор, які забезпечують можливість фільтрації води крізь нього, визначають водонепроникність бетону [52]. Самоущільнювальні дисперсноармовані бетони з високим вмістом золи виносення характеризуються маркою за водонепроникністю W6-W8.

4.3.5. Корозійна стійкість

Дослідження корозійної стійкості дрібнозернистого бетону (В'яз:П=1:2) з вмістом золи виносення в складі в'язучої речовини 55, 70, 85

мас.% проведено за прискороною методикою (концентрація $\text{SO}_4^{2-} = 30000$ мг/л) []. Зразки бетону 1 добу тверднули в нормальних умовах, після чого контрольні зразки поміщали у воду, а другу частину – в розчин Na_2SO_4 .

Корозійну стійкість оцінювали за коефіцієнтом $K_{зг}$, оскільки він є чутливіший до дії агресивних середовищ (табл. 4.7). Як видно з результатів випробувань, зразки дрібнозернистого самоущільнювального бетону на основі в'язучої композиції, що містить 55 мас.% золи винесення після зберігання 8 тижнів в агресивному середовищі характеризуються зростанням міцності на стиск на 4-5% та згин на 23-24% порівняно з контрольними. Коефіцієнт стійкості такого дрібнозернистого бетону становить $K_{зг} = 1,23$. При збільшенні кількості золи винесення у в'язучій композиції з 55% до 70% спостерігається зменшення коефіцієнту корозійної стійкості на 6,5%, а при збільшенні вмісту золи з 55% до 85% -- на 19,5%.

Таблиця 4.7

Корозійна стійкість дрібнозернистих бетонів

№	Склад, мас. %		Границя міцності, МПа, у середовищі				Коефіцієнт корозійної стійкості	
			Na_2SO_4		H_2O			
	Ц	З	Згин	Стиск	Згин	Стиск	$K_{зг}$	$K_{ст}$
1	45	55	39,5	45,8	32,0	44,0	1,23	1,04
2	30	70	30,0	29,4	26,0	27,8	1,15	1,06
3	15	85	15,5	14,2	15,7	16,0	0,99	0,89

Значення коефіцієнтів корозійної стійкості $K_{зг}=0,99-1,23$ для самоущільнювальних бетонів з високим вмістом золи винесення вказує на збільшення стійкості бетону до дії агресивних середовищ ($K_{зг}>0,70$).

4.3.6. Деформативні властивості бетону під навантаженням

Самоущільнювальні бетони характеризуються підвищеним вмістом розчинової частини, що спричиняє їх підвищену деформативність. Традиційно бетони з литих сумішей характеризуються меншими величинами модуля пружності, підвищеними значеннями коефіцієнта Пуассона, поздовжніх та поперечних деформацій порівняно з самоущільнювальними бетонами. Деформативні та фізико-механічні властивості визначали при випробуванні шести серій призм 100x100x400 мм та кубів 100x100x100 мм самоущільнювальних бетонів з вмістом золи виносення 55, 70 та 85 мас. % без фібри та з базальтовою фіброю через 90 діб тверднення в нормальних умовах до рівня навантаження $\sim 0,6 P_p$ (P_p – руйнівне навантаження). Як показали результати досліджень, призмova міцність самоущільнювальних бетонів через 90 діб досягає 80-90% кубикової (рис. 4.16). Визначення модуля пружності та коефіцієнта Пуассона бетонів проведено при рівні навантаження 30 % від руйнівного ($\sigma=0,3P_p/S$).



а

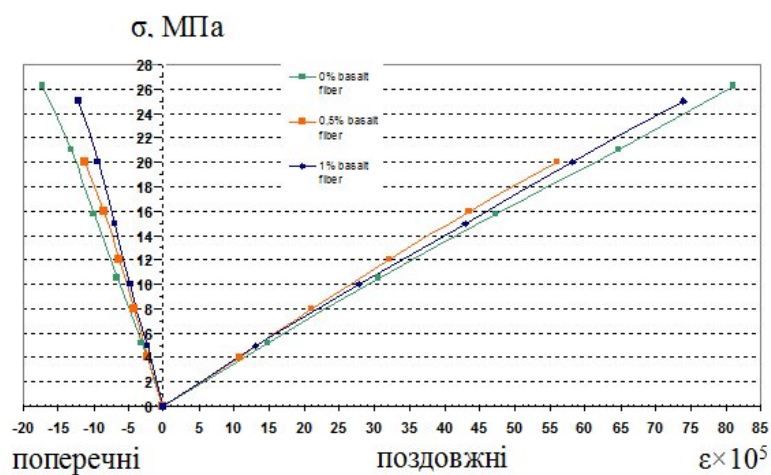


б

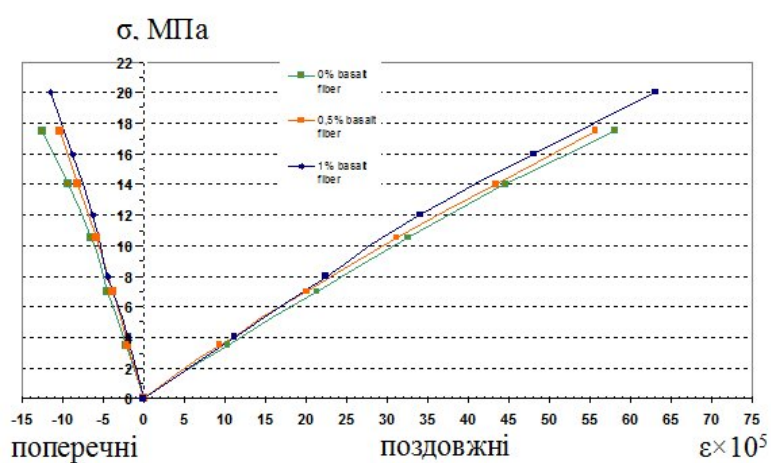
Рис. 4.16. Визначення модуля пружності (а) та призмової міцності (б) самоущільнювального бетону з високим вмістом золи виносення

На рис. 4.17 наведено залежність поздовжніх та поперечних деформацій бетонів від прикладеного навантаження через 90 діб тверднення в нормальних умовах. Самоущільнювальні бетони з високим вмістом золи винесення без фібри характеризуються підвищеними деформаціями під дією навантаження порівняно із самоущільнювальними бетонами з добавкою базальтового волокна. Як відомо [6], використання базальтової фібри покращує механічні властивості самоущільнювальних бетонів. Дослідженнями впливу базальтової фібри на властивості фіброармованих самоущільнювальних бетонних сумішей з високим вмістом золи виносу встановлено, що дисперсне армування забезпечує зростання напруження σ при сталому значенні відносних деформацій ϵ . Так, при заміні 55 мас. % цементу золою винесення та введенні 0,5 % базальтової фібри при значенні відносних деформацій $\epsilon=10\dots50\times10^{-5}$ забезпечується збільшення напружень σ на 7,3-10,1 % порівняно з бетонами без фібри. Для самоущільнювальних бетонів з вмістом 70 мас. % золи винесення цей показник знаходиться в межах 0,9-5,6 %.

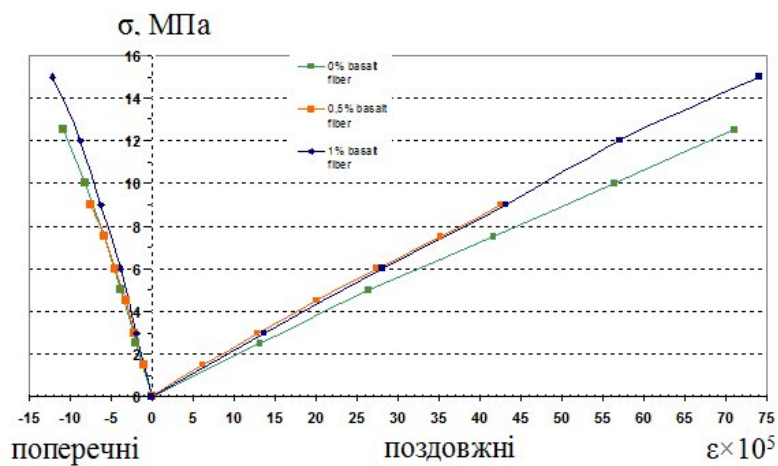
При заміні 85 мас. % цементу золою винесення при введенні 0,5 % базальтової фібри збільшення напружень на 4,5-13,1 % становить при значенні відносних деформацій $\epsilon=10\dots35\times10^{-5}$. На графіках можна виділити прямолінійні ділянки, що свідчить про роботу бетону в пружній стадії. З ростом навантаження в бетоні розвиваються пластичні деформації, що характеризується на графіках криволінійною залежністю. Таким чином, базальтова фібра забезпечує зростання внутрішніх напружень при сталих відносних деформаціях самоущільнювальних бетонів з високим вмістом золи винесення.



а



б



в

Рис. 4.17. Графіки залежності між напруженнями і деформаціями в самоущільнювальних бетонах з вмістом золи виносення: а – 55 мас%; б – 70 мас.%, в – 85 мас.%.

Згідно з даними [120], коефіцієнт Пуассона для важкого бетону знаходиться в межах $\mu=0,015-0,200$. Результати випробувань деформативних властивостей бетонів під навантаженням наведені в табл. 4.8.

Таблиця 4.8

Показники деформативності самоущільнювальних бетонів

(після 90 діб тверднення зразків у нормальних умовах)

Вміст золи винесення, мас. %	Вміст фібри, %	Призмova міцність, $f_{ck, prism}$, МПа	Кубикова міцність, $f_{cm, cube}$, МПа	Модуль пружності, E_{cm} , ГПа	Коефіцієнт Пуассона, ν
55	-	42,9	51,1	35,7	0,20
70	-	30,8	33,4	32,5	0,21
85	-	20,0	23,8	22,8	0,22
55	0,5	43,5	53,8	38,6	0,19
70	0,5	31,5	34,5	35,7	0,14
85	0,5	21,0	28,3	23,0	0,14

Дослідження деформативних властивостей самоущільнювальних бетонів свідчать, що їх призмova міцність із збільшенням вмісту золи винесення в складі в'язучої композиції від 55 до 85 мас.% зменшується від 42,9 до 20,0 МПа, тоді як дисперсноармованих від 43,5 до 21,0 МПа. Із зменшенням вмісту золи винесення модуль пружності самоущільнювального бетону зростає від 22,8 до 35,7 ГПа, а коефіцієнт Пуассона знижується від 0,22 до 0,20.

4.3.7. Стійкість до стирання

Відомо [42], що міцність бетону при стиску є найважливішим чинником для його стійкості до стирання. Певне значення має також гранулометричний склад заповнювача, так як при більшому вмісті піску в

суміші спостегірається і більше стирання. Стійкість до стирання може бути підвищена застосуванням досить «пісних» сумішей. Бетон з невеликим водовідділенням має більш міцний поверхневий шар і тому меншу стиранисть. Для підвищення стійкості до стирання важливим є вологе твердіння.

Перспектива використання розроблених самоущільнювальних бетонів з високим вмістом золи виносення для влаштування промислових підлог, при якому не потрібно застосовувати додаткові засоби ущільнення, вимагає дослідження стійкості до стирання розроблених бетонів.

Визначення стійкості до стирання виконували згідно ДСТУ Б В.2.7-212:2009 “Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення стиранисті” на зразках з розмірами 70x70x70 мм самоущільнювального бетону з різним вмістом золи виносення в складі в’язучої композиції та базальною фіброю (рис. 4.18).



Рис. 4.18. Випробування

Стираність самоущільнювального бетону з базальною фіброю зменшується на 14,3 % при вмісті 85 мас. % золи виносення у складі в’язучого в порівнянні із бетоном без фібри (табл. 4.9).

стійкості до стирання

При цьому заміна 70 мас. % цементу золою виносення дозволяє зменшити стиранисть при введенні 1% базальної фібри на 25,7 %. Для бетонів з вмістом 55 мас. % золи виносення стиранисть складає $0,35 \text{ г/см}^2$, введення 0,5 % базальної фібри забезпечує зменшення стиранисті до $0,31 \text{ г/см}^2$ ($\Delta=11,4 \%$); при введенні 1 % базальної фібри стиранисть зменшується до $0,23 \text{ г/см}^2$ ($\Delta=34,3 \%$).

Таблиця 4.9

Результати випробувань бетонних зразків на стиранність

№ п/п	Витрата золи, мас. %	Витрата фібри, %	Розміри поверхні зразка, що стирається, см	Площа поверхні зразка, що стирається, см ²	Маса зразка, г		Стиранність зразка, г/см ²	Стиранність серії зразків, г/см ²
					до стирання	після стирання		
1	55	0	7,08x7,12	50,41	829,0	810,2	0,37	0,35
			7,08x7,09	50,20	844,7	827,4	0,34	
			7,03x7,07	49,70	835,8	818,7	0,34	
2		0,5	7,02x7,03	49,35	801,3	787,6	0,28	0,28
			7,12x7,10	50,55	818,2	802,1	0,32	
			7,05x7,08	49,91	820,8	807,8	0,26	
3		1	7,05x7,05	49,7	812,9	801,4	0,23	0,23
			7,09x7,07	50,13	813,7	802,2	0,23	
			7,03x7,05	49,84	815,4	803,6	0,24	
4	70	0	7,04x7,05	49,63	828,3	810,6	0,36	0,35
			7,04x7,05	49,63	825,6	808,9	0,34	
			7,06x7,07	49,91	822,2	804,7	0,35	
5		0,5	7,03x7,07	49,70	814,3	790,1	0,30	0,30
			7,12x7,10	50,55	806,7	799,6	0,33	
			7,06x7,06	49,84	819,8	805,9	0,28	
6		1	7,09x7,09	50,27	799,0	785,6	0,26	0,26
			7,07x7,07	49,98	807,2	794,3	0,26	
			7,02x7,03	49,35	812,8	799,3	0,27	
7	85	0	7,02x7,03	49,35	801,1	784,9	0,33	0,36
			7,02x7,03	49,35	788,6	770,9	0,36	
			7,06x7,06	49,84	809,8	792,0	0,36	
8		0,5	7,12x7,10	50,55	784,2	767,2	0,33	0,31
			7,02x7,02	49,28	822,7	809,3	0,28	
			7,07x7,07	49,98	819,5	803,5	0,32	
9		1	7,02x7,02	49,28	800,1	785,4	0,30	0,30
			7,02x7,02	49,28	800,3	785,6	0,30	
			7,06x7,06	49,84	805,8	790,8	0,30	

Результати порівняльних досліджень будівельно-технічних властивостей самоущільнювальних дисперсноармованих бетонів з різним вмістом золи виносення наведені в табл. 4.10.

Таблиця 4.10

Будівельно-технічні властивості самоущільнювальних бетонів з високим вмістом золи виносення (вміст базальтової фібри 0,5 %)

Найменування показника	Одиниці вимірювання	Значення показника для бетонів з вмістом золи виносення, мас. %		
		55	70	85
Діаметр розпливання конуса бетонної суміші	мм	730	700	750
Марка за консистенцією бетонної суміші / клас розпливу самоущільнювального бетону		F6/SF3	F6/SF3	F6/SF3
Об'єм втягнутого повітря в бетонній суміші, V_n	%	0,35	0,35	0,4
Середня густина бетону, ρ	кг/м ³	2350	2320	2310
Пористість, П	%	9,2	11,0	11,5
Міцність на стиск, f_{cm28}	МПа	41,8	29,5	25,4
Міцність на розтяг при згині, f_{ctd}	МПа	9,9	6,3	6,6
Модуль пружності, E_{cm}	ГПа	38,6	35,7	23,0
Призмova міцність, $f_{ck, prism}$	МПа	43,5	31,5	21,0
Коефіцієнт Пуассона, ν		0,19	0,14	0,14
Усадка бетону, ϵ_v	мм/м	0,25	0,32	0,28
Водопоглинання за масою, W_m	%	3,71	4,31	3,16
Марка за водонепроникністю		W 8	W 8	W 6
Корозійна стійкість, KC_6		1,23	1,15	0,99
Висолоутворення	-	немає	немає	немає
Стираність, г/см ²		0,28	0,30	0,31
Коефіцієнт конструктивної якості (ККЯ)	МПа	17,79	12,72	11,0

При розробці нових рецептур бетонних сумішей крім класичних вимог все більшого значення набуває довговічність бетону та споживання енергії на його виробництво. При цьому для підтримання екологічного балансу вирішальну роль відіграє вміст портландцементного клінкеру в складі бетонної суміші [26]. Портландцемент характеризується високою енергоємністю, на яку припадає 53-78% енергоємності бетону, у яку входять затрати на його складові, а також на операції з приготування та вкладання бетону. Використання в'язучих композицій, що містять від 55 до 85 мас.%

золи винесення для приготування самоущільнювальних бетонів дозволяє знижувати затрати на приготування таких бетонів і відповідно до принципів стратегії сталого розвитку забезпечує збереження первинних матеріалів, підвищення довговічності бетонних конструкцій та зниження емісії CO₂ у навколишнє середовище (рис. 4.19).



Рис. 4.19. Екологічний ефект використання самоущільнювальних бетонів з високим вмістом золи винесення

Так, екологічний ефект зменшення викидів CO₂ при використанні для одержання самоущільнювальних бетонів в'язучої композиції, що містить 55 мас.% золи винесення, складає 278,15 кг CO₂ на 1 м³ бетону, при збільшенні вмісту золи винесення до 85 мас.% - 429,87 кг CO₂ на 1 м³ бетону.

Висновки до розділу

1. Встановлено, що дисперсне армування забезпечує зростання напруження σ при сталому значенні відносних деформацій ε . Так, при заміні 55 мас. % цементу золою винесення та введенні 0,5 % базальтової фібри при значенні відносних деформацій $\varepsilon=10...50 \times 10^{-5}$ забезпечується збільшення напружень σ на 7,3 - 10,1 % порівняно з бетонами без фібри. Для самоущільнювальних бетонів з вмістом 70 мас. % золи винесення цей показник знаходиться в межах 0,9-5,6 %.

2. Експериментальними дослідженнями показано, що введення базальтової фібри сприяє зростанню міцності на згин самоущільнювальних бетонів з високим вмістом золи виносення. Так, при вмісті у в'язучому 85% золи виносу при вмісті базальтової фібри 0% міцність на згин складає 47,7 кгс/см². При введенні в склад 0,5 і 1% фібри міцності на згин зростають відповідно на 39,6 та 60,4%. При заміні у в'язучому 70% золи виносу при введенні фібри міцності на згин зростають на 34,6 та 80,8% відповідно. Для самоущільнювальних бетонів з вмістом 55 мас. % золи виносу та введенні 0,5 % базальтової фібри міцність на згин складає 99 кгс/см², що на 23,6% вище ніж в аналогічного бетону без фібри.

3. Стираність самоущільнюючого бетону з базальтовою фіброю зменшується на 14,3 % при вмісті 85 мас. %. золи виносення у складі в'язучого в порівнянні із бетоном без фібри. При цьому заміна 70 мас. % цементу золою виносення дозволяє зменшити стираність при введенні 1% базальтової фібри на 25,7 %. Для бетонів з вмістом 55 мас. % золи виносення стираність складає 0,35 г/см², введення 0,5 % базальтової фібри забезпечує зменшення стираності до 0,31 г/см² ($\Delta=11,4$ %); при введенні 1 % базальтової фібри стираність зменшується до 0,23 г/см² ($\Delta=34,3$ %).

4. Міцність на розтяг при згині бетону з вмістом 1% базальтової фібри підвищується до 30,8 % для бетонів з вмістом 55 мас. % золи виносення в порівнянні із бетоном без фібри та до 19% з вмістом 0,5% базальтової фібри. Клас бетону за міцністю на розтяг при згині для контрольних зразків бетону B_{t_b} 6,0; для зразків бетону, армованих базальтовою фіброю у кількості 0,5% - B_{t_b} 7,2; для зразків бетону, армованих базальтовою фіброю у кількості 1% - B_{t_b} 8,0. При заміні у в'язучому 70% золи виносу при введенні фібри міцності на згин зростають на 34,6 та 80,8% відповідно, що відповідає класу бетону за міцністю на розтяг при згині B_{t_b} 3,2, 4,8 та 6,4. При вмісті у в'язучому 85% золи виносу при вмісті базальтової фібри 0% міцність на згин складає 47,7 кгс/см². При введенні в склад 0,5 і 1% фібри міцності на згин зростають відповідно на 39,6 та 60,4%.

РОЗДІЛ 5

ПРОМИСЛОВЕ ВПРОВАДЖЕННЯ САМОУЩІЛЬНЮВАЛЬНИХ БЕТОНІВ, АРМОВАНИХ ДИСПЕРСНИМИ ВОЛОКНАМИ

5.1. Промислова апробація самоущільнювальних дисперсно-армованих бетонів при бетонуванні промислових підлог

Промислові підлоги застосовуються у приміщеннях з високою інтенсивністю транспортних та людських потоків, хімічних впливів та механічних навантажень, тому основними вимогами до них є тріщиностійкість, ударна та хімічна стійкість, короткі терміни введення покриття в експлуатацію. Широке використання отримали бетонні промислові підлоги, міцність і рівна поверхня яких визначає експлуатаційні характеристики майбутніх покриттів. У більшості випадків для потреб підприємств потрібна обробка бетонної підлоги спеціальними покриттями, які підбираються з урахуванням вимог замовника і особливостей технологічного процесу.

У період з 9 по 13 лютого 2014 р. проведено випробування самоущільнювальних бетонних сумішей з базальтовим волокном та бетонів на їх основі з проектною міцністю на стиск 70 МПа (клас бетону С50/60) для бетонування промислової підлоги на ТЗОВ “Блюм Україна” (вул. Дорожна, 50, с. Пасіки Зубрицькі, Пустомитівський район, Львівська обл.) (додаток А). Для приготування бетонних сумішей застосовували портландцемент ПЦ ІІ/А-ІІІ-500 (витрата портландцементу – 360 кг на 1 м³ бетонної суміші), кварцовий пісок Жовківського родовища ($M_{кр}=1,77$), щебенеий відсів ($M_{кр}=4,98$) та щебінь Віровського родовища фракції 5-

20 мм. Для забезпечення необхідних реологічних характеристик бетонної суміші використовували 1,3 мас.% суперпластифікатора полікарбоксилатного типу та 5 мас.% метакаооліну. Технологічна схема виготовлення самоущільнювальних дисперсно-армованих бетонів на ТЗОВ “Блюм Україна” представлена на рис. 5.1. Загальний об’єм виготовленого бетону склав 200 м³.

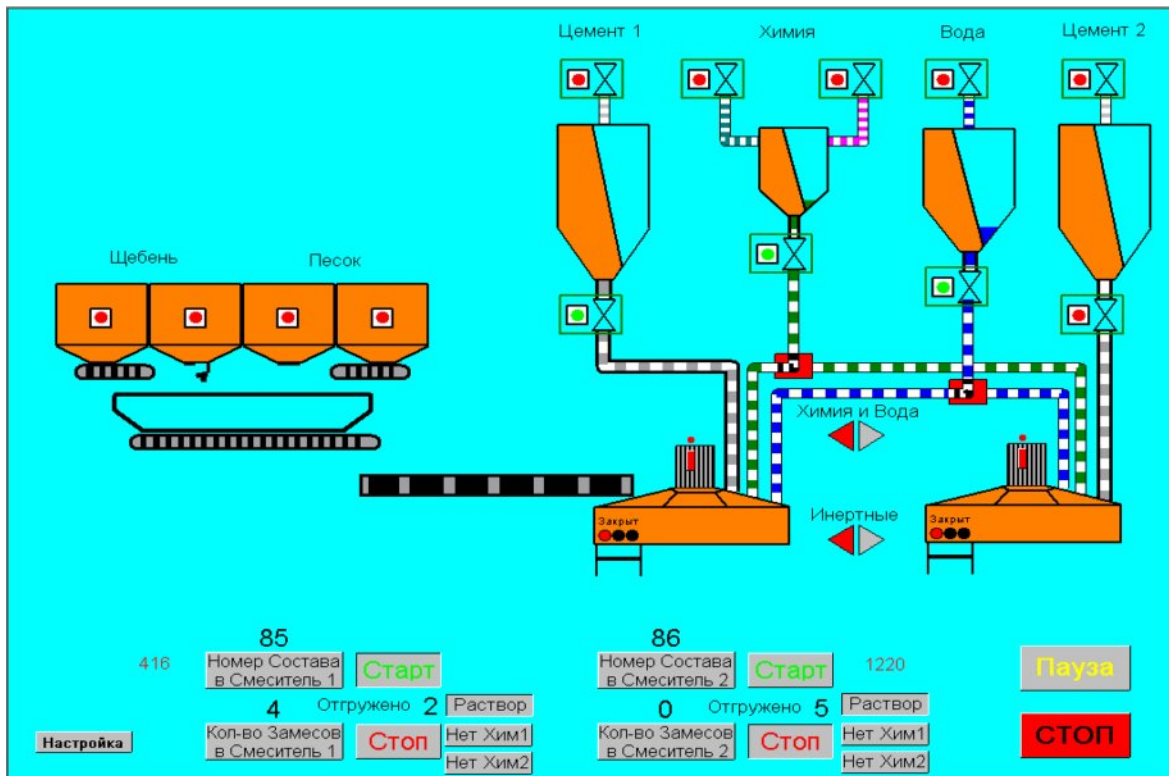


Рис. 5.1. Технологічна схема виготовлення фіброармованого самоущільнювального бетону для бетонування промислової підлоги на ТЗОВ “Блюм Україна”

Влаштування промислової підлоги на основі дисперсно-армованих самоущільнювальних бетонів проводили в умовах знакозмінних та від’ємних температур в діапазоні (-20...+9 °С). Із кожної партії самоущільнювальної бетонної суміші відбирали проби, перевіряли її рухливість і виготовляли зразки-куби бетону розміром 10×10×10 см. Зразки бетону тверднули в при знакозмінних температурах та для порівняння в нормальних умовах. Основним технологічним завданням було забезпечення однорідності та

відсутності розшаровуваності бетонної суміші в умовах підвищеної рухливості, одержання запроектованої марочної міцності. У результаті випробувань зразків самоущільнювального дисперсно-армованого бетону (РК=680-700 мм) на ТзОВ “Блюм Україна” встановлено, що їх середня міцність при стиску в умовах понижених додатних та від’ємних температур через 2 доби складає 31,6 МПа, а через 28 діб тверднення – 70,4 МПа (табл. 5.1). В той же час, в нормальних умовах міцність у віці 28 діб становить 98,0 МПа (клас бетону за міцністю на стиск В30 згідно з ДСТУ Б В.2.7-43-96).

Таблиця 5.1

Результати випробувань самоущільнюваного дисперсно-армованого бетону при твердненні в різних температурних умовах

Найменування показника		Значення показника	
Діаметр розпливу конуса, мм		680-700	
Середня густина, кг/м ³		2400-2420	
Міцність бетону на стиск, МПа, у віці, діб	нормальні умови	2	37,8
		7	76,6
		28	98,0
	при температурі +8...-20°C	2	31,6
		7	50,4
		28	70,4

Застосування комплексних модифікаторів та дисперсного армування забезпечує одержання однорідних самоущільнювальних бетонних сумішей та бетонів заданого класу (клас бетону С50/60), які тверднуть при понижених додатніх, знакозмінних та від’ємних температурах, що дозволило забезпечити високу якість бетонних робіт в складних температурних умовах, а також створило можливість уникнення проведення додаткової технологічної операції з влаштування зміцнюючого верхнього шару промислового бетонного покриття на ТзОВ “Блюм Україна” (рис. 5.2).



а



б

Рис. 5.2. Завантаження самоущільнювальної бетонної суміші (а) та влаштування промислової підлоги з використанням самоущільнювального дисперсно-армованого бетону (б)

У період з 3 по 31 липня 2014 р. проведено випробування високонаповнених самоущільнювальних бетонних сумішей, армованих базальтовими волокнами, та бетонів на їх основі з проектною міцністю на стиск 30-35 МПа (клас бетону С25/30) для бетонування промислової підлоги на ТзОВ “Спільне українсько-польське підприємство РАВТРАНС” (вул. Коновальця, 27 м. Рава-Руська). При цьому було вирішено технологічні завдання забезпечення однорідності та відсутності розшарованості бетонної суміші в умовах підвищеної рухливості, одержання запроєктованої міцності та стійкості до стирання (додаток Б). Загальний об’єм виготовленого бетону склав 150 м³. Технологія виробництва самоущільнювальних бетонних сумішей не відрізнялась від стандартної прийнятої на ТзОВ «Баурбуд».

Для одержання фіброармованого самоущільнюваного бетону (номінальний склад В:П:Щ=1:1,2:2,2) для влаштування промислової підлоги застосовували портландцемент ПЦ II/A-III-500 (витрата портландцементу – 155 кг на 1 м³ бетонної суміші), зола-винесення Бурштинської ТЕС (витрата золи-винесення – 360 кг на 1 м³ бетонної суміші), кварцовий пісок Жовківського родовища ($M_{кр}=1,77$), щебневий відсів ($M_{кр}=4,98$) та щебінь

Віровського родовища фракції 5-20 мм. З метою забезпечення отримання однорідних самоущільнюваних фіброармованих бетонних сумішей до їх складу вводили суперпластифікатор полікарбосилатного типу (BASF Glenium ACE 430) в кількості 1,3 мас.% та 0,25 мас.% водоутримувальної добавки (BASF RheoMATRIX 100). Результати випробувань самоущільнювального дисперсно-армованого бетону наведені в табл. 5.2.

Таблиця 5.2

**Результати випробувань самоущільнювального
дисперсно-армованого бетону**

Найменування показника	Значення показника	
В/ В'яз	0,32	
Діаметр розпливу конуса, мм	680-750	
Умовна в'язкість, с	4-6	
Повітрязахоплення, %	0,35-0,5	
Середня густина, кг/м ³	2400-2450	
Міцність бетону на стиск, МПа, у віці, діб	2	9,7-10,4
	7	18,0-18,6
	28	32,5-35,0
Водопоглинання, % за масою	1,9-2,4	
Коефіцієнт Пуассона	0,17	
Стираність, г/см ²	0,4	

Використання багаторівневого дисперсного армування з застосуванням дисперсних базальтових волокон дозволило зменшити витрату високоенергоємного портландцементу та одержати високонаповнені самоущільнювальні бетонні суміші з необхідними технологічними показниками та будівельно-технічними властивостями бетонів на їх основі для бетонування промислових підлог.

5.2. Техніко-економічні показники самоущільнювальних дисперсно-армованих бетонів

Розрахунок економічної ефективності промислового впровадження самоущільнювальних дисперсно-армованих бетонів проводили з допомогою програмного комплексу АВК-5, застосовуючи типову методику визначення економічної ефективності капітальних вкладень. Запропонована технологія бетонування промислової підлоги на ТЗОВ “Блюм Україна” базується на використанні самоущільнювальних дисперсно-армованих бетонів на основі самоармованих цементуючих систем, що забезпечує високу рухливість, однорідність та ранню міцність бетонів на їх основі.

Застосування самоармованої цементуючої системи забезпечує одержання самоущільнювальних дисперсно-армованих бетонів із зменшеними витратами на вкладання, при цьому суттєво підвищується продуктивність праці та скорочуються терміни будівництва. Область застосування даної технології поширюється на монолітне та монолітно-каркасного будівництво.

В якості базового варіанту прийнята технологія вкладання бетонної суміші на основі портландцементу ПЦ II/A-III-500 ПАТ „ Волинь-цемент”, метакаоліну, золи-винесення та з використанням суперпластифікатора полікарбоксилатного типу при подачі суміші бетононасосом. Новий варіант передбачає використання самоармованої цементуючої системи для виготовлення самоущільнювальної бетонної суміші, що забезпечує збільшення діаметру розпливання конуса до 680-700 мм при міцності бетону на рівні базового варіанту ($f_{cm2}=37,8$ МПа; $f_{cm28}=98,0$ МПа) і дозволяє знизити витрати на вкладання суміші та зменшує трудомісткість бетонних робіт. Ефективність від впровадження розроблених самоущільнювальних дисперсно-армованих бетонів на ТЗОВ “Блюм Україна” для промислової підлоги в с. Пасіки Зубрецьки, Пустомитівський район, Львівська обл.

складає 365,68 грн. на 1 м³ бетону, що при об'ємі виготовлення 200 м³ забезпечує економічний ефект 73,135 тис. грн. порівняно з бетоном базового варіанту.

Висновки до розділу

1. Здійснено апробацію високоміцних самоущільнювальних бетонів, армованих дисперсною базальтовою фіброю, для промислової підлоги на ТзОВ „Блюм Україна” (с. Пасіки Зубрицькі Львівська обл.) з вирішенням завдання одержання необхідних технологічних властивостей бетонної суміші та міцнісних характеристик бетону в умовах знакозмінних та від'ємних температур.

2. Розроблені оптимальні склади високонаповнених самоущільнювальних бетонів, армованих дисперсними базальтовими волокнами, використано для бетонування промислової підлоги на ТзОВ “Спільне українсько-польське підприємство РАВТРАНС” по вул. Коновальця, 27 (м. Рава-Руська). При цьому вирішено технологічні завдання забезпечення рухливості та однорідності суміші при безвібраційній технології бетонування, а також необхідної міцності та стиранності самоущільнювального бетону.

3. На ТзОВ “Спільне українсько-польське підприємство РАВТРАНС” проведена промислова апробація самоущільнювальних бетонів, армованих базальтовою фіброю. Ефективність від впровадження розроблених самоущільнювальних дисперсно-армованих бетонів для промислової підлоги на ТзОВ “Блюм Україна” (с. Пасіки Зубрицькі Львівської обл.) складає 365,68 грн. на 1 м³ бетону, що при об'ємі виготовлення 200 м³ забезпечує економічний ефект 73,135 тис. грн.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Експериментальними дослідженнями встановлена можливість отримання самоущільнювального дисперсно-армованого бетону шляхом багаторівневого модифікування його структури: на мікрорівні (рівень цементної матриці) і макрорівні (рівень цементного бетону). Показано доцільність використання в якості модифікуючих добавок на макрорівні армувальних модифікованих базальтових волокон, а на мікрорівні - комплексних добавок на основі полікарбоксилатного суперпластифікатора, реакційно-активних тонкодисперсних мінеральних добавок з одержанням самоармованих цементуючих систем.

2. Встановлено вплив параметрів дискретних базальтових волокон на фізико-механічні властивості суперпластифікованих цементуючих систем. Виявлено, що при введенні базальтової фібри знижується рухливість та підвищується в'язкість модифікованої суміші, що пов'язано з вихідним структуруванням суміші фіброю, підвищенням внутрішнього тертя та обмеженням зсувом компонентів матриці в присутності волокон. Найефективніше на фізико-механічні властивості високорухливих цементних систем здійснює вплив базальтовий армувальний компонент довжиною 24 мм, що дозволяє знизити деформативні властивості на 15-25% та підвищити показники міцності на 10-30%.

3. Розроблена самоармована цементуюча система „портландцемент – КСАД – суперпластифікатор полікарбоксилатного типу – базальтове волокно” характеризується розпливом стандартного конуса РК³ 180 мм (пластифікуючий ефект $\Delta PK=78,6\%$), що дозволяє віднести її до суперпластифікованих (технологічний ефект), з високою ранньою ($R_{ст2}/R_{ст28}=0,69$) і стандартною ($R_{ст28}=75$ МПа) міцністю (ДСТУ EN 196-1:2007). За рахунок суттєвого водоредукуючого ефекту ($\Delta B/C=20,1\%$) рання та стандартна міцність цементуючої системи зростають відповідно до 45,6 та 95,4 МПа (технічний ефект), що задовольняє вимоги щодо високоміцних в'язучих.

4. Показано, що коефіцієнт тріщиностійкості самоармованої цементуючої системи в ранній період тверднення зростає до 0,225 порівняно з портландцементною системою без добавок (0,205) внаслідок утворення додаткової кількості гідратних фаз в неклінкерній частині цементуючої системи та ефекту самоармування кристалогідратами, які характеризуються голчастим габітусом. Дисперсне модифікування самоармованої цементуючої системи базальтовою фіброю забезпечує вирівнювання пружних властивостей компонентів структури із зростанням коефіцієнта тріщиностійкості високоміцного дрібнозернистого бетону через 28 діб до 0,171 порівняно з 0,163 для бетону на основі ПЦ II/A-III-500.

5. Комплексом методів фізико-хімічного аналізу встановлено особливості процесів структуроутворення, формування мікроструктури та міцності каменю на основі самоармованих цементуючих систем. В структурі цементної матриці переважають волокнисті низькоосновні гідросилікати та гідросульфоалюмінати кальцію, що забезпечує самоармування системи на мікрорівні, компенсацію усадки та приріст міцності цементуючої системи.

6. Показано, що показник роботи, затраченої на руйнування пластифікованої матриці на основі ПЦ II/A-III-500 ($V/C=0,28$), через 7 діб становить 0,97 кДж/м², а через 28 діб – 1,13 кДж/м². Використання самоармованої цементуючої системи з базальтовою фіброю забезпечило зростання ударної міцності дрібнозернистого бетону на її основі порівняно з пластифікованою системою на основі ПЦ II/A-III-500 в 1,2 та 1,4 рази через 7 та 28 діб відповідно. Суттєве поглинання енергії удару при використанні базальтової фібри забезпечується за рахунок підвищення зчеплення базальтової фібри з цементною матрицею, що реалізується шляхом утворення міцного та щільного шару новоутворень в контактній зоні цементна матриця-базальтова фібра.

7. Дослідженнями реологічних властивостей дисперсно-армованих самоущільнювальних бетонів з використанням спеціальних технологічних випробувань одержані наступні характеристики суміші, що задовольняють

вимоги до самоущільнювальних: клас розпливу SF3, клас в'язкості VS2, клас здатності до проникнення PJ1, клас стійкості до сегрегації SR1. Високоміцні (клас B80) самоущільнювальні бетони характеризуються швидким ($f_{cm2}/f_{cm28}=0,55$) наростанням міцності в нормальних умовах тверднення, масовим водопоглинанням 1,9%, підвищеною водонепроникністю (W20), морозостійкістю (F400), корозійною стійкістю (KC6=1,1). Модуль пружності самоущільнювального бетону зростає від 51,6 до 63,9 ГПа, коефіцієнт Пуассона знижується від 0,19 до 0,17, а деформації усадки через 28 діб в повітряно-сухих умовах зменшуються у 2,7 рази порівняно із неармованим самоущільнювальним бетоном.

8. Встановлено, що дисперсне армування забезпечує зростання напруження σ при сталому значенні відносних деформацій дисперсно - армованих самоущільнювальних бетонів з підвищеним вмістом золи-винесення. Так, при заміні 55 мас.% цементу золою-винесення та введенні 0,5 мас.% базальтової фібри при значенні відносних деформацій $\epsilon=(10...50) \cdot 10^{-5}$ забезпечується збільшення напружень σ на 7,3 -10,1% порівняно з бетонами без фібри. Для самоущільнювальних бетонів з вмістом 70 мас.% золи-винесення цей показник знаходиться в межах 0,9-5,6%. Показано, що введення базальтової фібри до самоущільнювальних бетонів з високим вмістом золи-винесення сприяє зростанню їх міцності на згин на 39,6-60,4% та зниженню стираності на 11,4-34,3%.

9. На ТзОВ “Спільне українсько-польське підприємство РАВТРАНС” проведена промислова апробація самоущільнювальних бетонів, армованих базальтовою фіброю. Ефективність від впровадження розроблених самоущільнювальних дисперсно-армованих бетонів для промислової підлоги на ТзОВ “Блюм Україна” (с. Пасіки Зубрицькі Львівської обл.) складає 365,68 грн. на 1 м³ бетону, що при об'ємі виготовлення 200 м³ забезпечує економічний ефект 73,135 тис. грн.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Баженов Ю. М. Модифицированные высокопрочные бетоны / Ю. М. Баженов, О. О. Демьянова, В. И. Калашников. – М. : Издательство Ассоциация строительных вузов, 2006. – 368 с.
2. Батраков В. Г. Модификаторы бетона – новые возможности // Первая всероссийская конференция по проблемам бетона и железобетона «Бетон на рубеже третьего тысячелетия», Кн. 1. – 2001. – С. 184-208.
3. Батраков В. Г. Модифицированные бетоны / В. Г. Батраков. – М. : Стройиздат, 1998. – 768 с.
4. Беленцов Ю. А. Повышение надежности конструкций управлением параметрами композиционного материала / Ю. А. Беленцов, В. С. Лесовик, Г. Г. Ильинская // Строительные материалы, 2011. – № 3. – С. 90-93.
5. Бліхарський З. Я. Реконструкція та підсилення будівель і споруд / З. Я. Бліхарський. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2008. – 108 с.
6. Болотских О. Н. Европейские методы физико-механических испытаний бетона / О. Н. Болотских. – Харьков : Торнадо, 2010. – 144 с.
7. Боровских И. В. Высокопрочный тонкозернистый базальтофибробетон: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.23.05 / И. В. Боровских. – Казань, 2009. – 20 с.
8. Будівельне матеріалознавство : Підручник / [Кривенко П. В., Пушкарьова К. К., Барановський В. Б. та ін.] - К. : Видавництво Ліра-К, 2012. – 624 с.
9. Васильев В. В. Композиционные материалы / В. В. Васильев. – М.: Машиностроение, 1990. – 510 с.
10. Високоміцні самоущільнювальні бетони на основі дисперсно-армованих цементуючих систем / М. А. Саницький, У. Д. Марущак,

І. І. Кіракевич, М. С. Стечишин // Будівельні матеріали і виробы, 2015. – № 1. – С. 6-9.

11. Високофункціональні бетони на основі модифікаторів нової генерації / М. А. Саницький, О. Р. Позняк, І. І. Кіракевич, Б. Г. Русин // Вісн. Нац. ун-ту "Львів. політехніка". – 2008. – № 627. – С. 191-196.

12. Волков И. В. Фибробетон. Особенности и перспективы применения в строительных конструкциях / И. В. Волков, Э. М. Газин // Стройпрофиль, 2003. – № 2. – С. 67-69.

13. Выровой В. Н. Композиционные строительные материалы и конструкции. Структура, самоорганизация, свойства / В. Н. Выровой, В. С. Дорофеев, С. Г. Суханов. – Одесса: „ГЕС”, 2010. – 169 с.

14. В'язучі речовини / [Рунова Р. Ф., Дворкін Л. Й., Дворкін О. Л., Носовський Ю. Л.]. – К. : Основа, 2012. – 448 с.

15. Гамеляк І. П. Математична модель втомної міцності неметалевої стержневої арматури / І. П. Гамеляк, Т. І. Коваль // Збірник наукових праць. Серія: галузеве машинобудування, будівництво. Вип. 1(43). – 2015. – ПолтНТУ. – С. 162-168.

16. Гамеляк І. П. Експериментальне визначення модуля пружності шарів покриттів із бетонних елементів брукування / І. П. Гамеляк, Л. М. Карафізі // Вісник Національного транспортного університету. - 2014. - № 29(1). - С. 46-55.

17. Голанцев В. А. Свойства и особенности технологии полиармированных фибробетонов : автореф. дис. канд. техн. наук: 05.23.05 / В. А. Голанцев. – Л., 1990. – 20 с.

18. Горшков В. С. Методы физико-химического анализа вяжущих веществ / В. С. Горшков, В. В. Тимашев, В. Г. Савельев. – М. : Высш. шк., 1981. – 335 с.

19. Гоц В. І. Бетони і будівельні розчини / В. І. Гоц. – К. : ТОВ УВПК, 2003. – 472 с.

20. Дворкин Л. И. Прочностные и деформативные свойства литых высокопрочных бетонов с добавкой метаксаолина / Л. И. Дворкин, Н. В. Лушникова // Минеральные и химические добавки в бетон / Под ред. А. В. Ушерова-Маршака. – Харьков : Колорит, 2005. – С. 78-83.
21. Дворкин Л. И. Цементно-золевые бетоны с добавками полифункциональных модификаторов (ПФМ) для покрытия полов промышленных и гражданских зданий / Л. И. Дворкин, Р. Н. Макаренко, В. П. Кизима. – Ровно : УГУВХП, 2002. – 123 с.
22. Дворкін Л. Й. Розв'язання будівельно-технологічних задач методами математичного планування експерименту / Л. Й. Дворкін, О. Л. Дворкін, В. В. Житковський. – Рівне : НУВГП, 2011. – 174 с.
23. Демьянова В. С. Сравнительная оценка влияния отечественных и зарубежных суперпластификаторов на свойства цементных композиций / В. С. Демьянова, В. И. Калашников, И. Е. Ильина // Строительные материалы. – 2002. – № 9. – С. 4 – 6.
24. Демьянова В. С. К вопросу оценки трещиностойкости высокопрочного фибробетона с полиамидными волокнами / В. С. Демьянова, Р. И. Макридин, Е. Ю. Михеенко, А. С. Мишин // Изв. вузов. Строительство. – 2004. – № 3. – С. 27-31.
25. Довженко О. О. Застосування фібробетону в Україні. Властивості дисперсноармованих бетонів / О. О. Довженко, І. А. Юрко, В. В. Кравченко // Научно-технический сборник “Коммунальное хозяйство городов”. – № 90. – С. 267-272.
26. Дорофеев В. С. Самоуплотняющийся бетон с добавкой молотого гидратированного цемента на механоактивированном вяжущем / Дорофеев В. С., Барабаш И. В., Быстревский К. С. // Будівельні матеріали та виробы. – 2013. – №5. – С. 30-31.
27. Дорошенко О. Ю. Досвід застосування фібробетону у будівництві / О. Ю. Дорошенко, Ю. М. Дорошенко // Збірник наукових праць ДЕТУТ :

Серія «Транспортні системи і технології». – Вип. 24. – К.: ДЕТУТ, 2014. – С. 5-11.

28. Энергозберігаючі технології в будівництві : навч. посібник / М. А. Саницький, О. Р. Позняк, У. Д. Марущак. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2012. – 236 с.

29. Зайченко Н. М. Высокопрочные тонкозернистые бетоны с комплексно модифицированной микроструктурой : монография / Николай Михайлович Зайченко. – Макеевка : ДонНАСА, 2009. – 207 с.

30. Захаров С. А. Оптимизация составов бетонов высокоэффективными поликарбонатными пластификаторами / С. А. Захаров. – Строительные материалы, 2008. – №3. – С. 42-43.

31. Изотов В. С. Химические добавки для модификации бетона / В. С. Изотов, Ю. А. Соколова. – М. : «Палеотип», 2006. – 244 с.

32. Использование стальных фибр в тоннелестроении Великобритании // Транспортное строительство, 1998. – № 5. – С. 17.

33. Калашников В. И. Расчет составов высокопрочных самоуплотняющихся бетонов / В. И. Калашников. – Строительные материалы, 2008. – № 10. – С. 2-6.

34. Калашников В. И. Самоуплотняющийся высокопрочный бетон / В. И. Калашников // Дни современного бетона: IX Междунар. науч.-практ. конф. – Запорожье : ООО „Будиндустрия ЛТД”, 2008. – С. 30-40.

35. Каприелов С. С. Бетоны нового поколения с высокими эксплуатационными свойствами / С. С. Каприелов, А. В. Шейнфельд. – Материалы Международной конференции. Долговечность и защита конструкций от коррозии. – М., 1999. – С. 191-196.

36. Кіракевич І. І. Суперпластифіковані цементуючі системи для самоущільнювальних бетонів з швидким наростанням міцності : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук за спец. 05.23.05 / І. І. Кіракевич. – Львів. – 21 с.

37. Ковалева А. Ю. Формирование макроструктуры сталефибробетонов (на примере токарной фибры) : автореф. дис. канд. техн. наук: 05.23.05 / А. Ю. Ковалева – СПбГАСУ, Санкт-Петербург, 2001. – 22 с.
38. Комплексні модифікатори пластифікуюче-прискорюючої дії в технології бетонів / М. А. Саницький, О. Р. Позняк, У. Д. Марущак, І. І. Кіракевич // Будівельні конструкції: міжвідомчий наук.-техн. зб. – К. : НДІБК, 2009. – Вип. 72. – С. 52-59.
39. Конструкційні матеріали нового покоління та технології їх впровадження в будівництво / [Р. Ф. Рунова, В. І. Гоц, М. А. Саницький та ін.] – К.: УВПК „ЕксОб”, 2008. – 360 с.
40. Коротышевский О. В. Полы из сталефибробетона и пенобетона / О. В. Коротышевский // Строительные материалы, 2000. – №3. – С. 16-17.
41. Коротких Д. Н. Дисперсное армирование структуры бетона при многоуровневом трещинообразовании / Д. Н. Коротких // Строительные материалы. – 2011. – № 3. – С. 96-99.
42. Кривенко П. В. Современные проблемы долговечности бетона: состояние и перспективы / П. В. Кривенко // Будівельні конструкції: міжвідомчий наук.-техн. зб. – К. : НДІБК, 2002. – Вип. 56. – С. 15-27.
43. Лезов В. Ю. Технология и свойства мелкозернистых бетонов, армированных синтетическими волокнами : автореф. дис. канд. техн. наук: 05.23.05 / В. Ю. Лезов. – ЛИСИ. – Л., 1991. – 20 с.
44. Лобанов И. А. Дисперсно-армированные бетоны, область их применения, пути качественного улучшения свойств / И. А. Лобанов // Производство строительных изделий и конструкций. – 1976. – №1. – С. 5-22.
45. Лобанов И. А. Основы технологии дисперсно-армированных бетонов (фибробетонов) : автореф. дис. д-ра техн.наук / И. А. Лобанов. – ЛИСИ, Л., 1982. – 34 с.
46. Лушнікова Н. В. Литі високоміцні бетони з добавкою поліфункціонального модифікатору на основі суперпластифікатору та метакаоліну : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец.

05.23.05 „Будівельні матеріали та вироби” / Н. В. Лушнікова. – Одеса, 2006. – 18 с.

47. Максимов А. Н. Фибробетон, армированный волокнами минеральной ваты // А. Н. Максимов. – Фибробетон и его применение в строительстве. – М., 1979. – С. 46-51.

48. Материалы, армированные волокнами. Пер. с англ. Л. И. Сычевой, А. В. Воловика / М. : Стройиздат, 1982. - 180 с.

49. Метакаолін в будівельних розчинах і бетонах / [Дворкін Л. Й., Лушнікова Н. В., Рунова Р. Ф., Троян В. В.]. – К. : Вид-во КНУБіА, 2007. – 216 с.

50. Несветаев Г. В. Технология самоуплотняющихся бетонов / Г. В. Несветаев // Строительные материалы. – 2008. – №3. – С. 24-28.

51. Несветаев Г.В. Влияние некоторых гиперпластификаторов на пористость, влажностные деформации и морозостойкость цементного камня / Г. В. Несветаев, А. Н. Давидюк. – Строительные материалы, 2010. – С. 44-46.

52. Несветаев Г. В. Самоуплотняющиеся бетоны (SCC): усадка / Г. В. Несветаев, А. Н. Давидюк. – Строительные материалы, 2009, №8. – С. 52-54.

53. Несветаев Г. В. Самоуплотняющиеся бетоны: модуль упругости и мера ползучести / Г. В. Несветаев, А. Н. Давидюк. – Строительные материалы. – 2009. – №6. – С. 68-71.

54. Парфенов А. В. Ударная выносливость бетонов на основе стальной и синтетической фибры : автореф. дис. канд. техн. наук: 05.23.05 / А. В. Парфенов. – Уфа, 2004. – 19 с.

55. Пащенко А. А. Армирование цементного камня минеральными волокнами / А. А. Пащенко, В. П. Сербин. – К., 1970. – 45 с.

56. Повышение прочности вяжущих путем армирования шлаковыми волокнами / [Кравченко И. А., Горобинская В. Д., Губарени Н. И., Гитер Э. З.] // Фибробетон: свойства, технология, конструкции. Тезисы докл. науч.-техн. совещания / Рига : ЛатНИИСтроительства. – 1988. – С. 143-145.

57. Позняк О. Р. Самоущільнювальний бетон, армований базальтовою фіброю / О. Р. Позняк, М. С. Стечишин // Матеріали науково-практичної конференції “Визначення вартості об’єктів будівництва, проектних, будівельно-монтажних та ремонтно-будівельних робіт із застосуванням сучасних технологій і матеріалів”. – Івано-Франківськ, 2014. – С. 47.

58. Позняк О. Р. Физико-химические особенности процессов гидратации модифицированных цементирующих систем / О. Р. Позняк, У. Д. Марущак, И. И. Киракевич. – Сб. докл. 3-го (XI) Междунар. совещания по химии и технологии цемента. – М. : Экспоцентр, 2009. – С. 174–178.

59. Прочность на излом бетона, армированного волокнами. – Реф. ин-форм. / ЦИНИС. Строит, и архитект. Серия 7. Строительные материалы и изделия, 1980. – Вып. 10. – С. 4-6.

60. Промышленный опыт изготовления фибробетонных конструкций / [Лобанов И. А., Пухаренко Ю. В., Лезов В. Ю., Горшков А. П.] // Совершенствование технологии вяжущих, бетонов и железобетонных конструкций / Пермь, 1989. – С. 86-93.

61. Пути создания самоуплотняющихся бетонов / С.В. Коваль, Д.М. Поляков, М. Ситарски, М. Циак // Будівельні конструкції. – К. : НДІБК, 2009. – Вип. № 72. – С. 232-238.

62. Пухаренко Ю. В. Оптимизация параметров армирования мелкозернистого бетона синтетическими волокнами / Ю. В. Пухаренко, В. Ю. Лезов - Интенсификация технологических процессов в производстве сборного железобетона: Межвуз. темат. сб. тр. / Л. : ЛИСИ, 1988. – С. 24-27.

63. Пухаренко Ю. В. Научные и практические основы формирования структуры и свойств фибробетонов: автореф. дис. док. техн. наук: 05.23.05 / Юрий Владимирович Пухаренко. – Санкт Петербург, 2004. – 34 с.

64. Рабинович Ф. Н. Композиты на основе дисперсно армированных бетонов // Вопросы теории и проектирования, технологий, конструкций. – М. : АСВ, 2004. – 560 с.

65. Рамачандран В. Наука о бетоне / В. Рамачандран, Р. Фельдман, Дж. Бодуен. – М.: Стройиздат, 1986. – 278 с.
66. Рунова Р. Ф. Концепция разработки высокопрочных бетонов на основе отечественной минеральной базы / Р. Ф. Рунова, И. И. Руденко, В. В. Троян // Міжвід. наук.-техн. зб. “Будівельні конструкції”. – К. : НДІБК, 2009. Вип. 72. – С. 24–35.
67. Рунова Р. Ф. Формування мезоструктури високоміцних бетонів / Р. Ф. Рунова, В. В. Троян, В. В. Товстоніс // Науково-технічний збірник „Будівельні матеріали, виробы та санітарна техніка”. – Вип. 35. – 2010. – С. 25–29.
68. Русин Б. Г. Високофункціональні бетони на основі портландцементів, модифікованих ультрадисперсними мінеральними добавками : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук за спец. 05.23.05 / Б. Г. Русин. – Львів, 2014. – 21 с.
69. Саламаха Л. В. Сухі будівельні суміші з базальтовими волокнами для влаштування елементів підлоги. авт. к. т. н., за спец. 05.23.05 / Саламаха Л. В.; Придніпровська державна академія будівництва та архітектури. – Дніпропетровськ, 2010. – 22 с.
70. Самоущільнювальні бетони зі швидким наростанням міцності / [Кіракевич І. І., Марущак У. Д., Саницький М. А., Стечишин М. С.] // Теорія і практика будівництва : Вісник НУЛП. – Львів, 2012. – № 737. – С. 153-158.
71. Саницький М. Вплив мінеральних добавок на властивості цементуючих систем для високофункціональних бетонів / М. Саницький, О. Позняк, Б. Русин, І. Гев'юк // Вісник НУ „Львівська політехніка”. „Теорія і практика будівництва”. – Львів, 2012. – № 737. – С. 184-192.
72. Саницький М. А. Модифіковані композиційні цемента / М. А. Саницький, Х. С. Соболев, Т. Є. Марків. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2010. – 132 с.
73. Саницький М. А. Фізико-хімічні особливості гідратації модифікованих цементних систем / М. А. Саницький, О. Р. Позняк,

У. Д. Марущак – Зб. Наукових праць «Популярно о цементах и бетонах». – HEIDELBERGCEMENT, 2010. – С. 43-47.

74. Сари М. Армированные волокнами вяжущие композиционные материалы: вклад полиамидных волокон / М. Сари, Дж. Лекселент // Современные технологии сухих смесей в строительстве: сб. докл. 3-й междунар. науч.-техн. конф.; под общ. ред. Э. Л. Большакова. – Санкт Петербург : Петерб. гос. ун-т путей сообщения, 2001. – С. 48 – 61.

75. Серенко А. Ф. Дисперсно-армированные бетоны высокой морозостойкости с добавкой ПАВ : Автореф. дис. канд. техн. наук / ЛИИЖТ. Л., 1989. – 21 с.

76. Солодкий С. Й. Тріщиностійкість бетонів з малим вмістом фібри / С. Й. Солодкий, Ю. В. Турба // Вісн. Нац. ун-ту "Львів. політехніка". - 2012. - № 742. – С. 197-202.

77. Солодкий С. Й. Тріщиностійкість бетонів на модифікованих цементах : Монографія. – Львів : Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2008. – 144 с.

78. Ставров Г. Н. Влияние фибрового армирования на прочность бетона при динамических нагружениях / Г. Н. Ставров, В. П. Романов, И. Д. Захаров // Технология изготовления и свойства новых композиционных строительных материалов: Межвуз. темат. сб.тр. / Л., 1986. – С. 49-57.

79. Стечишин М. С. Оптимізація складів самоущільнюваних бетонів / М. С. Стечишин, І. І. Кіракевич // Геодезія, архітектура та будівництво (ГАС-2011): IV Міжнар. конф. молодих вчених. – Львів. – 2011. – С. 112-113.

80. Стечишин М. С. Розробка високофункціональних самоущільнюваних бетонів, армованих базальтовим волокном / М. С. Стечишин, Г. Я. Шевчук, О. П. Гнип // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – № 52. – 2013. – С. 237-242.

81. Стечишин М.С. Самоуплотняющийся фибробетон / М.С. Стечишин, О.Р. Позняк // Сборник научных трудов SWorld. – Вып. 1. – Т. 19. – Иваново : Маркова АД, 2014. – С. 80-86
82. Тимашев В. В. К вопросу о самоармировании цементного камня / В. В. Тимашев, Л. И. Сычева, Н. С. Никонова // Труды МХТИ им. Д.И. Менделеева. – М., 1976. – Вып. 92. – С. 155-156.
83. Ткаченко Г. Г. Комплексна активація мікроструктури бетонів як відкритих складних систем: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.23.05 „Будівельні матеріали та вироби” / Г. Г. Ткаченко. – Одеса, 2011. – 20 с.
84. Трещиностойкость бетонов с различной степенью неоднородности структуры / [Зайцев Ю. В., Красновский Р. О., Ковлер К. Л., Тахер А.] // Бетон и железобетон. – 1989. – № 11. – С. 10-12.
85. Троян В. В. Добавки для бетонів і будівельних розчинів / В. В.Троян / Навчальний посібник. – Ніжин : ТОВ "Видавництво "Аспект-Поліграф ", 2010. – 228 с.
86. Ударостойкость фибробетонов, армированных низкомолекулярными синтетическими волокнами / И. А. Лобанов, Ю. В. Пухаренко, Ю. А. Гурашкин // Технология и долговечность дисперсно-армированных бетонов / Л.: ЛенЗ-НИИЭП. – 1984. – С. 92-96.
87. Ушеров-Маршак А. В. Современный товарный бетон // Матеріали І Междунар. науч.-практ. конф. „Товарный бетон. Новые возможности в строительных технологиях”: Материалы конференции. – Харьков, 2008. – С. 8–15.
88. Фаликман В. Р. Поликарбоксилатные гиперпластификаторы: вчера, сегодня, завтра / В. Р. Фаликман // Популярное бетоноведение. – № 2 (28). – 2009. – С. 86-90.
89. Фаликман В. Р. Строительно-технические свойства особовысокопрочных быстротвердеющих бетонов / В. Р. Фаликман, О. О. Калашников // «Бетон и железобетон», 2004. – № 5. – С. 5-10.

90. Фізико-хімічна механіка будівельних матеріалів: навч. посібник / [Братчун В. І., Золотарьов В. О., Пактер М. К., Беспалов В. Л.]; під ред. В. І. Братчуна. – Макіївка : ДонНАБА, 2006. – 303 с.
91. Харитонов А. М. Управление свойствами конгломератных материалов на основе метода структурного моделирования / А. М. Харитонов // Строительные материалы, 2011. – № 3. – С. 93-96.
92. Хаук Х.-Г. Высокоэффективные суперпластификаторы на базе эфиров поликарбоксилатов. Потенциал применения в современных бетонных технологиях / Ханс-Гюнтер Хаук // Информационно-аналитическое обозрение «Цемент. Бетон. Сухие строительные смеси». – №1. – 2007. – С. 78-84.
93. Химические и минеральные добавки в бетон / Под ред. О. В. Ушерова-Маршака. – Харьков : Колорит, 2005. – 280 с.
94. Штарк Й. Долговечность бетона / Й. Штарк, Б. Вихт.; пер. с нем. А. Тулаганова; под ред. П. Кривенко. – К. : Оранта, 2004. – 293 с.
95. Aitcin P. C. The problems with high strength and low w/c ratio concretes / P. C. Aitcin // Cement Wapno Beton, 2014. – № 2. – P. 127-137.
96. Ashtiani M. S. Mechanical and fresh properties of high-strength self-compacting concrete containing class C fly ash / M. S. Ashtiani, A. N. Scott, R. P. Dhakal // Construction and Building Materials 47, 2013. – P. 1217–1224.
97. Bilodeau A. High-volume fly ash system: concrete solution for sustainable development / A. Bilodeau, V. M. Malhotra // ACI Mater Journal, 2000. – Vol. 97. – P. 41–48.
98. Bindiganavile V. Impact response of ultra-high-strength fiber-reinforced cement composite / V. Bindiganavile, N. Banthia, B. Aarup // ACI Materials Journal. – Vol. 99. – №6. – 2002. – P. 543-548.
99. Bond behavior and shear capacity of self compacting concrete / [V. Boel, P. Helincks, P. Desnerck, G. D. Schutter] // Proceedings of the SCC 2010. – Volume I. Design, production and placement of Self-Consolidating Concrete, 2010. – P. 343–353.

100. Bonen D. Fresh and hardened properties of self-consolidating concrete / D. Bonen, S. P. Shah // *Prog. Struct. Eng. Materials*, 2005. – № 7. – P. 14–26.
101. Brouwers H.-J.-H. Self-Compacting Concrete: Theoretical and experimental study / H.-J.-H. Brouwers, H. J. Radix / *Cement and Concrete Research*, 2005. – Vol. 35. – P. 2116-2136.
102. Cementy z dodatkami mineralnymi w technologii betonów nowej generacji / Z. Giergiczny, J. Małolepszy, J. Szwabowski, J. Śliwiński. – 2002. – 190 s.
103. Chen Y. L. The Composite Effect of Mineral Additives to the Performances of Concrete / Y. L. Chen, W. L. You // *Proceedings of the 12th Internat. Congress on the Chemistry of Cement*. - Montreal, 2007. - P. 289-301.
104. Cracking tendency of self-compacting concrete subjected to restrained shrinkage: experimental study and modeling / P. Turcry, A. Loukili, K. Haidar, G. Pijaudier-Cabot, A. Belarbi // *Materials of Civil Engineering*, 2006. – № 18. – P. 46–54.
105. Czarnecki L. Tendencje kształtujące przyszłość betonu // L. Czarnecki, W. Kurdowski // *Konferencja „Dni Betonu”*. – Wisła, 2006. – S. 3-18.
106. Daczko J. A. Stability of self-consolidating concrete, assumed or ensured? / J. A. Daczko // *Proceedings of the First North American Conference on the Design and Use of SCC*, 2002. – P. 7.
107. Dehn F. Quality conform production, processing and curing of ultra high performance concrete / F. Dehn / *BFT*, 2005. – № 2. – P. 22-23.
108. Dinakar P. Design of self-compacting concrete with ground granulated blast furnace slag [Technical Report] / P. Dinakar, K.P. Sethy, U.C. Sahoo // *Mater Des.* – 2013. – 43. – P. 161–169.
109. Dinakar P. Behaviour of self compacting concrete using Portland pozzolana cement with different levels of fly ash / P. Dinakar, M. K. Reddy, M. Sharma // *Mater Des.* – 2013. – № 46. – P. 609–616.

110. Effects of Various Fineness Moduli of Fine Aggregate on Engineering Properties of High Performance Concrete / [T. Chang, S. Lin, H. Lin, P. Lin] // Journal of the Chinese Institute of Engineers, 2001. – Vol. 24. № 3. – P. 289-300.

111. Ferrara L. Design with highly flowable fiber-reinforced concrete: overview of the activity of fib TG 8.8 / L. Ferrara, S. Grunewald, F. Dehn // Proceedings of the SCC 2010. – Vol. I. Design, production and placement of Self-Consolidating Concrete, 2010. – P. 395–406.

112. Gaimster R. Self-compacting concrete / R. Gaimster, C. Foord // Concrete, 2000. – Vol. 34. – P. 23-25.

113. Gameliak I. Determination of geosynthetic materials resistance to cyclic loading / I. Gameliak, G. Zhurba, V. Kostrycky, L. Dmitrenko // Proceedings of the Intern. Conference on Geosynthetics. – Vol. 3, Guarujá, Brazil, 2010. – P. 631 – 634.

114. Haehnel C. Interaction between cements and superplasticizers / C. Haehnel, H. Lombois-Burger, L. Guillot // Proceedings of the 12th International Congress on the Chemistry of Cement. Montreal, 2007. – P. 111-125.

115. Heikal M. Mechanical, microstructure and rheological characteristics of high performance self-compacting cement pastes and concrete containing ground clay bricks / M. Heikal, K. M. Zohdy, M. Abdelkreem // Construction Building Material, 2013. – № 38. – P. 101–109.

116. Jasiczak J. Betony ultrawysokowartosciowe. Wlasciwosci, technologie, zastosowania / J. Jasiczak, A. Wdowska, T. Rudnicki / Krakow: SPC, – 2008. – 157 s.

117. Kapelko A. Twardnienie w obniżonych temperaturach betonu samozagęszczalnego zawierającego cement hutniczy CEM III/A 42,5 N // Politechnika Wroclawska, Instytut Budownictwa, 2005, nr 4. – S. 48-50.

118. Kaprielov S. Characteristics of the structure and properties of high-strength concrete, containing multicomponent modifiers including silica fume, fly ash and metakaolin / S. Kaprielov, A. Sheynfeld, H. Kardumian, V. Dondukov /

16. International Baustofftagung (IBAUSIL). Weimar, September 20-23, 2006. – Band 2. – P. 77-84.

119. Kavalerova E. S. Alkali-activated cement production and “Best available techniques” / E. S. Kavalerova / 17. Ibausil, Weimar, 2009. – Tagungsband 1. – P. 469-474.

120. Khayat K. H. Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete / Kamal Khayat // State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 228-MPS on Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete. – Geert De Schutter. – Springer Science & Business Media, 2014. – P. 290.

121. Khayat K. H. Design, Production and Placement of Self-Consolidating Concrete / Khayat K. H., Feys Dimitri // Proceedings of SCC 2010, Montreal, Canada, 2010. – P. 453.

122. Khurana R. Fly ash in self-compacting concrete, fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete / R. Khurana, R. Saccone // ACI SP 2001. – №199. – P. 259–274.

123. Koizumi K. Effects of Chemical Admixtures on the Silicate Structure of Hydrated Portland Cement / K. Koizumi, Y. Umemura, N. Tsuyuki // Proceedings of the 12th International Congress on the Chemistry of Cement. Montreal, 2007. – P. 64-71.

124. Kurdowski W. Chemistry of cement and concrete / W. Kurdowski // Scientific Publishing PWN. – Warszawa, 2010. – 728 p.

125. Locher F.-W. Cement – principles of production and use / F.-W. Locher. – Düsseldorf : Verlag Bau+Technic GmbH, 2006. – 536 p.

126. Lothenbach B. The influence of superplasticizers on the hydration of Portland cement / B. Lothenbach, F. Winnefeld, R. Figi // Proceedings of the 12th International Congress on the Chemistry of Cement. Montreal, 2007. - P. 211-233.

127. Madandoust R. Fresh and hardened properties of self-compacting concrete containing metakaolin / R. Madandoust, S.Y. Mousavi // Construction Building Materials, 2012. – P. 752–760.

128. Mechanical properties of self-consolidating concrete blended with high volumes of fly ash and slag / K. Kuder, D. Lehman, J. Berman, G. Hannesson, R. Shogren. – Construction Building Materials, 2012. – №34. – P. 285–295.
129. Middendorf B. Macro-Micro-Nano-technology for development of binder and concrete / B. Middendorf / BFT, 2005. – №2. – P. 16–17.
130. Okamura H. Mix Design for Self-Compacting Concrete / H. Okamura, K. Ozawa // Concrete Library of JSCE. – № 25. – 1995. – P. 107–120.
131. Okamura H. Self-compacting high-performance concrete / H. Okamura // Concruction Int. – 1997. – 19(7). – P. 50–54.
132. Ouchi M. Effect of superplasticizer on self-compactability of fresh concrete / M. Ouchi, M. Hibino, H. Okamura // Transportation Research Record, № 1574. – Washington, 1997. – P. 37–40.
133. Panesar D. K. The effect of segregation on transport and durability properties of selfconsolidating concrete / D. K. Panesar, B. Shindman // Cement and Concrete Research, Vol. 42, Issue 2, 2012. – P. 252-264.
134. Paschmann H. Self compacting concrete – practical advice // Concrete Plant + Precast Technology. – 1999. – № 11. – P. 34–42.
135. Persson B. A Comparison between mechanical properties of self-compacting concrete and the corresponding properties of normal concrete / B. Persson // Cement and Concrete Research, Vol. 31, 2001. – P. 193 – 198.
136. Plank J. Impact of zeta potential of early cement hydration phases on superplasticizer adsorption / J. Plank, C. Hirsch // Cement and Concrete Research- No 37, 2007. – P. 537-542.
137. Pourchet S. Influence of PC superplasticizers on tricalcium silicate hydration / S. Pourchet, C. Comparet, L. Nicoleau // Proceedings of the 12th International Congress on the Chemistry of Cement. Montreal, 2007. - P. 132-145.
138. Pozniak O. R. Properties of self-compacting concrete with basalt fiber / O. R. Pozniak, I. I. Kirakevych, M. S. Stechyshyn // Вісник НУ “Львівська політехніка”. “Теорія і практика будівництва”. – 2014. – №781. - С. 149-153.

139. Properties of self-compacting concrete with slag fine aggregates / M. Shoya, S. Sugita, Y. Tsukinada [at el] // *Creating with Concrete: International Conf.*, 1999: Proc. – Dundee (Scotland), 1999. – P. 121–130.
140. Properties of steel fibrous concrete containing mixed fibres in fresh and hardened state / Y. Mohammadi, S. P. Singh, S. K. Kaushik // *Construction Building Materials*, 2008. – №22. – P. 956–65.
141. Sahmaran M. Transport and mechanical properties of self consolidating concrete with high volume fly ash / M. Sahmaran, O. Yaman, M. Tokyay / *Cement and Concrete Compos.* – 2009. – 31. – P. 99–106.
142. Sanytsky M. Effect of ultrafine fly ash on the properties of High Performance Concrete / M. Sanytsky, B. Rusyn, J. Halbiniak / *Вісник НУ “Львівська політехніка”. “Теорія і практика будівництва”*. – 2013. – № 756. – С. 266–272.
143. Scnachinger J. Early-Age Creaking Risk and Relaxation by Restrained Autogenous Deformation of Ultra High Performance Concrete / J. Scnachinger, K. Schmidt, D. Heinz, P. Schlissl // *Proc. of the 6 International Symposium on Utilization of High Strength High Performance Concrete, Leipzig, 16-20 June, 2002.* – P. 1341-1354.
144. Shi C. *High-Performance Construction Materials* / C. Shi, Y. L. Mo. – London : World Scientific Publishing Co. Ltd., 2008. – 448 p.
145. Stechyshyn M. Durability properties of high volume fly ash self-compacting fiber reinforced concretes / M. Stechyshyn, M. Sanytskyy, O. Poznyak // *East European Journal of Enterprise Technologies.* – 2015. – 3/11(75). – P. 49-53.
146. Stechyschyn M. Evaluation of Basalt Fiber for Strength Self-Compacting Concrete / M. Stechyschyn // *5th International Academic Conference of Young Scientists "Geodesy, Architecture and Construction 2013" (GAC-2013).* – Lviv. – 2013. – P. 104-105.
147. Structure formation and properties of rapid-hardening Self-compacting concrete / I. Kirakevych, U. Marushchak, I. Kirichenko,

M. Sanytsky // Budownictwo o zoptymalizowanym potenciale energetycznym: Praca zbiorowa pod. red. Bobki, J. Rajczyka. – Czestochowa, 2011. – S. 80-85.

148. Sukumar B. Evaluation of strength at early ages of self-compacting concrete with high volume fly ash / B. Sukumar, K. Nagamani, R. Raghavan. – Construction Building Materials. – 2008. – nr. 22. – P. 1394–1401.

149. Szwabowski J. Technologia betonu samozageszczalnego / J. Szwabowski, J. Golaszewski. – Krakov: Stowarzyszenie Producentov Cementu, 2010. – 160 s.

150. Talero R. Influence of «aluminic» pozzolans, quartz and gypsum additives on Portland cement hydration / R. Talero, V. Rahhal // Proceedings of the 12th International Congress on the Chemistry of Cement. - Montreal, 2007. – P. 22-35.

151. Tasi C. T. The Effect of Aggregate Gradation on Engineering Properties of High Performance Concrete / C. T. Tasi, C. L. Hwang // Journal of ASTM International (JAI). – Vol. 3. – № 3, 2006.

152. Yan H. The effect of silica fume and steel fiber on the dynamic mechanical performance of high-strength concrete / H. Yan, W. Sun, H. Chen // Cement and Concrete Research, 1999. – P. 423–426.

153. Xie Y. Influence of aggregate on properties of self-consolidating concrete / Xie Y., Li Y., Long G. // First international symposium on design, performance and use of self-consolidating concrete SCC, 2005. – P. 26–28.

154. Zrównoważone budownictwo. Seria Dokumenty Unii Europejskiej dotyczące budownictwa. – Warszawa: ITB, 2010.

ДОДАТКИ



ЗАТВЕРДЖУЮ”

Генеральний директор

ТзОВ «Бауербуд»

Гриців Павло

09 2014 р.

А К Т

про впровадження результатів дисертаційної роботи
на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук
Стечишина Михайла Степановича

Ми, що нижче підписалися, представники ТзОВ «Бауербуд» директор з виробництва Гудима О.П., начальник будівельної дільниці Левус Я.М., та представники Національного університету “Львівська політехніка” д.т.н., проф., завідувач кафедри будівельного виробництва Саницький М.А., к.т.н. доцент Позняк О.Р., аспірант Стечишин М.С. склали даний акт про те, що в період з 3 по 31 липня 2014 року проведено випробування самоущільнюваних бетонних сумішей з базальтовим волокном та бетонів на їх основі з проектною міцністю на стиск 32-35 МПа (клас бетону С25/30) для бетонування промислової підлоги на ТзОВ “Спільне українсько-польське підприємство РАВТРАНС” по вул. Коновальця 27 (м. Рава-Руська). При цьому було вирішено технологічні завдання забезпечення однорідності та відсутності розшаровуваності бетонної суміші в умовах підвищеної рухливості, одержання запроєктованої міцності та високої стійкості до стирання.

Загальний об’єм виготовленого бетону склав 150 м³. Технологія виробництва самоущільнюваних бетонних сумішей не відрізнялась від стандартної прийнятої на ТзОВ «Бауербуд».

Для одержання фіброармованого самоущільнюваного бетону (номінальний склад В:П:Щ=1:1,2:2,2) для влаштування промислової підлоги застосовували портландцемент ПЦ II/A-III-500 (витрата портландцементу – 155 кг на 1 м³ бетонної суміші), зола-винесення Бурштинської ТЕС (витрата золи-винесення – 360 кг на 1 м³ бетонної суміші), кварцовий пісок Жовківського родовища (M_{кр}=1,77), щебневий відсів (M_{кр}=4,98) та щебінь Віровського родовища фракції 5-20 мм. З метою забезпечення отримання однорідних самоущільнюваних фіброармованих бетонних сумішей до їх складу вводили суперпластифікатор полікарбоксилатного типу (BASF Glenium ACE 430) та водоутримуючу добавку (BASF RheoMATRIX 100). Рекомендована витрата суперпластифікатора 1,3 мас.%, а водоутримуючої добавки – 0,25 мас.%.

Результати випробувань самоущільнюваного дисперсно-армованого бетону наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Результати випробувань самоущільнюваного дисперсно-армованого бетону

Найменування показника	Значення показника	
В/ В'яз	0,32	
Діаметр розпливу конуса, мм	680-750	
Умовна в'язкість, с	4-6	
Середня густина, кг/м ³	2400-2450	
Водопоглинання, %	1,9-2,4	
Повітрязахоплення, %	0,35-0,5	
Коефіцієнт Пуасона	0,17	
Міцність бетону на стиск, МПа, у віці, діб	2	9,7-10,4
	7	18-18,6
	28	32,5-35
Стіраність, %		

Використання фіброармованого самоущільнювального бетону забезпечує рівномірний розподіл бетонної суміші без додаткового вібрування при виготовленні промислових підлог з проектною міцністю С25/30 та стіраністю.

Акт підписали:

від ТЗОВ «Бауербуд»

Директор з виробництва

 Гудима О.П.

Начальник будівельної ділянки

 Левус Я.М.

від Національного університету «Львівська політехніка»


д.т.н., професор

 Саницький М.А.

к.т.н., доцент

 Позняк О.Р.

аспірант

 Стечишин М.С.

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Генеральний директор
ТзОВ «ІНКО ЛТД»

Сухоцький В.В.

2015 р.



А К Т

про впровадження результатів дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук Стечишина Михайла Степановича

Ми, що нижче підписалися, представники ТзОВ «ІНКО ЛТД» технічний директор Фунигін С.О., начальник будівельної дільниці Жаров А.В., та представники Національного університету “Львівська політехніка” д.т.н., проф., завідувач кафедри будівельного виробництва Саницький М.А., молодший науковий співробітник Стечишин М.С. склали даний акт про те, що в період з 9 по 13 лютого 2014 року проведено випробування самоущільнюваних бетонних сумішей з базальтовим волокном та бетонів на їх основі з проектною міцністю на стиск 70 МПа (клас бетону C50/60) для бетонування промислової підлоги на ТзОВ “Блюм Україна” с. Пасіки Зубрецьки, Пустомитівський район, Львівська обл., вул. Дорожна 50. При цьому було вирішено технологічні завдання забезпечення однорідності та відсутності розшаровуваності бетонної суміші в умовах підвищеної рухливості, одержання запроектованої міцності та високої стійкості до стирання.

Загальний об’єм виготовленого бетону склав 200 м³. Технологія виробництва самоущільнюваних бетонних сумішей не відрізнялась від стандартної прийнятої на ТзОВ «ІНКО ЛТД».

Для одержання фіброармованого самоущільнюваного бетону (номінальний склад В:П:Щ=1:1,2:2,2) для влаштування промислової підлоги застосовували портландцемент ПЦ II/A-Ш-500 (витрата портландцементу – 360 кг на 1 м³ бетонної суміші), кварцовий пісок Жовківського родовища (M_{кр}=1,77), щебневий відсів (M_{кр}=4,98) та щебінь Віровського родовища фракції 5-20 мм. З метою забезпечення отримання однорідних самоущільнюваних фіброармованих бетонних сумішей до їх складувводили суперпластифікатор полікарбосилатного типу (BASF Glenium ACE 430) та водоутримуючу добавку (BASF RheoMATRIX 100). Рекомендована витрата суперпластифікатора 1,3 мас.%, а водоутримуючої добавки – 0,25 мас.%.

Результати випробувань самоущільнюваного дисперсно-армованого бетону наведені в табл. 1.

Результати випробувань самоущільнюваного дисперсно-армованого бетону

Найменування показника		Значення показника	
Діаметр розпливу конуса, мм		680-700	
Середня густина, кг/м ³		2400-2420	
Міцність бетону на стиск, МПа, у віці, діб	Нормальні умови	2	37,8
		7	76,6
		28	98,0
	При температурі +8...-20°C	2	31,6
		7	50,4
		28	70,4

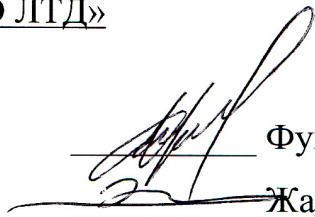
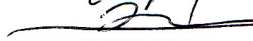
Застосування комплексних модифікаторів та дисперсного армування забезпечує одержання самоармованих самоущільнювальних бетонних сумішей з тривалим часом збереження рухливості та бетонів заданого класу (клас бетону С50/60), які тверднуть при понижених додатніх, знакозмінних та від'ємних температурах.

Акт підписали:

від ТзОВ «ІНКО ЛТД»

Технічний директор

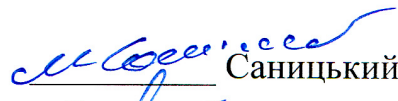

Начальник будівельної ділянки

 Фунигін С.О.
 Жаров А.В.

від Національного університету "Львівська політехніка"

д.т.н., професор

молодший науковий співробітник

 Саницький М.А.
 Стечишин М.С.

Локальний кошторис на будівельні роботи № 2-2-1

Основа:
креслення (специфікації) №

Кошторисна вартість 548,022 тис. грн.
Кошторисна трудомісткість 5,97108 тис.люд.-год.
Кошторисна заробітна плата 121,786 тис. грн.
Середній розряд робіт 3,1 розряд

№ п/п	Обґрунтування (шифр норми)	Найменування робіт і витрат	Одиниця виміру	Кількість	Вартість одиниці, грн.		Загальна вартість, грн.			Витрати труда робітників, люд.-год.			
					Всього	експлуатації машин	Всього	заробітної плати	експлуатації машин	не зайнятих обслуговуванням машин			
										заробітної плати	в тому числі заробітної плати	тих, що обслуговують машини	
												на одиницю	всього
6	7	8	9	10	11	12							
1	EH11-2-4	Улаштування ущільнених трамбівками підстиляючих щебневих шарів	м3	350	<u>630,84</u> 88,33	<u>108,50</u> 26,57	220794	30916	<u>37975</u> 9300	<u>4,78</u> 1,3014	<u>1673</u> 455,49		
2	E6-45-12	Приготування важкого бетону на щебені, клас В25	100м3	1,5	<u>126181,15</u> 6515,73	<u>4039,45</u> 1593,19	189272	9774	<u>6059</u> 2390	<u>387,15</u> 75,9284	<u>580,73</u> 113,89		
3	EH11-2-9	Улаштування підстиляючих бетонних шарів	м3	150	<u>115,73</u> 103,12	<u>1,21</u> 0,29	17360	15468	<u>182</u> 44	<u>5,58</u> 0,0139	<u>837</u> 2,09		
4	EH11-15-8	Залізнення цементних покриттів	100м2	15	<u>495,42</u> 415,32	-	7431	6230	-	<u>19,91</u>	<u>298,65</u>		
5	EH11-15-7	Шліфування бетонних або металоцементних покриттів	100м2	15	<u>1923,96</u> 1780,25	<u>75,21</u> 18,45	28859	26704	<u>1128</u> 277	<u>90,46</u> 0,9048	<u>1356,9</u> 13,57		
		Разом прямі витрати по кошторису					463716	89092	<u>45344</u> 12011		<u>4746,28</u> 585,04		
		Разом будівельні роботи, грн. в тому числі: вартість матеріалів, виробів та конструкцій, грн. всього заробітна плата, грн. Загальнопромислові витрати, грн. трудомісткість в загальнопромислових витратах, люд.год. заробітна плата в загальнопромислових витратах, грн. Всього будівельні роботи, грн. Всього по кошторису					463716						
		Кошторисна трудомісткість, люд.год.					5971,08						
		Кошторисна заробітна плата, грн.					121786						

Локальний кошторис на будівельні роботи № 2-2-2

Основа:
креслення (специфікації) №

Кошторисна вартість 457,189 тис. грн.
Кошторисна трудомісткість 3,63695 тис.люд.-год.
Кошторисна заробітна плата 73,021 тис. грн.
Середній розряд робіт 2,8 розряд

№ п/п	Обґрунтування (шифр норми)	Найменування робіт і витрат	Одиниця виміру	Кількість	Вартість одиниці, грн.		Загальна вартість, грн.			Витрати труда робітників, люд.-год.	
					Всього	експлуатації машин	Всього	заробітної плати	експлуатації машин	не зайнятих обслуговуванням машин	
										заробітної плати	в тому числі заробітної плати
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	ЕН11-2-4	Улаштування ущільнених трамбівками підстилаючих щебеневих шарів	м3	350	<u>630,84</u> 88,33	<u>108,50</u> 26,57	220794	30916	<u>37975</u> 9300	<u>4,78</u> 1,3014	<u>1673</u> 455,49
2	Е6-45-14	Приготування важкого самоущільнюваного бетону на щебені, клас В30	100м3	1,0575	<u>162748,99</u> 6515,73	<u>4039,45</u> 1593,19	172107	6890	<u>4272</u> 1685	<u>387,15</u> 75,9284	<u>409,41</u> 80,29
3	ЕН11-2-9	Улаштування підстилаючих бетонних шарів	м3	150	<u>89,35</u> 77,25	<u>1,21</u> 0,29	13403	11588	<u>182</u> 44	<u>4,18</u> 0,0139	<u>627</u> 2,09
Разом прямі витрати по кошторису							406304	49394	<u>42429</u> 11029		<u>2709,41</u> 537,87
Разом будівельні роботи, грн.							406304				
в тому числі:											
вартість матеріалів, виробів та конструкцій, грн.							314481				
всього заробітна плата, грн.							60423				
Загальновиробничі витрати, грн.							50885				
трудомісткість в загальновиробничих витратах, люд.год.							389,67				
заробітна плата в загальновиробничих витратах, грн.							12598				
Всього будівельні роботи, грн.							457189				
Всього по кошторису							457189				
Кошторисна трудомісткість, люд.год.							3636,95				
Кошторисна заробітна плата, грн.							73021				

Склав

_____ [посада, підпис (ініціали, прізвище)]

Перевірів

_____ [посада, підпис (ініціали, прізвище)]

Розрахунок одиничної вартості

ЕН11-2-4 Улаштування ущільнених трамбівками підстиляючих щебених шарів

Вимірник : м3

№ п/п	Шифр ресурсу	Найменування витрат і ресурсів	Одиниця виміру	Кількість	Вартість, грн.	
					одиниці виміру	всього
1	2	3	4	5	6	7
1		Зарплата Витрати труда робітників - будівельників Середній розряд робіт - 3,0	люд.-год	4,78	18,48	88,33
2	СН203-101	Вартість експлуатації машин і механізмів Автовантажувачі, вантажопідйомність 5 т	маш.-год люд.-год	0,06 0,0834	120,91 20,86	7,25 1,74
	СН205-102	Середній розряд робіт - 4,0 Компресори пересувні з двигуном внутрішнього згоряння, тиск до 686 кПа [7 ат], продуктивність 5 м3/хв Середній розряд робіт - 3,8	маш.-год люд.-год	1,05 1,218	96,42 20,38	101,24 24,83
3		Разом: в т.ч. зарплата машиністів				108,50 26,57
4	СН233-1100	Машини, враховані в складі загальновиробничих витрат Трамбівки пневматичні при роботі від компресора	маш.-год	1,05		
	С1421-9474	Вартість матеріалів, виробів і конструкцій Щебінь із природного каменю для будівельних робіт, фракція 5[3]-10 мм, марка М200-300	м3	0,18	342,32	61,62
	С1421-9476	Щебінь із природного каменю для будівельних робіт, фракція 10-20 мм, марка М200-300	м3	0,09	303,67	27,33
	С1421-9478	Щебінь із природного каменю для будівельних робіт, фракція 40-70 мм, марка М200-300	м3	1	244,37	244,37
	С1421-9479-1	Клинець, марка 300	м3	0,092	364,81	33,56
	С1421-9479-2	Кам'яний дріб'язок, марка 300	м3	0,184	364,81	67,13
		Разом: Всього:				434,01 630,84

Склав _____

Перевірив _____

Розрахунок одиничної вартості

Е6-45-12 Приготування важкого бетону на щебені, клас В25

Вимірник : 100м3

№ п/п	Шифр ресурсу	Найменування витрат і ресурсів	Одиниця виміру	Кількість	Вартість, грн.	
					одиниці виміру	всього
1	2	3	4	5	6	7
1		Зарплата Витрати труда робітників - будівельників Середній розряд робіт - 2,0	люд.-год	387,15	16,83	6515,73
2	СН201-22	Вартість експлуатації машин і механізмів Автомобілі-самоскиди, вантажопідйомність 7 т	маш.-год люд.-год	34,44 44,4276	94,50 22,76	3254,58 1011,16
	СН211-811	Середній розряд робіт - 4,6 Бетонозмішувачі примусової дії пересувні, місткість 250 л Середній розряд робіт - 3,0	маш.-год люд.-год	29,44 31,5008	26,66 18,48	784,87 582,03
4		Разом: в т.ч. зарплата машиністів				4039,45 1593,19
		Вартість матеріалів, виробів і				

		КОНСТРУКЦІЙ				
C111-1324 варіант 1	портландцемент загальнобудівельного та спеціального призначення, марка 500		т	38,2	1822,18	69607,28
C142-10-2	Вода		м3	22	9,99	219,78
C1421-9470 варіант 2	Щебінь із природного каменю для будівельних робіт, фракція 10-20 мм, марка М400		м3	80	425,77	34061,60
C1421-9552 варіант 1	Пісок природний, збагачений		м3	47	249,73	11737,31
		Разом:				115625,97
		Всього:				126181,15

Склав _____
Перевірив _____

Розрахунок одиничної вартості

ЕН11-2-9 Улаштування підстиляючих бетонних шарів

Вимірник : м3

№ п/п	Шифр ресурсу	Найменування витрат і ресурсів	Одиниця виміру	Кількість	Вартість, грн.	
					одиниці виміру	всього
1	2	3	4	5	6	7
1		Зарплата				
		Витрати труда робітників - будівельників Середній розряд робіт - 3,0	люд.-год	5,58	18,48	103,12
2	СН203-101	Вартість експлуатації машин і механізмів				
		Автовантажувачі, вантажопідйомність 5 т	маш.-год	0,01	120,91	1,21
		Середній розряд робіт - 4,0	люд.-год	0,0139	20,86	0,29
		Разом:				1,21
3		в т.ч. зарплата машиністів				0,29
		Машини, враховані в складі загальнопромислових витрат				
4	СН270-116	Вібратори поверхневі	маш.-год	0,65		
		Вартість матеріалів, виробів і конструкцій				
	C111-595	Мастика бітумно-латексна покрівельна	т	0,002	3267,68	6,54
	C112-138	Дошки необрізані з хвойних порід, довжина 2-3,75 м, усі ширини, товщина 32, 40 мм, IV сорт	м3	0,001	857,11	0,86
	C142-10-2	Вода	м3	0,35	9,99	3,50
		Енергоносії машин, врахованих в складі загальнопромислових витрат				
	C1999-9001	Електроенергія	кВт-год	0,3705	1,134	0,42
	C1999-9005	Мастильні матеріали	кг	0,0065	14,75	0,10
		Разом:				11,40
		Всього:				115,73

Склав _____
Перевірив _____

Розрахунок одиничної вартості

ЕН11-15-8 Залізнення цементних покриттів

Вимірник : 100м2

№ п/п	Шифр ресурсу	Найменування витрат і ресурсів	Одиниця виміру	Кількість	Вартість, грн.	
					одиниці виміру	всього
1	2	3	4	5	6	7
1		Зарплата				
		Витрати труда робітників - будівельників Середній розряд робіт - 4,0	люд.-год	19,91	20,86	415,32
4		Вартість матеріалів, виробів і конструкцій				
	C111-1305 варіант 1	суха суміш для топінгу підлог - cerinol hb	т	0,06	1335,08	80,10
		Разом:				80,10
		Всього:				495,42

Склав _____

Перевірив _____

Розрахунок одиничної вартості

ЕН11-15-7 Шліфування бетонних або металоцементних покриттівВимірник : 100м²

№ п/п	Шифр ресурсу	Найменування витрат і ресурсів	Одиниця виміру	Кількість	Вартість, грн.	
					одиниці виміру	всього
1	2	3	4	5	6	7
1		Зарплата Витрати труда робітників - будівельників Середній розряд робіт - 3,5	люд.-год	90,46	19,68	1780,25
2	СН205-102	Вартість експлуатації машин і механізмів Компресори пересувні з двигуном внутрішнього згорання, тиск до 686 кПа [7 ат], продуктивність 5 м ³ /хв Середній розряд робіт - 3,8	маш.-год люд.-год	0,78 0,9048	96,42 20,38	75,21 18,45
3		Разом: в т.ч. зарплата машиністів				75,21 18,45
4	СН270-121	Машини, враховані в складі загальнопромислових витрат Машини мозаїчно-шліфувальні	маш.-год	32		
	С142-10-2	Вода	м ³	2	9,99	19,98
	С1112-27	Карборунд	кг	2	14,46	28,92
		Енергоносії машин, врахованих в складі загальнопромислових витрат				
	С1999-9001	Електроенергія	кВт-год	13,12	1,134	14,88
	С1999-9005	Мастильні матеріали	кг	0,32	14,75	4,72
		Разом:				68,50
		Всього:				1923,96

Склав _____

Перевірив _____

Розрахунок одиничної вартості

ЕН11-2-4 Улаштування ущільнених трамбівками підстилаючих щебених шарів

Вимірник : м3

Складений в поточних цінах станом на 2 грудня 2015 року

№ п/п	Шифр ресурсу	Найменування витрат і ресурсів	Одиниця виміру	Кількість	Вартість, грн.	
					одиниці виміру	всього
1	2	3	4	5	6	7
1		Зарплата Витрати труда робітників - будівельників Середній розряд робіт - 3,0	люд.-год	4,78	18,48	88,33
2	СН203-101	Вартість експлуатації машин і механізмів Автовантажувачі, вантажопідйомність 5 т	маш.-год люд.-год	0,06 0,0834	120,91 20,86	7,25 1,74
	СН205-102	Середній розряд робіт - 4,0 Компресори пересувні з двигуном внутрішнього згоряння, тиск до 686 кПа [7 ат], продуктивність 5 м3/хв Середній розряд робіт - 3,8	маш.-год люд.-год	1,05 1,218	96,42 20,38	101,24 24,83
		Разом: в т.ч. зарплата машиністів				108,50 26,57
3	СН233-1100	Машини, враховані в складі загальновиробничих витрат Трамбівки пневматичні при роботі від компресора	маш.-год	1,05		
4		Вартість матеріалів, виробів і конструкцій				
	С1421-9474	Щебінь із природного каменю для будівельних робіт, фракція 5[3]-10 мм, марка М200-300	м3	0,18	342,32	61,62
	С1421-9476	Щебінь із природного каменю для будівельних робіт, фракція 10-20 мм, марка М200-300	м3	0,09	303,67	27,33
	С1421-9478	Щебінь із природного каменю для будівельних робіт, фракція 40-70 мм, марка М200-300	м3	1	244,37	244,37
	С1421-9479-1	Клинець, марка 300	м3	0,092	364,81	33,56
	С1421-9479-2	Кам'яний дріб'язок, марка 300	м3	0,184	364,81	67,13
		Разом: Всього:				434,01 630,84

Склав _____

Перевірив _____

Розрахунок одиничної вартості

Е6-45-14 Приготування важкого самоущільнюваного бетону на щебені, клас В30

Вимірник : 100м3

Складений в поточних цінах станом на 2 грудня 2015 року

№ п/п	Шифр ресурсу	Найменування витрат і ресурсів	Одиниця виміру	Кількість	Вартість, грн.	
					одиниці виміру	всього
1	2	3	4	5	6	7
1		Зарплата				
		Витрати труда робітників - будівельників Середній розряд робіт - 2,0	люд.-год	387,15	16,83	6515,73
2		Вартість експлуатації машин і механізмів				
	СН201-22	Автомобілі-самоскиди, вантажопідйомність 7 т	маш.-год люд.-год	34,44 44,4276	94,50 22,76	3254,58 1011,16
		Середній розряд робіт - 4,6				
	СН211-811	Бетонозмішувачі примусової дії пересувні, місткість 250 л	маш.-год люд.-год	29,44 31,5008	26,66 18,48	784,87 582,03
		Середній розряд робіт - 3,0				
		Разом:				4039,45
4		в т.ч. зарплата машиністів				1593,19
		Вартість матеріалів, виробів і конструкцій				
	С111-2 варіант 1	зола винесення	т	36	386,88	13927,68
	С111-196 варіант 1	Фібра базальтова	кг	510	34,98	17839,80
	С111-247 варіант 2	суперпластифікатор	кг	515	102,33	52699,95
	С111-1325 варіант 2	Портландцемент загальнобудівельного та спеціального призначення, марка 500	т	15,5	1226,91	19017,11
	С142-10-2	Вода	м3	17	9,99	169,83
	С1421-9450	Щебінь із природного каменю для будівельних робіт, фракція 5[3]-10 мм, марка М1000 і більше	м3	70	437,01	30590,70
	С1421- 9455-3	Щебінь-висівки, марка М-1000 і більше, фракція до 3 мм	м3	14,3	442,64	6329,75
	С1421-9552	Пісок природний, збагачений	м3	41	283,39	11618,99
		Разом:				152193,81
		Всього:				162748,99

Склав _____

Перевірив _____

Розрахунок одиничної вартості

ЕН11-2-9 Улаштування підстилаючих бетонних шарів

Вимірник : м3

Складений в поточних цінах станом на 2 грудня 2015 року

№ п/п	Шифр ресурсу	Найменування витрат і ресурсів	Одиниця виміру	Кількість	Вартість, грн.	
					одиниці виміру	всього
1	2	3	4	5	6	7
1		Зарплата Витрати труда робітників - будівельників Середній розряд робіт - 3,0	люд.-год	4,18	18,48	77,25
2	СН203-101	Вартість експлуатації машин і механізмів Автовантажувачі, вантажопідйомність 5 т	маш.-год люд.-год	0,01 0,0139	120,91 20,86	1,21 0,29
		Середній розряд робіт - 4,0				
		Разом:				1,21
4		в т.ч. зарплата машиністів				0,29
		Вартість матеріалів, виробів і конструкцій				
	С111-595	Мастика бітумно-латексна покрівельна	т	0,002	3267,68	6,54
	С112-138	Дошки необрізні з хвойних порід, довжина 2-3,75 м, усі ширини, товщина 32, 40 мм, IV сорт	м3	0,001	857,11	0,86
	С142-10-2	Вода	м3	0,35	9,99	3,50
		Разом:				10,89
		Всього:				89,35

Склав _____

Перевірив _____