

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ “ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА”

**СТЕЧИШИН МИХАЙЛО СТЕПАНОВИЧ**



УДК 691.328.4

**САМОУЩІЛЬНЮВАЛЬНІ БЕТОНИ,  
АРМОВАНІ ДИСПЕРСНИМИ ВОЛОКНАМИ**

05.23.05 – будівельні матеріали та вироби

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Львів – 2016

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Національному університеті „Львівська політехніка”  
Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник – доктор технічних наук, професор  
**Саницький Мирослав Андрійович,**  
Національний університет „Львівська політехніка”,  
завідувач кафедри будівельного виробництва.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Гамеляк Ігор Павлович,**  
Київський національний транспортний університет,  
завідувач кафедри аеропортів;

кандидат технічних наук  
**Терлига Сергій Юрійович,**  
ТзОВ «Ферозіт», м. Львів, директор.

Захист відбудеться “ 13 ” травня 2016 р. о 13<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої  
вченої ради Д 35.052.17 Національного університету “Львівська політехніка” за  
адресою: 79013, м. Львів, вул. Карпінського, 6, навчальний корпус ІІ, ауд. 212.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного університету  
“Львівська політехніка” (79013, м. Львів, вул. Професорська, 1).

Автореферат розісланий “ 12 ” квітня 2016 р.

Учений секретар спеціалізованої  
вченої ради Д 35.052.17  
к.т.н., доцент



П.Ф. Холод

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** У сучасному інноваційному будівництві для реставрації і підсилення конструкцій розширюється використання бетонів нового покоління, одержаних з самоущільнювальних бетонних сумішей (Self-Compacting Concrete – SCC), особливістю яких є здатність ущільнюватися без механічного впливу, заповнюючи 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, покращення санітарно-гігієнічних умов праці, а також забезпечення високої якості поверхні конструкції після розпалублення. Разом з тим, підвищена витрата портландцементу при низькому вмісті крупного заповнювача може призводити до надлишкових деформацій усадки високоміцних самоущільнювальних бетонів. Крім цього, особливістю таких матеріалів є їх низька ударна міцність, підвищена можливість тріщиноутворення та крихкості, що проявляється в зниженні пластичних деформацій бетону під навантаженням, а також представляє загрозу безпечної експлуатації і надійності будівель та споруд при перевищенні розрахункових навантажень у 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, синтетичними, вуглецевими й ін. Перспективним є використання базальтової фібри, до основних переваг якої відносять нижчу вартість, високий модуль пружності та хімічну стійкість, а також поширення сировинної бази. Проте при традиційному дисперсному армуванні вирішується задача гальмування тріщин 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 самоущільнювальних бетонів з покращеними експлуатаційними властивостями при збільшенні їх життєвого циклу, вирішується за рахунок використання суперпластифікованих цементуючих систем та багаторівневого модифікування структури композиту різномасштабними армувальними елементами на декількох структурних рівнях – добавками різного функціонального призначення в поєднанні з дисперсними 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 0115U000426) відповідно до тематичного плану Міністерства освіти і науки України. У зазначених роботах автор був виконавцем.

**Мета роботи і задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є розроблення самоущільнювальних бетонів з покращеними експлуатаційними властивостями шляхом багаторівневого дисперсного армування, оптимізація складів самоущільнювальних дисперсно-армованих 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 дисперсних базальтових волокон на властивості високорухливих цементуючих систем;
- встановити фізико-хімічні особливості гідратації цементуючої матриці самоущільнювальних бетонів, армованих дисперсними базальтовими волокнами;
- оптимізувати склади високоміцних самоущільнюваних бетонів, армованих базальтовою фіброю, за критеріями легкоукладальності та міцності;
- дослідити реологічні властивості самоущільнювальних сумішей та будівельно-технічні характеристики бетонів, армованих базальтовою фіброю, в т.ч. при твердненні у різних температурних умовах;
- на основі комплексного аналізу одержаних математичних моделей запроєктувати ефективні склади самоущільнювальних бетонів з високим вмістом золи-винесення, армованих базальтовими волокнами;
- дослідити будівельно-технічні властивості самоущільнювальних дисперсно-армованих бетонів з високим вмістом золи-винесення;
- провести практичну апробацію розроблених самоущільнювальних бетонів, армованих базальтовою фіброю, та обґрунтувати їх техніко-економічну ефективність.

**Об'єкт дослідження:** процеси регулювання технологічних властивостей самоущільнювальних бетонних сумішей та направлено багаторівневого армування структури бетону мінеральними волокнами і функціональними добавками.

**Предмет дослідження:** самоущільнювальні бетони, армовані дисперсними базальтовими волокнами, з високими будівельно-технічними та експлуатаційними властивостями.

**Методи досліджень.** 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 макrorівні – 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.

Особистий внесок здобувача відображено в наукових роботах:

- досліджено будівельно-технічні властивості самоущільнювальних дисперсно-армованих бетонів з високим вмістом золи-виносення [1, 9];

- встановлено вплив базальтових волокон, активних мінеральних добавок, мікронаповнювачів і комплексних хімічних добавок на властивості цементуючих систем для самоущільнювальних бетонів [2, 5];

- проведено оптимізацію складів самоущільнювальних бетонів і самоущільнювальних бетонів, армованих базальтовою фіброю, за критерієм легковкладальності та міцності [3, 4, 7];

- встановлено фізико-хімічні особливості тверднення самоармованих цементуючих систем [6];

- проведено дослідження реологічних властивостей фіброармованих самоущільнювальних бетонних сумішей з добавками модифікаторів і мікронаповнювачів та експлуатаційних характеристик бетонів на їх основі [8].

**Апробація результатів дисертації.** Матеріали дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на конференціях: IV, V Міжнародній конференції молодих вчених ГАС “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.

## ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** обґрунтовано актуальність дисертаційної роботи, сформульовано мету і задачі досліджень, зазначено найбільш важливі положення, що отримані автором і мають наукову новизну та практичну цінність.

У першому розділі зроблено аналітичний огляд літературних джерел, присвячених проблемам отримання самоущільнювальних бетонів з покращеними експлуатаційними характеристиками, розглянуто питання, пов'язані з вивченням особливостей дисперсного армування різними видами волокон як ефективного способу підвищення тріщиностійкості та довговічності бетонних конструкцій, а також визначено теоретичні передумови досліджень.

Тенденції широкого застосування в світовій будівельній практиці бетонів нової генерації з високими експлуатаційними і технологічними властивостями, зокрема самоущільнювальних, викликані зростаючою необхідністю суспільства в унікальних і надійних інженерних конструкціях при економії матеріальних і енергетичних ресурсів. Дослідженнями М.М. Зайченка, В.І. Калашнікова, С.В. Ковалю, П. Айчина, Х. Окамури, Я. Швабовського, С. Ші та ін. показано, що одержання стабільних високих реологічних характеристик бетонної суміші та необхідної міцності затверділого самоущільнювального бетону вимагає багатокомпонентності складу і використання тонкодисперсних мінеральних добавок при одночасному зменшенні кількості та розміру крупного заповнювача. Разом з тим, при зміні макроструктури бетону (збільшення кількості цементного каменю та зменшення крупного заповнювача) деформації усадки самоущільнювального бетону дещо збільшуються, а початковий модуль пружності зменшується порівняно з показниками бетонів однакового класу, одержаних за традиційною технологією (В.М. Вировий, Г.В. Несветаев та ін.). При значному підвищенні міцності бетону на стиск знижується ударна міцність, зростає чутливість до тріщиноутворення, що проявляється в зниженні пластичних деформацій бетону під навантаженням, в результаті чого зростає небезпека крихкого руйнування конструкцій, а також загроза безпечної експлуатації і надійності будівель та споруд (Ю.В. Зайцев, В.І. Ягуст, Х. Броуверс, Х.В. Рейнгард та ін.).

Для реалізації завдання підвищення надійності і довговічності конструкцій необхідно враховувати сумісну дію деформування і тріщиноутворення композиційних матеріалів, оцінити процеси розвитку та поширення тріщин з метою забезпечення тріщиностійкості (Є.О. Гузеєв, С.М. Леонович, С.Й. Солодкий). На сучасному етапі розвитку бетонознавства за рахунок керованого структуроутворення створюється можливість розроблення матеріалів із необхідними властивостями на основі розкриття взаємозв'язків у системі „склад – структура – властивості матеріалу” шляхом введення нових структурних елементів, що блокують розвиток тріщин у бетоні, зокрема в'язкопластичних компонентів, дисперсних армувальних волокон – сталевих, поліпропіленових, скляних, базальтових (Ю.М. Баженов, В.М. Дерев'янка, О.Ю. Дорошенко, П.К. Мехта, П. Пейроу та ін.). Перспективним є використання базальтової фібри, що характеризується нижчою вартістю, високим модулем пружності та хімічною стійкістю.

Слід відзначити, що при традиційному дисперсному армуванні вирішується задача гальмування тріщин одного структурного рівня, в той час як ієрархія тріщиноутворення та сукупності тріщин свідчить про присутність у бетоні дефектів різних розмірів і належність їх до відповідного масштабного рівня структури

матеріалу – нано-, ультрамікро-, субмікро-, мікро-, мезо- та макрорівня. Аналіз відомих закономірностей формування малodefектної структури будівельних матеріалів (І.В. Барабаш, В.І. Гоц, Л.Й. Дворкін, П.В. Кривенко, Р.Ф. Рунова, К.К. Пушкарьова, М.А. Саницький, О.В. Ушеров-Маршак, Л.О. Шейніч та ін.), а також закономірностей розвитку тріщин у бетонах дозволяє висунути гіпотезу про доцільність багаторівневого модифікування структури композиту добавками різного функціонального призначення в поєднанні з армувальними волокнами: на макромасштабному рівні – базальтовою фіброю, на мікромасштабному рівні (цементуюча матриця) – високодисперсні мінеральні добавки за рахунок явища „самоармування” (В.В. Тимашев та ін.) для отримання високоміцного дисперсно-армованого бетону з покращеними експлуатаційними властивостями.

У заключній частині огляду літератури сформульовано мету дисертаційної роботи, визначені завдання, які необхідно вирішити в ході її виконання.

У **другому розділі** наведено характеристики вихідних матеріалів, описані основні методики досліджень, використані в роботі.

При проведенні експериментальних досліджень використано портландцементи загальнобудівельного призначення ПЦ І-500 ПАТ “Івано-Франівськцемент” та ПЦ ІІ/А-ІІІ-500 ПАТ “Волинь-цемент”. На їх основі розроблено самоармовані суперпластифіковані цементуючі системи, що містять золу-винесення (ЗВ), метакаолін (МК), суперпластифікатор полікарбоксилатного типу Basf Glenium ACE 430 (ПК). При цьому дисперсне армування цементуючої системи на мікрорівні проводили органо-мінеральними добавками, до складу яких входить комплексна сульфатно алюмінатна добавка (КСАД) на основі високоактивного метакаоліну і двоводного гіпсу. Для забезпечення стабільних реологічних характеристик самоущільнювальних бетонних сумішей в якості регулятора в’язкості використовували добавку RheoMATRIX®100.

Армувальним елементом на макромасштабному рівні (мезорівень цементного бетону) використано лугостійку модифіковану базальтову фібру РБР-18-т10 ТзОВ „Технобазальт-Інвест” (м. Київ) довжиною волокна 12, 24 і 36 мм, діаметром 18 мкм, виготовлену з базальтового ровінгу за ТУ У В.2.7-26.8-34323267-002:2009, до технічних переваг використання якої належить забезпечення тривимірного армування суміші, збільшення міцності бетону на стиск та розтяг при згині, стійкості до стирання, підвищення водонепроникності та морозостійкості.

Для виготовлення дисперсно-армованих самоущільнювальних бетонів використовували кварцовий пісок Жовківського родовища Львівської області ( $M_{кр}=1,77$ ), щебвідсів фракції 2-5 мм з модулем крупності  $M_{кр}=4,97$  та крупний заповнювач гранітний щебінь Віровського родовища фракції 5-20 мм.

Дослідження фракційного складу і тонини розмелювання портландцементів та мінеральних добавок проводили ситовим аналізом та визначенням питомої поверхні на поверхнемірі ПМЦ-500, розподіл частинок за розмірами – за допомогою лазерного аналізатора зернистості Cilas 990 Liquid з програмним комплексом Size Expert Software. Технологічні властивості самоущільнювальних сумішей аналізували за допомогою спеціальних методів згідно з EN 12350, а також за ДСТУ Б В.2.7-114-2002. Фізико-механічні властивості та будівельно-технічні



характеристики розроблених самоущільнювальних дисперсно-армованих бетонів визначали згідно діючих стандартів та загальноприйнятих методик. Оптимізацію складів самоущільнювальних бетонів, армованих дисперсними волокнами, проводили за допомогою методів експериментально-статистичного моделювання з використанням дисоціативно-крокового методу оптимізації.

Вивчення фазового складу продуктів гідратації дисперсно-армованих цементуючих систем проводили за допомогою комплексу фізико-хімічних методів аналізу: рентгенофазового, диференційно-термічного та ін. Хімічні склади портландцементів та мінеральних добавок визначали рентгеноспектрометром ARL 9800 XP. Для дослідження морфології поверхні каменю на основі цементуючих систем та мікрозондового рентгеноспектрального аналізу використано растровий електронний мікроскоп РЕМ-106И.

**У третьому розділі** наведено результати розроблення високоміцних самоущільнювальних бетонів, армованих базальтовою фіброю, і дослідження їх будівельно-технічних властивостей.

Основною характеристикою самоущільнювальної бетонної суміші є її висока текучість без сегрегації фаз при транспортуванні та укладанні, механізмом для контролю яких є присутність суперпластифікатора, якість цементного тіста і хімія поверхні частинок цементуючих систем (портландцементу, мікронаповнювачів, мінеральних добавок). Рухливість цементних систем, що задовольняє вимоги до самоущільнення (розплив РЦ, виміряний за допомогою циліндра Сутгарда, становить понад 300 мм), досягається за рахунок використання до 1,5-2,0 мас.% суперпластифікатора полікарбоксилатного типу. Приріст міцності дрібнозернистого бетону через 28 діб тверднення в нормальних умовах становить 17,7 та 30,5% при використанні відповідно 0,5 і 1,5 мас.% суперпластифікатора ПК.

Дослідженнями впливу довжини базальтової фібри на властивості цементного тіста встановлено, що введення волокон базальтової фібри довжиною 12 мм спричиняє зниження рухливості цементного тіста від 335 до 320 мм, використання фібри довжиною волокон 24 та 36 мм призводить до зменшення розпливу до 310 та 300 мм відповідно. Зниження рухливості дисперсно-армованих цементуючих 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. Із збільшенням довжини фібри зростає і в'язкість цементного тіста. Так, при введенні фібри довжиною 12 мм та 36 мм умовна в'язкість цементного тіста становить 6,4 та 15,8 с відповідно.

Результати впливу довжини базальтової фібри на міцність цементного тіста показали (рис. 1), 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. Для дрібнозернистого бетону через 28 діб тверднення в нормальних умовах  $R_{зг}$  становить 10,2 МПа, при введенні 0,5 мас.% фібри довжиною 24 мм міцність на згин дрібнозернистого бетону зростає до 13,5 МПа (технічний ефект  $\Delta R_{зг28}=32\%$ ) (рис. 1, б).

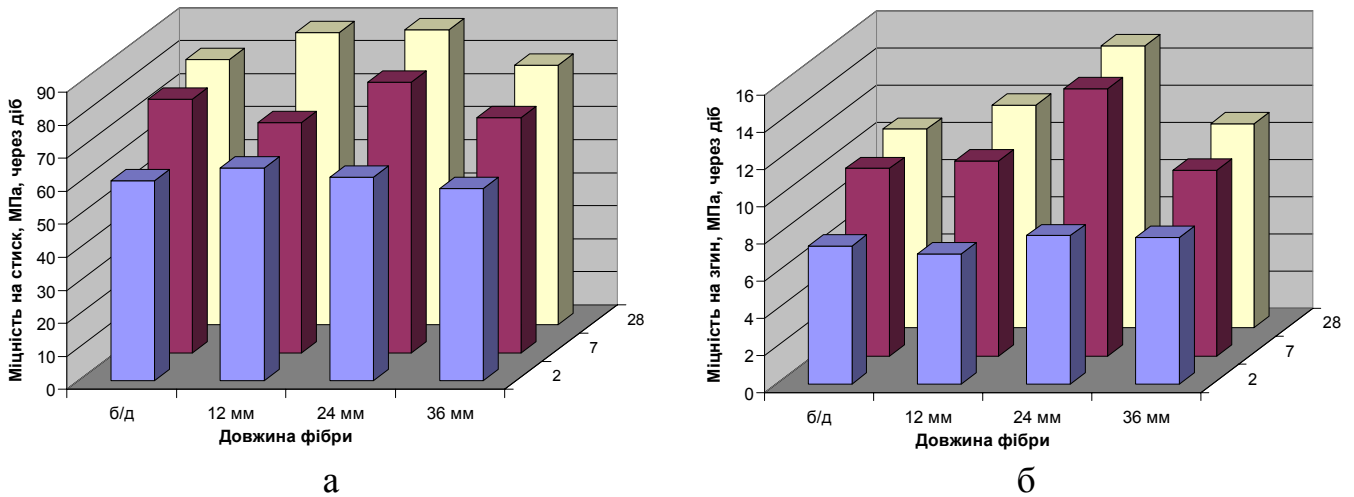


Рис. 1. Вплив довжини фібри на міцність на стиск (а) та згин (б) цементного каменю на основі суперпластифікованої цементуючої системи

Для визначення оптимального співвідношення добавок ПК та метакаоліну в складі самоармованих цементуючих систем виконані дослідження методом математичного планування експерименту при витраті регулятора в'язкості (0,1 мас.%) та фібри базальтової (0,5 мас.%,  $l=24$  мм). За результатами випробувань отримані рівняння регресії та побудовані ізопараметричні діаграми, які дозволяють визначити співвідношення компонентів для одержання самоармованих систем з високими показниками рухливості, ранньої та стандартної міцностей (рис. 2 а, б).

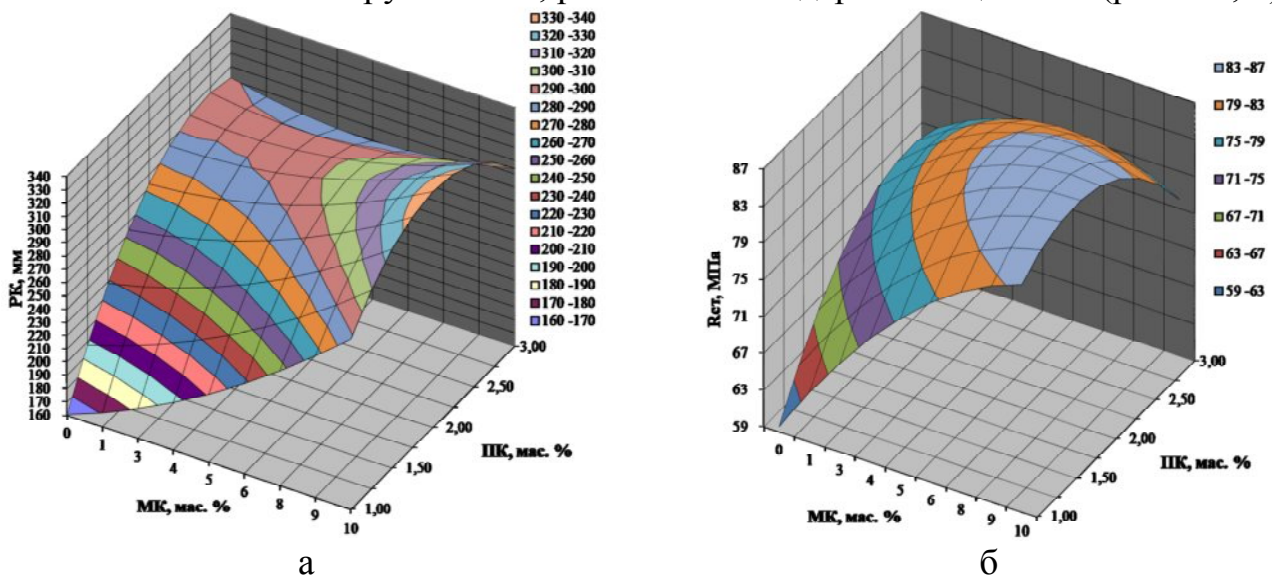


Рис. 2. Ізопараметричні діаграми розливу конуса (а) та міцності на стиск (б) через 28 днів самоармованих цементуючих систем (Ц:П=1: 1:1,5)

При випробуванні портландцементу ПЦ II/A-III-500 та оптимізованих самоармованих цементуючих систем на його основі згідно з ДСТУ EN 196-1:2007 ( $V/C=0,50$ ) встановлено, що із забезпеченням пластифікуючого ефекту ( $\Delta R_K=78,6\%$ ) рання міцність на стиск самоармованої системи зростає в 1,2 рази; стандартна міцність  $R_{ст}^{28}=72,0$  МПа перевищує міцність ПЦ II/A-III-500 на 32,4%. Дисперсне армування базальтовою фіброю забезпечує зростання ранньої міцності системи в

1,3 рази, а міцності через 28 діб – на 37,9% порівняно з вихідним портландцементом. За рахунок суттєвого водоредукуючого ефекту ( $\Delta V/C=20\%$ ) марочна міцність самоармованої цементуючої системи досягає 92 МПа, а при армуванні дисперсним базальтовим волокном складає 95,4 МПа (рис. 3 а, б). За міцнісними показниками розроблена цементуюча система відповідає вимогам, що ставляться до високоміцних ( $R_{ст}^{28} > 60$  МПа) в'язучих.

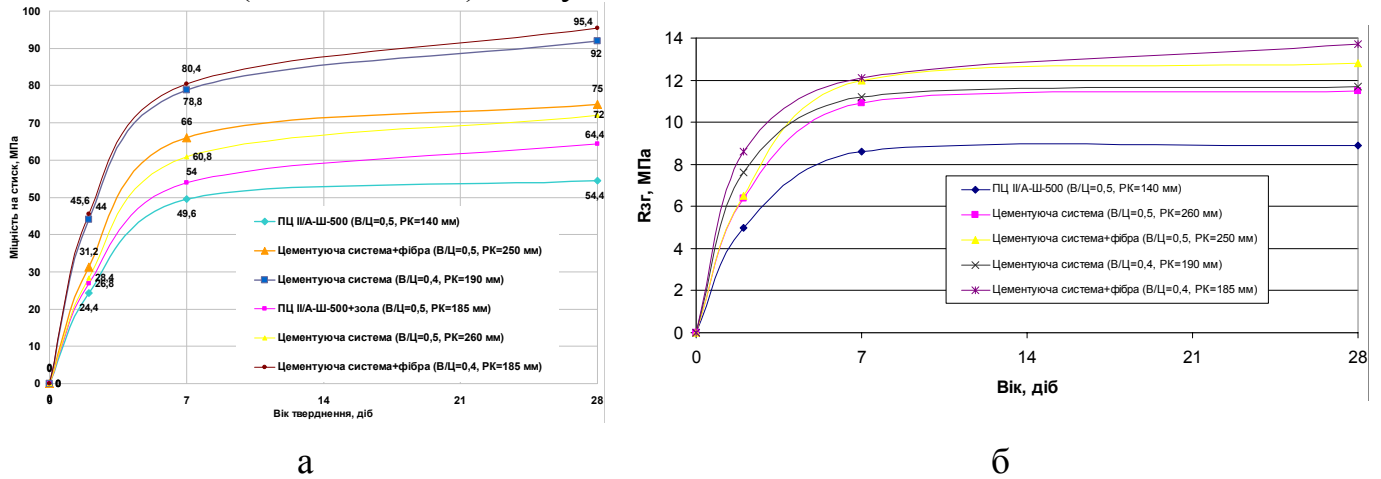


Рис. 3. Міцність на стиск (а) та згин (б) цементуючих систем згідно з ДСТУ EN 196-1:2007

Оптимізація упакування частинок цементуючої системи дрібнодисперсними мінеральними добавками (метакаолін, зола-винесення), що визначає початкову щільність системи, а також наявність енергетичноактивних ультрадисперсних частинок у складі мінеральної добавки на основі метакаоліну, які взаємодіють з  $Ca(OH)_2$  з одержанням додаткової кількості гідроалюмінатних та субмікроармувальних гідросилікатних і гідросульфоалюмінатних фаз на ранніх стадіях гідратації, за рахунок реалізації на мікрорівні явища «самоармування» забезпечують отримання підвищеної ранньої, стандартної міцності армованої цементуючої системи на стиск та згин.

За відношенням значень міцності на згин до показників міцності на стиск дисперсно-армованих суперпластифікованих цементуючих систем розраховано коефіцієнт крихкості у різні періоди тверднення. Приріст міцності на згин відбувається повільніше порівняно з міцністю на стиск, тому коефіцієнти крихкості цементуючих систем зменшуються з часом тверднення, однак через 28 діб тверднення їх значення перевищують 0,125, що дозволяє класифікувати цементуючі системи як некрихкі.

Використання сульфо-алюмінатної мінеральної добавки на основі метакаоліну 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 – завдяки ефекту самоармування кристалогідратами, які характеризуються голчастим габітусом, що призводить до збільшення жорсткості матричної складової та зростання коефіцієнту тріщиностійкості порівняно з портландцементною системою без добавок з 0,205 до

0,225. Дисперсне модифікування самоармованої цементуючої системи базальтовою фіброю забезпечує вирівнювання пружних властивостей компонентів структури із зростанням коефіцієнта тріщиностійкості високоміцного дрібнозернистого бетону через 28 діб від 0,163 до 0,171 порівняно з портландцементом ПЦ II/A-III-500 (рис. 4).

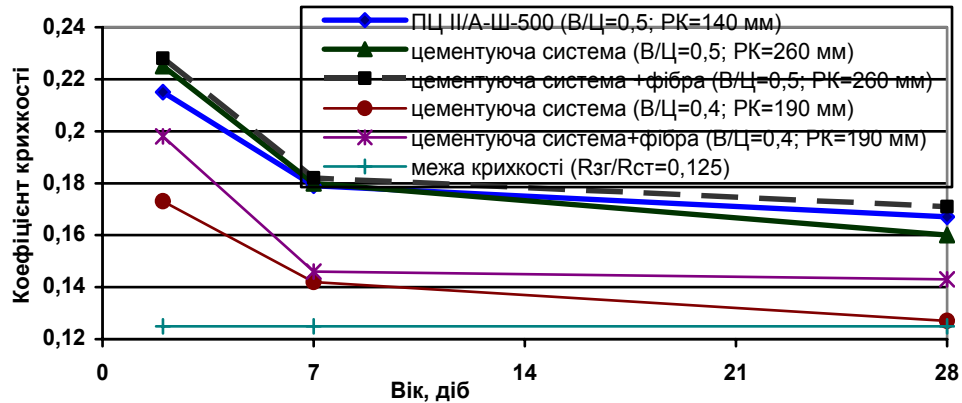


Рис. 4. Зміна коефіцієнта крихкості цементуючих систем при випробуванні згідно з ДСТУ EN 196-1:2007

Для проектування складів самоущільнювального бетону на основі дисперсно-армованих цементуючих систем використано метод ортогонально-центрального композиційного планування (ОЦКП). Введення волокон в бетонну суміш знижує її рухливість, що вимагає збільшення кількості води чи пластифікатора, а також дрібнодисперсної фази за рахунок введення мінерального наповнювача, при оптимальній кількості якого досягається максимально щільне упакування частинок. Збільшення вмісту мінеральної добавки вище оптимальної кількості призводить до розбавлення цементної системи, руйнування безпосередніх контактів між зернами клінкеру і зменшення міцності. Тому факторами оптимізації вибрано витрату суперпластифікатора полікарбоксилатного типу ( $X_1=1,0; 2,0; 3,0$  мас.%) та мінеральної добавки на основі метакаоліну ( $X_2=0; 5,0; 10$  мас.%) за стабілізованих значень витрати регулятора в'язкості (0,1 мас.%) та ступеня армування базальтовим волокном 0,5 мас.%, що є найбільш раціональним при крупності заповнювача до 5-10 мм. При цьому використано дрібний заповнювач як суміш Жовківського піску та щебвдсіву у співвідношенні 4:1 за масою, оптимізований за показником насипної густини і пустотності.

Ударну міцність цементуючих матриць самоущільнювальних бетонів оцінювали за величиною роботи, що затрачається на руйнування зразка під дією ударних навантажень, віднесеної до його площі. Як видно з рис. 5, ударна міцність пластифікованої матриці на основі ПЦ II/A-III-500 (В/Ц=0,28) через 7 діб становить  $0,97$  кДж/м<sup>2</sup>, а через 28 діб –  $1,13$  кДж/м<sup>2</sup>. 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.

Згідно даних рентгенофазового та термічного аналізів, основними гідратними фазами дисперсно-армованої цементуючої матриці є гідроксид кальцію, еtringіт та гідросилікати кальцію (рис. 6, а, б). Комплексна органо-мінеральна добавка сприяє

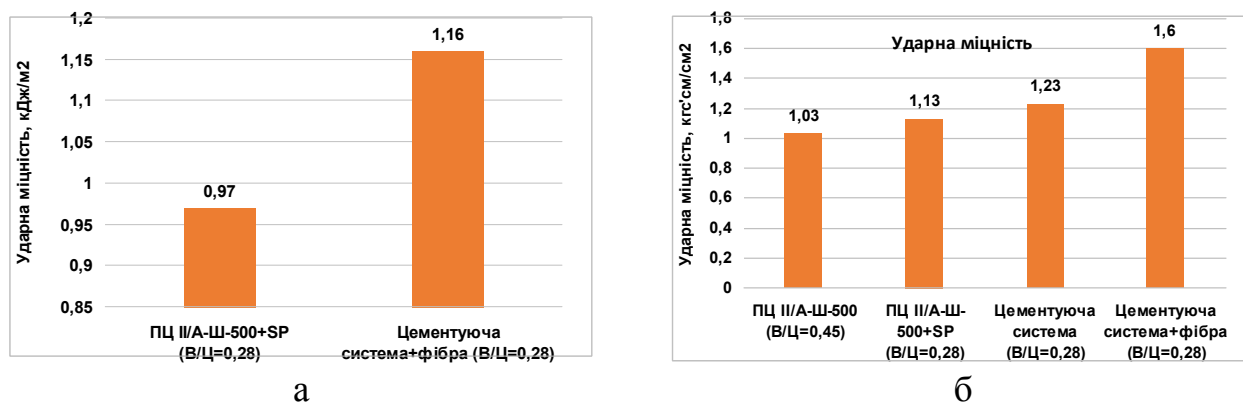


Рис. 5. Ударна міцність цементуючих матриць самоущільнювального бетону через 7 (а) та 28 (б) діб

зниженню в цементній матриці кількості та розмірів закристалізованих гідратних новоутворень (гідроксиду кальцію) при одночасному збільшенні волокнистих низькоосновних гідросилікатів та гідросульфоалюмінатів кальцію. Аналіз формування мікроструктури свідчить, що використання самоармованих цементуючих систем забезпечує прискорення гідратаційних процесів, ущільнення неклінкерної частини цементної матриці за рахунок голчастих кристалів еtringіту і кольматації пор гексагональними кристалами портландиту, гідроалюмінатів та гідрокарбоалюмінатів кальцію. Це зумовлює перерозподіл пористості, підвищення зчеплення фібри з цементною матрицею та зростання її міцності і тріщиностійкості. При цьому підтверджена відсутність хімічної деградації базальтових волокон в середовищі самоармованої цементуючої системи внаслідок зниження вмісту  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (рис. 6, в).

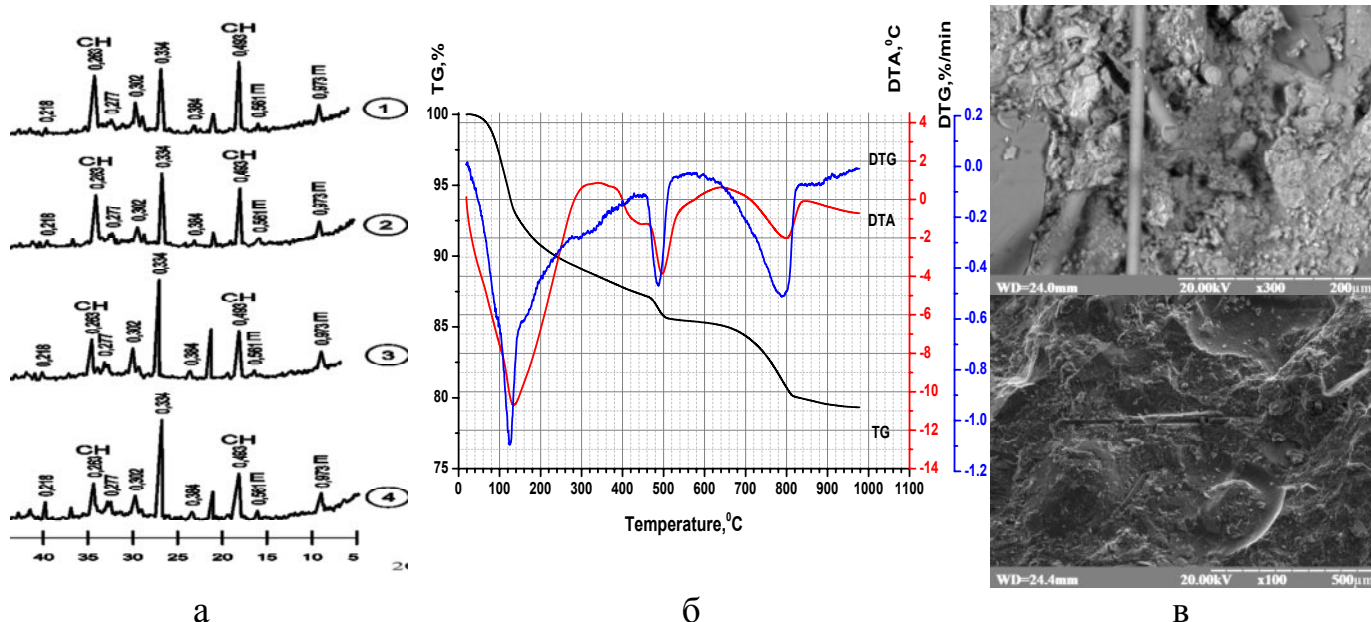


Рис. 6. Фазовий склад (а), дериватограма (б) та мікроструктура (в) цементуючої матриці через 28 діб гідратації в нормальних умовах на основі:  
1 – портландцементу ПЦ I-500; 2 – ПЦ I-500+ПК; 3 – самоармованої цементуючої системи; 4 – цементуючої системи з базальтовою фіброю



Використання цементуючих систем, армованих базальтовою фіброю та модифікованих мінеральними добавками, забезпечує одержання високорухливих сумішей, що характеризуються розпливом конуса 780 мм (клас SF3), умовною в'язкістю  $t_{500}=5$  с (клас за умовною в'язкістю VS2/VF2), низьким повітрязахопленням  $V_n=0,35\%$  (табл. 1). Багаторівневе армування цементуючих систем за рахунок явища „самоармування” на субмікромасштабному рівні структури та армування базальтовим волокном на рівні мезоструктури дозволяє одержати високоміцні самоущільнювальні бетони, що характеризуються підвищеною щільністю (водопоглинання  $W_m=1,9\%$ ). Міцність дисперсно-армованих самоущільнювальних бетонів через 2 та 28 діб становить 57,1 і 104,5 МПа відповідно, що відповідає класу C90/105. При армуванні базальтовою фіброю коефіцієнт конструктивної якості (ККЯ) самоущільнювальних бетонів зростає від 41,9 до 43,4 МПа порівняно з неармованим бетоном.

Таблиця 1

## Будівельно-технічні властивості самоущільнювальних бетонів

Найменування показника	Одиниці вимірювання	Значення показника для бетонів	
		самоущільнювального	армованого фіброю
Діаметр розпливання конуса бетонної суміші	мм	$\geq 760$	$\geq 760$
Марка за консистенцією бетонної суміші / клас розпливу самоущільнювального бетону		F6 / SF3	F6 / SF3
Об'єм втягнутого повітря в бетонній суміші, $V_n$	%	0,7	0,35
Водо- / розчиновідділення, $P_v / P_p$	%	0,02/0,90	0,02/0,90
Середня густина бетону, $\rho$	кг/м <sup>3</sup>	2400	2420
Пористість, $P$	%	13,9	7,6
Міцність на стиск, $f_{cm28}$	МПа	100	105
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, $\nu$		0,19	0,17
Усадка бетону, $\epsilon_y$	мм/м	0,32	0,12
Водопоглинання за масою, $W_m$	%	2,2	1,9
Марка за водонепроникністю		W 20	W 20
Марка за морозостійкістю		F 300	F 400
Корозійна стійкість, $KC_6$		0,9	1,1
Коефіцієнт конструктивної якості (ККЯ)	МПа	41,7	43,4

Для фіброармованих самоущільнювальних бетонів в межах вимірюваних деформацій практично відсутнє збільшення відносних поздовжніх та поперечних деформацій швидконапливаючої повзучості, що характерне для високоміцних бетонів. 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 самоущільнювального бетону становить 71,7 МПа, тоді як самоущільнювальних бетонів, армованих базальтовою фіброю – 96,2 МПа. Застосування самоущільнювального дисперсно-армованого бетону з протиморозною добавкою в діапазоні знакозмінних температур (-20...+9°C) забезпечує одержання 75-80% марочної міцності, що дозволяє споруджувати монолітні конструкції взимку безпрогрівним методом.

**Четвертий розділ** присвячено розробленню високонаповнених золю-винесення самоущільнювальних бетонів, проектуванню їх складів та вивченню будівельно-технічних властивостей.

Дослідження впливу золи-винесення проводили на самоущільнювальних бетонах, склад яких представлено масовим співвідношенням компонентів 1:1,1:2,2, В/В=0,32; загальна витрата в'язучої речовини на 1 м<sup>3</sup> бетону складала 520 кг. При цьому вміст золи-винесення у складі в'язучого приймали 55, 70 та 85 мас.%. Проведеними дослідженнями реологічних властивостей бетонних сумішей встановлено, що вони характеризуються діаметром розпливу конуса РК=660–750 мм та умовною в'язкістю  $t_{500}=5-6,5$  с, що відповідає вимогам до самоущільнювальних бетонів і дозволяє віднести такі суміші до класу за умовною в'язкістю VS2 ( $t_{500} \geq 2$  с). Результати визначення здатності до самоущільнення за J-кільцевим методом показали задовільну можливість бетонних сумішей долати перешкоди у вигляді близько встановлених арматурних стержнів без блокування.

Ефективність проектування показників якості конструкційних матеріалів досягається за рахунок застосування математичних моделей, які враховують і описують реологію бетонних сумішей, оптимальний розподіл заповнювачів у структурі матеріалу, а також апроксимаційних статистичних залежностей, що оцінюють вплив мікронаповнювачів на експлуатаційні характеристики споруд. Для проектування складу самоущільнювального бетону, армованого базальтовою фіброю, виконано експериментально-статистичне моделювання з вирішенням багатопараметричних задач оптимізації з позиції адекватності властивостей критеріям функціональності. Факторами оптимізації вибрана кількість золи-винесення ( $X_1 = 55; 70; 85$  мас.%) та фібри базальтової ( $X_2 = 0; 0,5; 1,0$  мас.%) за стабілізованих значень витрати суперпластифікатора ПК (1,3 мас.%), регулятора в'язкості (0,2 мас.%) (рис. 7). Екстремуми значень міцності на стиск у всі терміни тверднення одержані при ступені армування базальтовою фіброю 0,5 мас.%. Заміна портландцементу золю-винесення на рівні 55 мас.% забезпечує одержання дисперсно-армованих самоущільнювальних бетонів класу В 25-В30.

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-винесення 55, 70 та 85 мас.% без фібри та з базальтовою фіброю через 90 діб тверднення в нормальних умовах до рівня навантаження  $\sim 0,6 R_p$  ( $R_p$  – руйнівне навантаження). Встановлено, що призмova міцність самоущільнювальних бетонів через 90 діб досягає 80-90% кубикової. Визначення

модуля пружності та коефіцієнта Пуассона бетонів проведено при рівні навантаження 30% від руйнівного ( $\sigma=0,3P_p/S$ ).

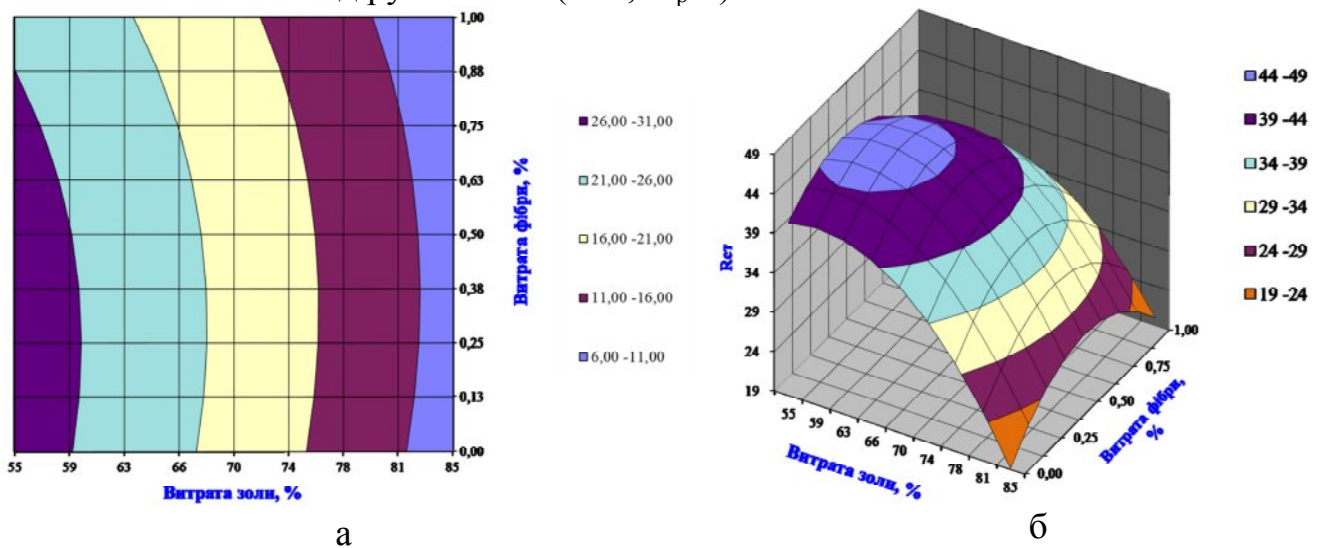


Рис. 7. Ізолінії зміни міцності на стиск через 7 діб (а) та ізопараметрична поверхня зміни міцності через 28 діб (б) високонаповнених самоущільнювальних бетонів

На рис. 8 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. Дослідженнями впливу базальтової фібри на властивості самоущільнювальних бетонів з високим вмістом золи-винесення встановлено, що дисперсне армування забезпечує зростання напруження  $\sigma$  при сталому значенні відносних деформацій  $\varepsilon$ . Так, при заміні 55 мас.% цементу золою-винесення та введенні 0,5 мас.% базальтової фібри при значенні відносних деформацій  $\varepsilon=(10-50)\times 10^{-5}$  забезпечується збільшення напружень  $\sigma$  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 мас.% базальтової фібри збільшення напружень на 4,5-13,1% становить при значенні відносних деформацій  $\varepsilon=(10-35)\times 10^{-5}$ .

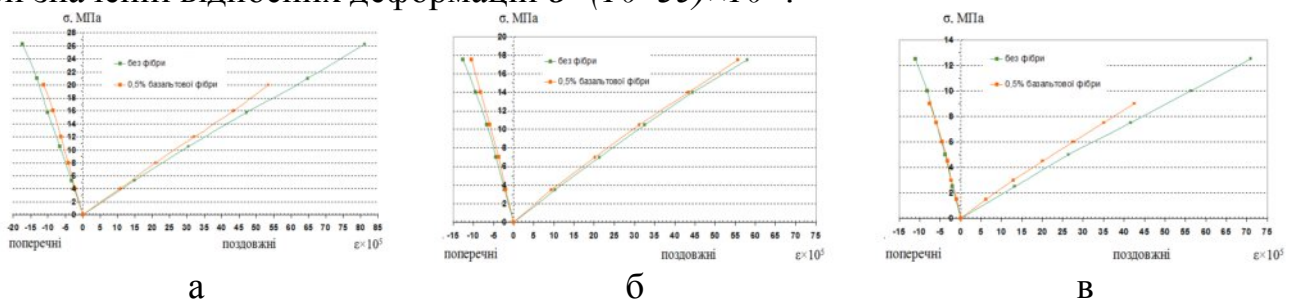


Рис. 8. Діаграма залежності деформацій самоущільнювальних бетонів з вмістом золи-винесення 55 мас.% (а); 70 мас.% (б); 85 мас.% (в) від прикладеного навантаження



На графіках можна виділити прямолінійні ділянки, що свідчить про роботу бетону в пружній стадії при цьому базальтова фібра забезпечує зростання внутрішніх напружень при сталих відносних деформаціях самоущільнювальних бетонів з високим вмістом золи-винесення.

Експериментальні дані випробувань на стираність свідчать про вищу стійкість самоущільнювального бетону, армованого базальтовою фіброю. Стираність самоущільнювального бетону з базальтовою фіброю зменшується на 14,3% при вмісті 85 мас.% золи-винесення у складі в'язучого порівняно із бетоном без фібри. При цьому заміна 70 мас.% цементу золю-винесення дозволяє зменшити стираність при введенні 1 мас.% базальтової фібри на 25,7%. Для бетонів з вмістом 55 мас.% золи-винесення стираність складає  $0,35 \text{ г/см}^2$ , введення 0,5 мас.% базальтової фібри забезпечує зменшення стираності до  $0,31 \text{ г/см}^2$  ( $\Delta=11,4\%$ ); при введенні 1 мас.% базальтової фібри стираність зменшується до  $0,23 \text{ г/см}^2$  ( $\Delta=34,3\%$ ).

Дисперсне армування базальтовою фіброю сприяє також зростанню міцності на згин самоущільнювальних бетонів з високим вмістом золи-винесення. Так, при вмісті у в'язучому 85 мас.% золи-винесення міцність на згин складає 4,8 МПа. При введенні до бетону 0,5 і 1,0 мас.% фібри міцність на згин зростає відповідно на 39,6 та 60,4% порівняно з неармованим бетоном. При введенні 0,5 і 1,0 мас.% фібри до бетону з заміною 70% золи-винесення міцність на згин зростає на 34,6 та 80,8% відповідно. Для самоущільнювальних бетонів з вмістом 55 мас.% золи-винесення та 0,5 мас.% базальтової фібри міцність на згин складає 9,9 МПа, що на 23,6% вище, ніж міцність бетону без фібри.

**У п'ятому розділі** представлено результати промислового впровадження самоущільнювального дисперсно-армованого бетону.

На ТзОВ "Спільне українсько-польське підприємство РАВТРАНС" проведена промислова апробація самоущільнювальних бетонів, армованих базальтовою фіброю. При цьому було вирішено завдання забезпечення однорідності суміші, необхідної міцності та стираності бетону. Проведено випробування самоущільнювальних дисперсно-армованих бетонних сумішей з підвищеним вмістом золи-винесення та бетонів на їх основі з проектною міцністю на стиск 70 МПа (клас бетону С50/60) для бетонування промислової підлоги на ТзОВ "Блюм Україна" (с. Пасіки Зубрицькі, Львівська обл.). Ефективність від впровадження розроблених самоущільнювальних дисперсно-армованих бетонів на ТзОВ "Блюм Україна" з врахуванням зниження трудомісткості, зменшення затрат на вкладання та обробки поверхні промислової підлоги складає 365,68 грн. на  $1 \text{ м}^3$  бетону, що при об'ємі виготовлення  $200 \text{ м}^3$  забезпечує економічний ефект 73,135 тис. грн.

## ВИСНОВКИ

У результаті виконання дисертаційної роботи вирішено науково-прикладну проблему розроблення самоущільнювальних бетонів, армованих базальтовою фіброю, з покращеними будівельно-технічними властивостями. Внаслідок проведених теоретичних та експериментальних досліджень сформульовано наступне:

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 полікарбосилатного 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 обмеженим 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 полікарбосилатного типу – базальтове волокно” характеризується розпливом стандартного конуса  $R_{K \geq 180}$  мм (пластифікуючий ефект  $\Delta R_K = 78,6\%$ ), що дозволяє віднести її до суперпластифікованих (технологічний ефект), з високою ранньою ( $R_{ct}^2/R_{ct}^{28} = 0,69$ ) і стандартною ( $R_{ct}^{28} = 75$  МПа) міцністю (ДСТУ EN 196-1:2007). За рахунок суттєвого водоредукуючого ефекту ( $\Delta V/C = 20,1\%$ ) 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/м<sup>2</sup>, а через 28 діб –  $1,13$  кДж/м<sup>2</sup>. 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 (КС<sub>6</sub>=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  $\sigma$  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  $\varepsilon=(10...50)\times 10^{-5}$  забезпечується збільшення напружень  $\sigma$  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 стиратності 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 м<sup>3</sup> бетону, що при об'ємі виготовлення 200 м<sup>3</sup> забезпечує економічний ефект 73,135 тис. грн.

### **ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ ДИСЕРТАЦІЇ ВИКЛАДЕНО У ПРАЦЯХ:**

1. 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.

2. 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 (ISSN 2224-0187).
3. 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”, 2012. – № 737. – С. 153-158.
4. 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, 2013. – № 52. – С. 237-242.
5. 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.
6. Високоміцні самоущільнювальні бетони на основі дисперсно-армованих цементуючих систем / М.А. Саницький, У.Д. Марущак, І.І. Кіракевич, М.С. Стечишин // Будівельні матеріали і вироби, 2015. – № 1. – С. 6-9.
7. 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
8. Stechyshyn M. Evaluation of Basalt Fiber for Strength Self-Compacting Concrete / M. Stechyshyn // V International Academic Conference of Young Scientists "Geodesy, Architecture and Construction 2013" (GAC-2013). – Lviv, 2013. – P. 104-105.
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. – Івано-Франківськ, 2014. – С. 47.

#### **АНОТАЦІЯ**

**Стечишин М.С. Самоущільнювальні бетони, армовані дисперсними волокнами. – На правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.05 – будівельні матеріали та вироби. Національний університет “Львівська політехніка” Міністерства освіти і науки України, Львів, 2016.

Дисертаційна робота присвячена питанням розроблення теоретичних основ одержання самоущільнювальних дисперсно-армованих бетонів за рахунок системного поєднання додаткових цементуючих матеріалів, комплексних хімічних добавок поліфункціональної дії, базальтової фібри Встановлено фізико-хімічні особливості процесів гідратації і тверднення фіброармованих цементуючих систем, які завдяки направленому формуванню структури дозволяють вирішувати проблему одержання самоущільнювальних дисперсно-армованих бетонів з покращеними будівельно-технічними властивостями. Проведено оптимізацію складів самоущільнювальних дисперсно-армованих бетонів, досліджено їх показники якості та встановлено ефективність використання в різних температурних умовах.

Здійснено промислову апробацію розроблених самоущільнювальних дисперсно-армованих бетонів при безвібраційній технології бетонування.

**Ключові слова:** самоущільнювальний бетон, базальтова фібра, оптимізація складу, будівельно-технічні властивості, багаторівневе армування.

## АННОТАЦІЯ

**Стечишин М.С. Самоуплотняющиеся бетоны, армированные дисперсными волокнами. – На правах рукописи.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.05 – строительные материалы и изделия. Национальный университет “Львовская политехника” Министерства образования и науки Украины, Львов, 2016.

Диссертация посвящена вопросам разработки теоретических основ получения самоуплотняющихся дисперсно-армированных бетонов путем многоуровневого модифицирования его структуры – на микроуровне (уровень цементной матрицы) комплексными химическими добавками полифункционального действия и реакционно-активных дополнительных цементирующих материалов, а на макроуровне (уровень цементного бетона) армирующими волокнистыми элементами, в качестве которых использована базальтовая фибра.

В первом разделе проведен аналитический обзор литературных источников, посвященных проблемам получения самоуплотняющихся бетонов с улучшенными эксплуатационными характеристиками, рассмотрены вопросы, связанные с изучением способов повышения трещиностойкости и долговечности бетонных конструкций.

Во втором разделе приведены характеристики исходных материалов, описаны основные методики исследований, использованные в работе.

В третьем разделе приведены результаты разработки высокопрочных самоуплотняющихся бетонов, армированных базальтовой фиброй, и исследование их строительно-технических свойств. Установлены физико-химические особенности процессов структурообразования фиброармированных цементирующих систем, которые заключаются в образовании дополнительного количества гидроалюминатных, субмикроармирующих гидросиликатных и гидросульфалюминатных фаз на ранних стадиях гидратации путем реализации на микроуровне явления «самоармирования». Разработаны и оптимизированы составы высокопрочных самоуплотняющихся дисперсно-армированных бетонов с улучшенными эксплуатационными свойствами, а также установлена эффективность их использования в различных температурных условиях. Исследованиями реологических свойств дисперсно-армированных бетонных смесей получены характеристики, удовлетворяющие требованиям к самоуплотняющимся: класс расплыва SF3 (диаметр расплыва 780 мм), класс вязкости VS2. Сочетание высокоплотной и высокопрочной цементной матрицы, модифицированной комплексными органо-минеральными добавками с армирующими элементами, позволяет значительно повысить прочность на сжатие и растяжение при изгибе,

стойкость к воздействию динамических нагрузок, долговечность. Высокопрочные (класс В80) самоуплотняющиеся бетоны, армированные базальтовой фиброй, характеризуются быстрым нарастанием прочности в нормальных условиях твердения ( $f_{cm2}/f_{cm28}=0,55$ ), массовым водопоглощением 1,9%, повышенной водонепроницаемостью (W20), морозостойкостью (F400). Модуль упругости самоуплотняющегося бетона возрастает от 51,6 до 63,9 ГПа, коэффициент Пуассона снижается от 0,19 до 0,17.

Четвертый раздел посвящен разработке высоконаполненных золой уноса самоуплотняющихся бетонов, проектированию их составов и изучению строительно-технических свойств. Показана возможность замены 55% портландцемента золой уноса без ухудшения эксплуатационных свойств дисперсно-армированных самоуплотняющихся бетонов. Прочность на изгиб самоуплотняющихся бетонов с содержанием 55 мас.% золы уноса и армированных 0,5 мас.% базальтовой фибры, составляет 9,9 МПа, что на 23,6% выше, чем бетона без фибры.

В пятом разделе приведены результаты промышленной апробации разработанных самоуплотняющихся дисперсно-армированных бетонов при безвибрационной технологии бетонирования промышленных полов ООО "Совместное украинского-польское предприятие РАВТРАНС" и ООО "Блюм Украина", показана экономическая эффективность их применения.

**Ключевые слова:** самоуплотняющийся бетон, базальтовая фибра, оптимизация состава, строительно-технические свойства, многоуровневое армирование.

## SUMMARY

**Stechyshyn M.S. Self-compacting fiber-reinforced concretes. – On rights for a manuscript.**

Thesis for candidate degree of engineering science in speciality 05.23.05 – building materials and products. Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2016.

The thesis is devoted to the development of theoretical bases of self-compacting fiber-reinforced concretes obtaining by means of systemic combination of supplementary cementitious materials and complex chemical admixture of polyfunctional action. The physical and chemical peculiarities of hydration and hardening processes of fiber-reinforced cementitious systems were established. The problem of self-compacting fiber-reinforced concrete obtaining with improved constructional technical properties by the direct structure formation was solved. The optimization of self-compacting fiber-reinforced concrete composition was carried out. Their quality parameters were tested and using efficiency in different temperature conditions was shown. The industrial approbation of self-compacting fiber-reinforced concrete with using non-vibration technology was carried out.

**Key words:** self-compacting concrete, basalt fiber, optimization of composition, building and technical properties, multilevel reinforcing.