

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ОДЕСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ БУДІВНИЦТВА ТА АРХІТЕКТУРИ

**Довгань Петро Михайлович**



УДК 691:519.24

**ДИСПЕРСНО-АРМОВАНІ ДЕКОРАТИВНІ БЕТОНИ  
ДЛЯ АРХІТЕКТУРНИХ ЕЛЕМЕНТІВ**

05.23.05 – будівельні матеріали та вироби

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Одеса – 2020

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Одеській державній академії будівництва та архітектури Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**Вознесенський Віталій Анатолійович**,  
Одеська державна академія будівництва  
та архітектури, професор кафедри процесів та  
апаратів в технології будівельних матеріалів

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Нетеса Микола Іванович**,  
Дніпропетровський національний університет  
залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна,  
завідувач кафедри будівельного виробництва  
та геодезії;

кандидат технічних наук,  
**Єлькін Олександр Вікторович**,  
керівник департаменту науково-технічного  
розвитку КП «БУДОВА»

Захист відбудеться «09» лютого 2021 р. о 11<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.085.01 в Одеській державній академії будівництва та архітектури за адресою: 65029, м. Одеса, вул. Дідріхсона, 4.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Одеської державної академії будівництва та архітектури за адресою: 65029, м. Одеса, вул. Дідріхсона, 4.

Автореферат розісланий «29» грудня 2020 р.

Вчений секретар спеціалізованої  
вченої ради, д.т.н., доцент



Кровяков С.О.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Обґрунтування вибору теми дослідження.** В останні десятиліття декоративні вироби з різних будівельних матеріалів стають невід'ємною складовою для архітектурного оформлення конструктивних елементів будівель і споруд, облаштування садово-паркових чи присадибних територій. Важливу роль в будівельній галузі відіграє, зокрема, й декоративний дрібно- і тонкозернистий бетон на основі цементного в'язучого. При проведенні оздоблювальних робіт в наш час простежується чітка тенденція до зростання потреби в архітектурних елементах виготовлених з декоративного бетону під природний камінь різного походження. Опублікований компанією *Value Market Research* у грудні 2019 р. звіт про дослідження світового ринку декоративного бетону демонструє, що середньорічний темп росту попиту на нього в період з 2020 по 2026 р.р. значно зросте. Це обумовлено тим, що на його основі можна виготовляти архітектурні вироби (конструкції) не тільки плоскої, але й різноманітної вигнутої форми, з плавним сполученням поверхонь, необхідного кольору і високоякісної фактури лицьової поверхні. Використання яких дозволяє створювати нові архітектурні контексти в будівлях і спорудах, забезпечуючи тим самим їм високу художньо-естетичну виразність. Цінною особливістю декоративного дрібнозернистого бетону є також висока технологічність – можливість формування і оздоблення архітектурних елементів різними методами.

Основною задачею при проектуванні складів декоративного дрібнозернистого бетону є зниження водопоглинання й пористості, підвищення міцності, тріщино- морозо- і карбонізаційної стійкості, оскільки, кліматичні умови експлуатації архітектурних елементів надзвичайно різноманітні. Елементи декору будівель і споруд експлуатуються під впливом добових і сезонних циклів якісних і кількісних параметрів природних факторів навколишнього середовища, які поступово призводять до погіршення їх декоративно-експлуатаційних характеристик. Тому, для покращення фізико-механічних і підвищення довговічності архітектурним елементам доцільно до складу декоративних бетонів вводити компоненти, що модифікують і армують цементно-піщану систему. Перспективним, актуальним та своєчасним представляється використання високодисперсних органо-мінеральних добавок-наповнювачів і певних технологічних прийомів при виготовленні декоративного бетону.

**Зв'язок роботи з науковими програмами.** Робота підготовлена на кафедрі процесів та апаратів в технології будівельних матеріалів Одеської державної академії будівництва та архітектури в рамках держбюджетних тем «Наукові та практичні основи формування структури і властивостей декоративних бетонів різного призначення» (№ держреєстрації 0119U002432), «Комп'ютерне моделювання та оптимізація технологічних процесів, складу, структури та властивостей багатокомпонентних будівельних композитів (№ держреєстрації 0111U001248).

**Метою роботи** є підвищення фізико-механічних та експлуатаційних властивостей архітектурних елементів за рахунок використання декоративних дрібнозернистих бетонів, спрямовано модифікованих дисперсною гібридною

арматурою, добавками полікарбоксилату та цеоліту при раціональній гранулометрії та кольоровій гамі дрібних заповнювачів.

Для досягнення мети необхідно вирішити наступні **задачі дослідження**:

- теоретично обґрунтувати вибір сировинних матеріалів для виготовлення декоративних дрібнозернистих бетонів;
- розробити блок-схему досліджень, яка забезпечує отримання достовірних оцінок функціональних показників композитів і дозволяє при спільній реалізації натурних і обчислювальних експериментів визначити раціональні склади декоративного бетону;
- проаналізувати вплив двох груп рецептурних факторів, *«Модифікації цементно-піщаної матриці»* і *«Параметрів дисперсного армування»*, на структурну міцність декоративних композитів, вивчити кінетику тверднення матеріалу виробів;
- дослідити основні експлуатаційні характеристики дисперсно-армованого декоративного бетону, від яких залежить довговічність та естетична виразність поверхні архітектурних елементів;
- за допомогою комплексу структурованих експериментально-статистичних моделей визначити оптимальні співвідношення між факторами складу при забезпеченні нормованих рівнів характеристик матеріалу та провести дослідно-промислову перевірку раціональних складів дисперсно-армованого декоративного бетону призначеного для виготовлення архітектурних елементів.

**Об'єкт досліджень** – дисперсно-армований декоративний бетон для виготовлення архітектурних елементів.

**Предмет досліджень** – спільний вплив двох груп факторів складу (*«Модифікатори цементно-піщаної матриці»* і *«Параметри дисперсного армування»*) на технологічні, фізико-механічні та експлуатаційні характеристики дрібнозернистого бетону, призначеного для виготовлення широкого спектру архітектурних елементів.

**Методи досліджень** – оптимальне планування багатофакторного експерименту; експериментальне визначення технологічних характеристик сумішей і декоративно-експлуатаційних показників бетону; нелінійні експериментально-статистичні (ЕС) моделі та елементи методології рецептурно-технологічних полів, зокрема, обчислювальні експерименти з комплексним використанням ЕС-моделей і методу Монте-Карло (для випадкового сканування рецептурних полів при визначенні раціональних складів композиту).

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає в наступному:

- теоретично обґрунтовано та експериментально доведено можливість отримання високоякісних декоративних бетонів на місцевих кварцових не фракціонованих пісках шляхом модифікації цементно-піщаної системи високодисперсними органо-мінеральними добавками та використання певних технологічних прийомів при виробництві;
- встановлено закономірності індивідуального та спільного впливу тонкодисперсного цеоліту і дискретних гібридних скловолокон на технологічні, фізико-механічні та експлуатаційні властивості декоративних дрібнозернистих бетонів, виготовлених на кварцових пісках природньої гранулометрії;

– на основі натурних і обчислювальних експериментів встановлено, що використання цеоліту взамін частини в'язучого, скловолокон і заповнювачів оптимального гранулометричного складу в комплексі з гіперпластифікатором сприяє зменшенню інтегральної пористості та забезпечує, під час експлуатації композиту, збереження його міцності, і відповідно, стійкості до кліматичних впливів при збереженні декоративних властивостей;

– з використанням методів комп'ютерного матеріалознавства визначено раціональні склади модифікованих та дисперсно-армованих дрібнозернистих композитів, призначених для виготовлення архітектурних елементів широкої номенклатури.

**Практичне значення отриманих результатів.** За результатами виконаних в дисертації натурних та обчислювальних експериментів розроблено, на основі місцевих пісків природної гранулометрії та використання високодисперсних органо-мінеральних добавок, склади штучного дисперсно-армованого декоративного каменю. Раціональні склади декоративного каменю з пониженою витратою цементного в'язучого та високими показниками технологічності, ранньої й нормативної міцності, карбонізаційної стійкості, морозостійкості та низькими значеннями водопоглинання й пористості використано при виготовленні архітектурних елементів (об'ємом більше 10 м<sup>3</sup>), які пройшли дослідно-промислову перевірку при оздобленні фасадів житлових будівель і споруд в м. Одесі.

Результати роботи впроваджені в навчальний процес в Одеській державній академії будівництва та архітектури за освітньою програмою «Технології будівельних конструкцій, виробів і матеріалів» при підготовці здобувачів вищої освіти за першим (бакалаврським) і другим (магістерським) рівнями.

**Особистий внесок здобувача** полягає у проведенні досліджень і статистичній обробці експериментальних даних декоративних дрібнозернистих бетонів, їх аналізі, формулюванні висновків, розробці рекомендацій і впровадженні результатів роботи у виробництво.

Особистий внесок автора в роботах, що надруковані в співавторстві, полягає в наступному:

- проведення пошукових експериментів з дослідження впливу факторів складу на властивості гібридно-армованого цементного композиту [1, 2, 9];
- аналітичний огляд та аналіз апріорної інформації при плануванні багатфакторного експерименту [10, 11, 13];
- отримання експериментальних даних про технологічні характеристики цементних композицій [3, 4, 12, 16];
- дослідження і статистична обробка фізико-механічних показників декоративних бетонів [5-7, 15, 17, 19-22];
- побудова і аналіз експериментально-статистичних моделей, що описують вплив двох груп рецептурних факторів «Модифікації цементно-піщаної матриці» і «Параметрів дисперсного армування» на характеристики декоративних композитів [5, 8, 14, 15, 18].

**Апробація дисертаційної роботи.** Основні положення і результати досліджень, виконаних в дисертаційній роботі, були представлені на наступних

міжнародних, всеукраїнських і регіональних конференціях та семінарах: міжнародних науково-технічних семінарах «Моделювання та оптимізація будівельних композитів» (м. Одеса, 2017-2019 роки), науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку будівельного комплексу м. Одеси» (м. Одеса, 2018 р.), міжнародних конференціях «Структуроутворення, міцність і руйнування композиційних будівельних матеріалів і конструкцій» (м. Одеса, 2018 і 2019 роки), міжнародній конференції «Експлуатація та реконструкція будівель і споруд» (м. Одеса, 2019 р.), міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті» (м. Харків, 2019 р.), конференціях професорсько-викладацького складу Одеської державної академії будівництва та архітектури (м. Одеса, 2018-2020 роки), міжнародному симпозіуму Brittle Matrix Composites BMC-12 (Польща, м. Варшава, 2019 р.), міжнародній науково-технічній конференції «Ресурсо-економні матеріали, конструкції, будівлі та споруди» (м. Рівне, 2020 р.).

**Публікації.** Основні положення дисертації викладені в 22 наукових працях, з яких 7 статей у фахових виданнях України (3 індексуються наукометричною базою *Index Copernicus*), 1 стаття у науковому періодичному виданні іншої держави (індексується наукометричними базами *Scopus i Web of Science*), 1 патент України на корисну модель, 13 тез доповідей у збірниках наукових конференцій і семінарів (1 індексується наукометричною базою *Scopus*).

**Структура і об'єм дисертації.** Дисертацію викладено на 196 сторінках, зокрема, 136 сторінок основної частини, складається із вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел (193 найменування) та додатків на 7 сторінках, містить 40 рисунків і 14 таблиць.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано вибір теми дослідження, показаний зв'язок роботи з науковими темами, сформульована мета і задачі досліджень, наведені наукова новизна та практичне значення отриманих результатів, особистий внесок здобувача, а також результати апробації та дані про публікації.

У **першому розділі** проведено короткий огляд використання декоративних матеріалів і виробів для оздоблення конструктивних елементів будівель і споруд, проаналізовано умови експлуатації виробів, характер впливу складу і технології на формування властивостей декоративних бетонів та основні способи отримання елементів декору з необхідними властивостями і архітектурною виразністю.

Для забезпечення архітектурно-художньої виразності будівель та споруд перманентно актуальним є застосування декоративних виробів та матеріалів. В наш час існує досить широка гама природних та штучних матеріалів, які використовуються в системі прикрас фасадів та інтер'єрів будівель та окремих виробів. З урахуванням економічних факторів, технологічності при забезпеченні нормованої довговічності під час експлуатації, до перспективних слід віднести декоративні вироби та матеріали на основі мінеральних в'язучих з використанням місцевих заповнювачів.

Елементи декору будівель та споруд під час функціонування зазнають дії всіх наявних погодних факторів (багаторазові зміни температури, вологості, складу атмосфери тощо). Дію погоди слід враховувати при проектуванні самих декоративних елементів та при встановленні місця їх розташування. Особливу увагу слід приділяти розробці вихідних складів композитів та технологічних режимів виготовлення елементів декору. Це пов'язане з тим, що окрім отримання та збереження певних фізико-механічних властивостей, необхідно забезпечити незмінність художньої та естетичної виразності декоративних матеріалів та виробів на весь період їх експлуатації в тих чи інших будівельних об'єктах.

Огляд науково-технічної літератури, досліді вітчизняних і зарубіжних вчених та інженерів показали, що структуроутворення декоративних поліструктурних матеріалів, як і інших будівельних матеріалів на неорганічних в'язучих, відбувається в результаті сукупних хімічних, фізико-хімічних, фізичних та механічних явищ та процесів, які відбуваються при гідратації мінеральних в'язучих. Відмінність вимог, як показує проведений огляд полягає в тому, що складна форма виробів не виключає виникнення та розвиток різнонаправлених вологісних та термічних деформацій, що може привести до небажаних наслідків. Тому доречним та необхідним слід вважати використання дискретного армування. Крім того, для забезпечення рухливості сумішей без прояву розшарування та седиментації, необхідно застосовувати сучасні домішки комплексної дії, підбір складу яких є нагальною задачею. Використання раціонально підібраних складових матеріалу дасть змогу отримувати декоративні елементи складної форми, що забезпечить їм художньо-декоративну привабливість при нормованих фізико-механічних властивостях. Зокрема варто зазначити, що кінцеві властивості та естетично-художня виразність декоративних виробів в значній мірі залежать і від технологічних умов отримання композицій, їх укладання, ущільнення в формах та режимів подальшого тверднення. Зовнішній вигляд декоративних елементів напряду залежить від якості внутрішньої поверхні форм, матеріалу, з якого вони виготовлені, використання мастил. Таким чином, сукупність рецептурних і технологічних факторів дасть змогу отримувати декоративні матеріали та вироби, що дасть змогу вирішувати важливі та чутливі соціально-виховні задачі за рахунок неповторного різноманіття навколишнього середовища.

Опираючись на висновки аналітичного огляду всієї доступної інформації були висунуті наступні припущення, які лягли в основу **робочої гіпотези**: *отримати декоративні елементи з кольоровою гамою, характерною для південного регіону при відповідності до всіх вимог по фізико-механічним властивостям та довговічності можливо за рахунок використання декоративного матеріалу до складу якого повинні входити місцеві дрібні заповнювачі, які відповідають за властивості та колір виробів, гібридна дисперсна арматура для підвищення тріщиностійкості без впливу на зміну кольору, добавки поліфункціональної дії для забезпечення рухливості сумішей, фізико-механічних властивостей та стійкості під дією експлуатаційних навантажень.*

В другому розділі приведені блок-схема досліджень, план експерименту, характеристики вихідних матеріалів і описані методи дослідження технологічних, фізико-механічних та експлуатаційних характеристик декоративних бетонів.

Розроблена блок-схема забезпечує системний підхід до об'єкту дослідження, з урахуванням сформульованої проблеми, накопиченої інформації та аналізу даних про об'єкт, поставленої мети роботи згідно з основними принципами проведення експериментальних досліджень з використанням методології рецептурно-технологічних полів та експериментально-статистичного моделювання (В.А. Вознесенський, Т.В. Ляшенко).

Експеримент проводився по 5-ти факторному плану другого порядку на кубі з 27 числом точками, фактори  $X_i$  нормалізовані до  $|x_i| \leq 1$  за типовими формулами. Планування експерименту мало дві особливості: *по-перше*, шкали факторів  $x_1$ ,  $x_4$  і  $x_5$  орієнтовані таким чином, щоб їх нижній рівень ( $x_{1,4,5} = -1$ ) відповідав еталонним композиціям без високодисперсних наповнювачів ( $X_1 = X_4 = X_5 = 0$ ); *по-друге*, використано ненасичений симетричний план, в якому 10 точок містили одну координату  $x_4$  чи  $x_5$  на еталонному рівні ( $X_4 = 0$  чи  $X_5 = 0$ ). Це дозволяє більш глибоко проаналізувати вплив всіх рецептурних факторів на досліджувані властивості декоративних бетонів.

В залежності від характеру дії на дрібнозернистий композит рецептурні фактори ( $X_1 \div X_5$ ) об'єднано в дві групи: «Модифікатори цементно-піщаної матриці» ( $X_1 \div X_3$ ) і «Параметри дисперсного армування» ( $X_4$  і  $X_5$ ).

В першу групу входили дозування тонкодисперсного цеоліту  $X_1$  (Z), долі дрібнозернистого піску в суміші з крупнозернистим  $X_2$  (SG) піском і суперпластифікуючої добавки на полікарбоксилатній основі  $X_3$  (MF). В другу – кількість високодисперсних скляних волокон різної довжини  $X_4$  (F6) і  $X_5$  (F12).

Склади цементно-піщаних композицій приготувались з різним В/Ц співвідношенням, при якому забезпечувалось виконання вимоги однакової рухомості сумішей – марки S4. Відповідно до чинного ДСТУ Б В.2.7-239:2010, виготовлялися зразки бетону для дослідження фізико-механічних і експлуатаційних характеристик, випробовування яких виконувалося згідно з діючими стандартами в Україні та загальноприйнятими методиками. Додатково визначалися величини коефіцієнту ущільнення суміші  $K_y$ , технологічного впливу  $K_T$ , рівноважного водопоглинання  $W_p$  і коефіцієнту мікропористості  $K_M$ .

Найбільш ефективним засобом для аналізу і оптимізації структури, якості і технологічних параметрів виробництва є експериментально-статистичні моделі, зокрема виду (1), побудова яких виконувалася в програмі COMPEX (розроблена в ОДАБА під керівництвом В.А. Вознесенського).

$$Y_i = b_0 \left[ \begin{array}{l} \pm b_{11}x_1 \pm b_{11}x_1^2 \pm b_{12}x_1x_2 \\ \pm b_{22}x_2 \pm b_{22}x_2^2 \pm b_{13}x_1x_3 \\ \pm b_{33}x_3 \pm b_{33}x_3^2 \pm b_{23}x_2x_3 \end{array} \right] (a) \left[ \begin{array}{l} \pm b_{14}x_1x_4 \pm b_{15}x_1x_5 \\ \pm b_{24}x_2x_4 \pm b_{25}x_2x_5 \\ \pm b_{34}x_3x_4 \pm b_{35}x_3x_5 \end{array} \right] (c) \left[ \begin{array}{l} \pm b_{44}x_4 \pm b_{44}x_4^2 \pm b_{45}x_4x_5 \\ \pm b_{55}x_5 \pm b_{55}x_5^2 \end{array} \right] (b) \quad (1)$$

Нелінійна ЕС-модель (1) структурована по групах факторів. Блок (a) описує вплив на аналізовану властивість  $Y$  композиту модифікаторів  $x_1$ ,  $x_2$  і  $x_3$ . Блок (b) –

вплив на  $Y$  дисперсних волокон  $x_4$  і  $x_5$ . Блок (с) показує, як будуть трансформуватися локальні поля аналізованої властивості за рахунок взаємозв'язку двох груп факторів складу. З метою виявлення індивідуального чи спільного впливу (в різному співвідношенні) факторів складу на характеристики композиту проводилось ряд обчислювальних експериментів в програмі Microsoft Excel. Для їх реалізації із ЕС-моделі «повного» поля виду (1) отримувались моделі, що дозволяли описувати локальні поля двома і трьома факторами при фіксованих дозуваннях інших факторів на рівнях  $x_i = -1, 0, +1$ . Для порівняння локальних полів властивості між собою використовувалися узагальнюючі показники  $G$ . Базовими показниками  $G$  властивості  $Y$  в межах досліджуваного поля були максимальний  $Y_{\max}$  і мінімальний  $Y_{\min}$  рівні, а також їх координати  $x_{i,\max}$  і  $x_{i,\min}$ . Зміна  $Y$  в межах локального поля оцінювалась її абсолютним  $\Delta\{Y\}$  і відносним  $\delta\{Y\}$  приростами.

До пластифікованого дисперсно-армованого декоративного бетону пред'являлися наступні вимоги:  $\tau\{P_m=35\} \geq 0.95$  год,  $f_{cm,7} \geq 25$  МПа,  $f_{cm,28} \geq 50$  МПа. Критеріями оптимальності визначено:  $f_{ctfm}$  (МПа),  $W_M$  і  $W_o$  (%).

**В третьому розділі** проаналізовано вплив рецептурних факторів на структурну міцність модифікованих декоративних дрібнозернистих композитів.

На першому етапі експериментальних досліджень визначено технологічні властивості рівнорухомих декоративних композицій: В/Ц співвідношення, що змінювалося в інтервалі від 0.36 до 0.55, середню густину  $\rho_c$ , яка складала  $\geq 2010$  кг/м<sup>3</sup> і коефіцієнт ущільнення сумішей  $K_y = 0.89 \div 0.984$ . У зв'язку з тим, що В/Ц і  $K_y$  впливають на об'єм пустот в дрібнозернистому композиті, було розглянуто зв'язок цих показників із середньою густиною композицій. Найбільш тісний кореляційний зв'язок демонструють дані 27-ми складів між  $\rho_c$  і  $K_y$ , коефіцієнт кореляції  $r$  складає 0.73, що дозволяє зробити висновок про оптимальні умови формування виробів з рівнорухомих розчинних сумішей.

Технологічні властивості розчинної суміші, зокрема легкоукладальність, тісно зв'язані з її реологічними характеристиками – пластичною міцністю  $P_m$ . Тож початковий процес структуроутворення тверднучих багатокомпонентних композицій аналізувався по кривим зростання пластичної міцності  $P_m$ , описаних експоненціальною функцією, в якій показник поліному  $p(\tau)$  5-ої степені (для деяких точок плану  $p(\tau)$  складав 3-ю чи 4-ю степінь). Аналіз пластограм  $P_m = f(\tau \leq 3)$  для 27-ми композицій дозволив виділити період формування їх просторової коагуляційної структури, тривалість якої змінювалася від 0.75 до 2.15 год та початок періоду інтенсивного наростання пластичної міцності.

На рис. 1 представлені приклади зміни  $P_m$  в часі для рівнорухомих композицій #1, #15 і #27 з різним В/Ц. Варто відмітити, для всіх досліджуваних композицій початок формування коагуляційно-кристалізаційної структури настає при досягненні  $P_m \approx 134 \div 136$  кПа, а тривалість індукційного періоду складає не більше  $\tau \leq 0.43$  год. Скорочення періоду індукції можна пояснити підвищенням вмістом в клінкері  $C_3S \approx 75\%$ , більшою швидкістю його розчинення і достатньо високою питомою поверхнею в'язучого ( $S = 4600$  см<sup>2</sup>/г за Блейном). У зв'язку з тим, що суперпластифікатор  $MF$  володіє високим просторовим

ефектом, який досягається за рахунок збільшеної довжини бокових гідрофобних поліефірних ланцюгів і зменшеної довжини полікарбоксилатного ланцюга, частина поверхні зерен цементу не покрита плівкою полімеру. В результаті на поверхні зерна в'язучого є вільні зони для її взаємодії з водою, в підсумку це призводить до того, що добавка *MF* в меншій степені впливає на гідратацію.

Для аналізу впливу рецептурних факторів на процеси формування структури композиту, по узагальнюючим показникам пластограм будувалися ЕС-моделі виду (1). Так, отримано моделі для пластичної міцності в перші півгодини структуроутворення композицій  $P_m\{\tau=0.5\}$  і часу досягнення  $P_m$  рівної 35 кПа (відповідає початковій консистенції суміші марки S4)  $\tau\{P_m=35\}$ . Додатково розглядалася залежність пластичної міцності, в фіксовані моменти часу, від В/Ц. Кореляція  $P_m$  та В/Ц виявлена з 25-тої хвилини після змішування з водою, коефіцієнт кореляції склав  $r = -0.60$ .

В роботах Г.В. Несветаєва та ін. показано, що полікарбоксилатні добавки серії *Melflux* (*MF*) здійснюють позитивний вплив на процес гідратації в'язучого, особливо в ранній період тверднення, тим самим поліпшуючи будову пористого простору і збільшуючи міцність цементного каменю. Зокрема відомо, що цеоліт здатен приймати участь у фізико-механічних і фізико-хімічних процесах різних періодів організації структури матеріалу (Сай В.І. та ін.), а дискретні армуючі волокна (*F6* і *F12*) можуть виконувати роль підкладки (Пухаренко Ю.В.) на якій формується міцний та щільний шар новоутворень, тож вирішувалися задачі аналізу індивідуального впливу даних компонентів на період формування структури розчину в перші півгодини  $P_m\{\tau=0.5\}$ . Для аналізу індивідуального впливу *MF* чи *Z* чи *F6+F12* на  $P_m\{\tau=0.5\}$  проведено ряд обчислювальних експериментів, які дозволили виявити наступне. Максимальні значення  $P_{m,max}$  досягаються на максимальному рівні пластифікації сумішей ( $x_3 = +1$  чи  $MF = 0.7\%$ ) з високим вмістом в ній дрібного піску ( $x_2 = +1$  або 70% в суміші пісків), що підтверджує раніше виявлений факт (рис. 2а). Заміна частини цементу тонкодисперсним цеолітом в кількості 8 % прискорює процес початкового структуроутворення композитів більше ніж на 50 % (рис. 2б), а вміст волокон на середніх рівнях скорочує період формування коагуляційної просторової структури на 65 % (рис. 3).

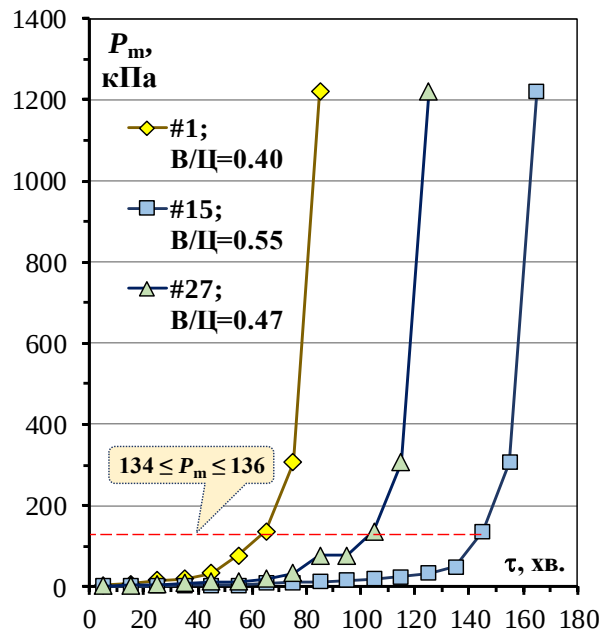


Рис. 1. Вплив рецептурних факторів на пластичну міцність  $P_m$  для композицій:

- #1 – складається з *Z*, *SG*, *MF* і *F6* на верхніх рівнях при відсутності *F12*;
- #15 – *Z*, *SG* і *MF* на нижніх рівнях з високим дозуванням *F6* і *F12*;
- #27 – середніх дозувань факторів складу

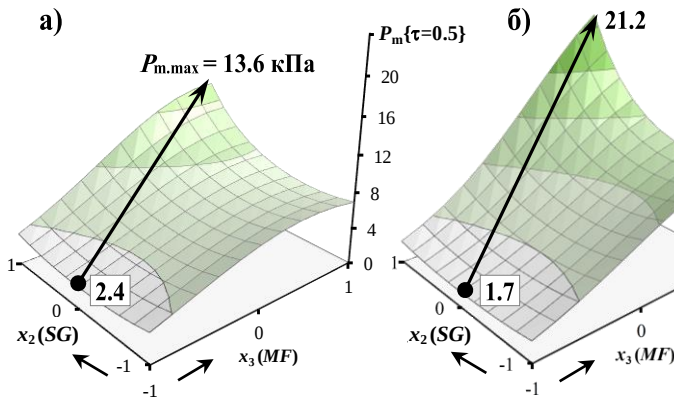


Рис. 2. Локальні поля пластичної міцності в координатах  $x_2$  і  $x_3$  при  $x_1=x_4=x_5=-1$  (а), при  $x_1=+1$ ,  $x_4=x_5=-1$  (б)

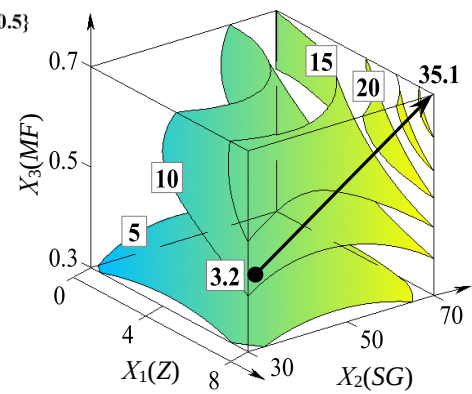


Рис. 3. Вплив факторів матриці при середніх дозуваннях волокон ( $F6=F12=0.015\%$ ) на  $P_m\{\tau=0.5\}$

Для комплексного вивчення кінетики зміни структурної міцності декоративних композитів будувалися «повні криві» росту їх пластичної та механічної міцності в часі, починаючи з перших хвилин і закінчуючи 28 добою тверднення. До даних по пластичній міцності ( $P_m$ ) для 27-ми розчинних сумішей додаються дані по міцності на стиск ( $f_{cm}$ ) для 27 декоративних бетонів отриманих після 1, 3, 7, 14 та 28 діб нормального тверднення.

На рис. 4 показані «повні криві» для 3-х складів композиту з різним В/Ц.

Аналіз кривих зростання структурної міцності для композицій #2, #13 та #16 на першій ділянці підтверджує зроблені висновки про вплив органо-мінеральних добавок. Розташування кривої складу #2, що характеризується високим вмістом рецептурних факторів ( $Z$ ,  $SG$ ,  $MF$  і  $F12$ ) та відсутністю короткого волокна ( $F6$ ), демонструє інтенсивне зростання пластичної міцності, чого не можна сказати про криву для контрольного складу #16 у якого  $SG$  і  $MF$  на низьких рівнях, а цеоліт ( $Z$ ) і скловолокна ( $F6$ ,  $F12$ ) відсутні. Отримані результати добре узгоджуються з відомими даними про те, що початкові значення пластичної міцності для цементних композицій напряму залежать від легкоукладальності суміші,

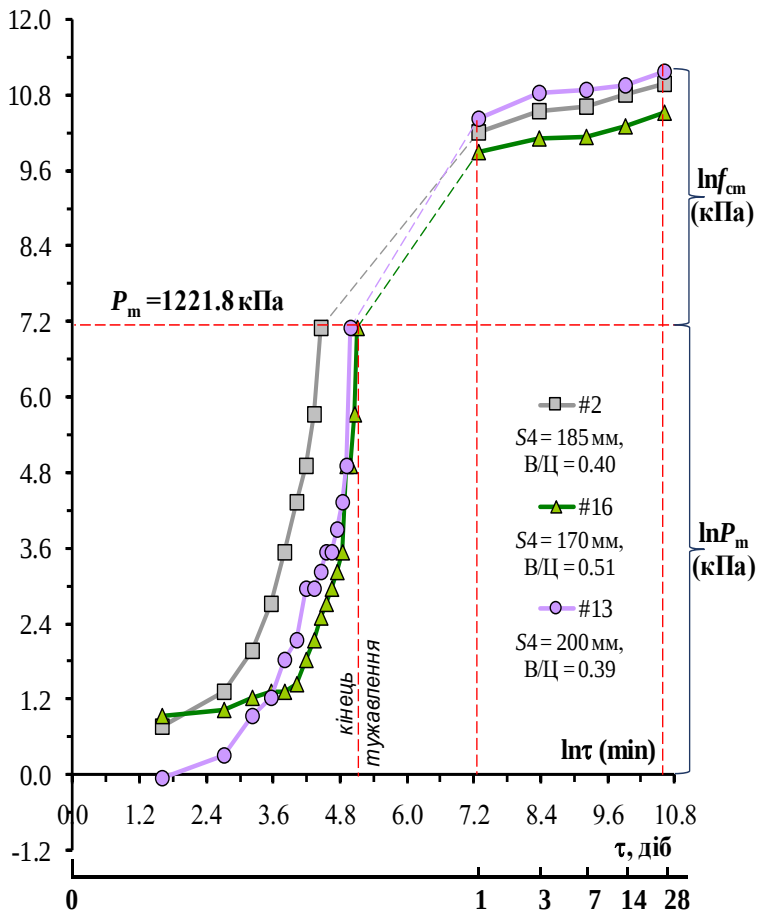


Рис. 4. Зміна в часі структурної міцності ( $P_m \rightarrow f_{cm}$ ) для композицій #2, #16 і #13 (максимальні рівні  $MF+F6$ , відсутні  $Z$  і  $F12$ , а  $SG$  на низькому рівні)

а механічна міцність композитів з плином часу в значній степені залежить від початкового В/Ц відношення. Це пояснюється тим, що товщина водних прошарок навколо зерен компонентів у композиті #13 значно менша, а отже матриця розчину характеризується меншою кількістю дефектів (пор, тріщин, пустот тощо), більш щільною і міцною структурою.

Розглядався кореляційний зв'язок з Ц/В міцності бетону при стиску ( $f_{cm}$ ) в різні терміни тверднення. Відомо, цементно-водне співвідношення є структурним параметром, від якого в значній степені залежать механічні властивості продуктів гідратації, а отже, й інтенсивність наростання механічної міцності бетону. Виявлено досить високу кореляцію  $f_{cm}$  із структурним параметром – коефіцієнт кореляції  $r$  по 27-ми парам значень знаходиться в межах від 0.75 до 0.83. Найбільш тісний кореляційний зв'язок між Ц/В та  $f_{cm}$  демонструють дані після 1-ої доби тверднення (рис. 5), що підтверджує факт високого ступеня пересичення рідкої фази цементно-водної суспензії іонами, що

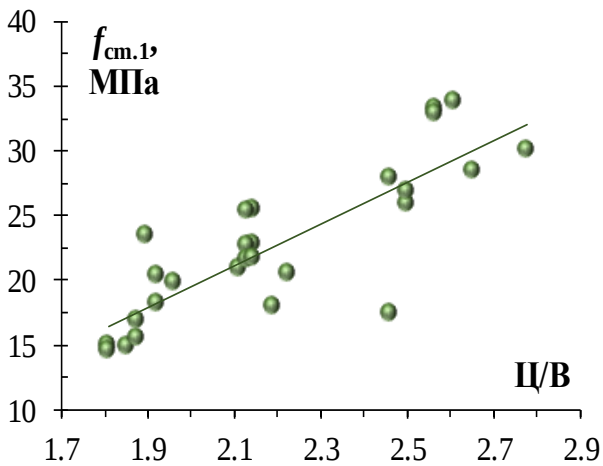


Рис. 5. Вплив Ц/В на міцність при стиску після 1-ої доби тверднення композитів

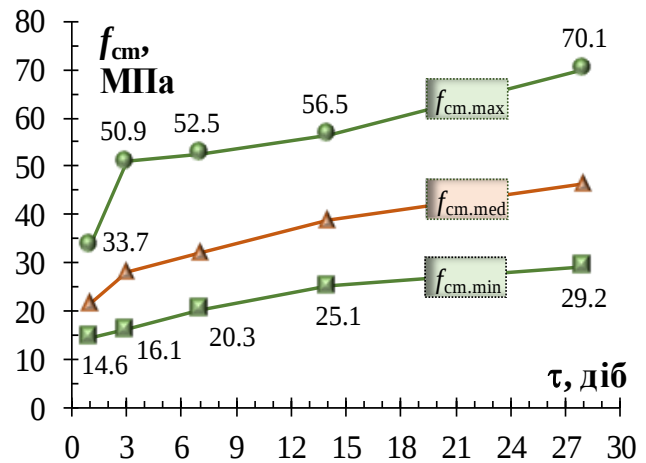


Рис. 6. Узагальнюючі результати кінетики міцності на стиск декоративного бетону

утворюються при розчиненні  $C_3A$  і  $C_3S$  (вміст в цементному клінкері 10 і 75 % відповідно), а також здатності підтримувати це пересичення на весь період гідратації цементу (вміст частинок дрібних фракцій в'язучого розміром  $< 10$  мкм становить 36 %, а  $< 16$  мкм – 54.1 %). Варто відмітити, що розроблені склади декоративного бетону характеризуються відносно швидким набором механічної міцності. Аналіз побудованих кривих (рис. 6) кінетики наростання міцності  $f_{cm}$  композитів по екстремальним і медіанним точкам натурного експерименту для 27-ми композитів, показує, що після 1-ої доби тверднення досягається 50 % нормативної міцності, після 3-ої – 55÷73 %, а після 7-ої – 69÷75 % і т.д., що є важливим фактором при виготовленні архітектурних елементів. Таким чином, це дозволить збільшити оборотність форм виробів, завдяки ранній розпалубці та, як наслідок, скоротити терміни природнього тверднення декоративних бетонів.

Для аналізу впливу рецептурних факторів на механічні характеристики композитів використовувалися ЕС-моделі виду (1). Комплекс структурованих моделей дозволив проаналізувати вплив рецептурних факторів матриці та дисперсного армування на міцність при стиску  $f_{cm}$  і міцність на розтяг при згині  $f_{ctfm}$  композиту, при знаходженні його в рівноважному, сухому й водонасиченому

станах. Отримані результати показали, що використання цеоліту взамін частини в'язучого, скловолокон і заповнювачів оптимальної гранулометрії при максимальній пластифікації сумішей полікарбоксилатною добавкою дозволяє отримати високоміцний декоративний бетон ( $f_{cm} \geq 50$  МПа) та зберегти його міцність у водному середовищі (оцінювалась через  $f_{ctfm}$ ). Також було виявлено, що оптимальні рівні  $f_{cm}$  і  $f_{ctfm}$  знаходяться в різних зонах рецептурної області. Тому, для прийняття остаточного рішення щодо кількісного складу рецептурних факторів у композиті вирішувались задачі дослідження по їх впливу на експлуатаційні характеристики і оптимізації складів декоративного бетону за прийнятими критеріями якості.

**В четвертому розділі**, з метою забезпечення довговічності архітектурним елементам, вирішувались задачі підвищення тріщино-, морозо- й карбонізаційної стійкості та зниження, відповідно, деформацій усадки й водопоглинання за рахунок використання дискретних волокон, тонкодисперсного пуцоланового наповнювача та раціональної гранулометрії заповнювачів.

Дослідження тріщиностійкості 27-ми складів бетону виконувалось через критичний коефіцієнт інтенсивності напружень ( $K_{Ic}$ , МПа·м<sup>0.5</sup>) шляхом випробовування двох серій зразків з початковими надрізами, ініційованих двома способами згідно з чинним ДСТУ Б В.2.7-227:2009. Результати досліджень показали, значення  $K_{Ic}$  зразків різних складів композиту залежать від методу ініціювання початкових тріщин. Для одного складу композиту  $K_{Ic}$  змінюється, в умовах проведених дослідів, від 3 до 40 %. Причиною відмінностей значень критерію  $K_{Ic}$ , як зазначає Ю.В. Зайцев, є наявність системи мікротріщин, що оточують початковий штучний надріз, і які вимагають підвищеного притоку зовнішньої енергії на початкових етапах розвитку тріщини.

Вплив факторів складу на величину в'язкості руйнування  $K_{Ic}$ , в залежності від методу ініціювання тріщини в композиті, проаналізовано на основі ЕС-моделей. Характер впливу скляних волокон ( $F6$ ,  $F12$ ) довжиною 6 і 12 мм на  $K_{Ic}$  показав, що у всіх випадках введення супертонкої фібри сприяє підвищенню стійкості матеріалу до розкриття тріщини. Особливо, це спостерігається у композитах із тріщиною, ініційованою під час виготовлення зразків, значення  $K_{Ic}$  (в залежності від вмісту скловолокон) зростає від 6 до 24 %. Позитивний вплив склофібри на в'язкість руйнування композиту обумовлений тим, що будучи рівномірно розподіленими в цементній матриці вони викликають перерозподіл напружень, які є причиною утворення тріщин, і скорочують, ймовірно, середню фактичну довжину тріщини. При цьому максимальні рівні коефіцієнту  $K_{Ic}$  досягаються у композитів без цеоліту, із приблизно однаковим співвідношенням зерен дрібного і крупного пісків ( $SG \approx 50$  %) та при дозуванні добавки суперпластифікатора нижче середнього рівня  $MF < 0.5$  %. Оскільки отримані результати дослідження тріщиностійкості показали, що метод ініціювання початкових тріщин в зразках матеріалу в значній степені впливає на величину  $K_{Ic}$ , це дозволяє кількісно оцінити вплив рецептурних факторів на зміну коефіцієнту технологічного впливу  $K_T = K_{Ic}^3 / K_{Ic}^P$  (запропоновано В.М. Вировим). Аналіз результатів моделювання  $K_T$  підтверджує здатність високодисперсних волокон,

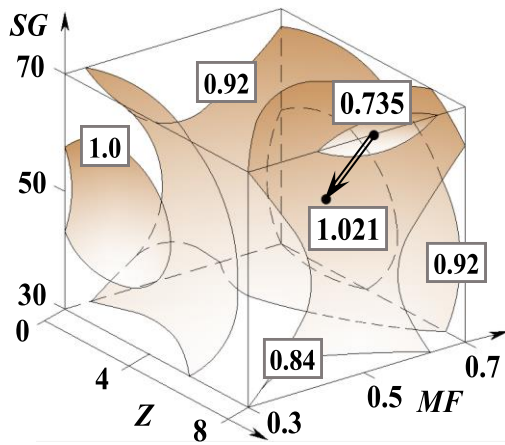


Рис. 7. Вплив факторів матриці при вмісті волокон на середніх рівнях на коефіцієнт технологічного впливу  $K_T$  через тріщиностійкість

більш тривалому експонуванню зразків у середовищі  $W_M$  поступово зростає (крива  $W_{M,max}$  відповідає складу #7). По узагальнених результатах побудовано кінетичні криві  $W_{M,max}$  і  $W_{M,min}$  (рис. 8). Виявлена явна асиметрія розташування середньої кривої по відношенню до границь ( $W_{M,max}$  і  $W_{M,min}$ ). Границя  $W_{M,max}$  у 2.4 рази віддалена від середньої ніж  $W_{M,min}$ , але надалі починає зменшуватися. Це можна пояснити тільки значною відмінністю капілярно-пористого простору бетонів, що характеризуються різним якісним і кількісним складом структурних елементів. За кінетикою водопоглинання композитів розраховано, по відомій методиці, однорідність розмірів капілярів  $\alpha$ . Для 27-ми складів бетону, границя коливань  $\alpha$  знаходиться в межах  $0 < \alpha \leq 0.241$ , що дозволило зробити висновок, пористий простір композитів характеризується великою неоднорідністю пор за розмірами. Додатково визначено рівноважне поглинання  $W_p$ .

За отриманими значеннями  $W_p$ , через співвідношення  $W_p/W_M$ , оцінено коефіцієнт мікропористості  $K_M$ , чисельне значення якого характеризує відносну кількість мікропор в пористій структурі матеріалу. Розрахункові дані  $K_M$  для 27-ми складів бетону знаходяться в межах  $0.39 \leq K_M \leq 0.69$ . Отже пористість композитів більш ніж на 39 % представлена мікропорами, радіус яких менше  $r < 0.1$  мкм. Тож, використання високодисперсного цементу з підвищеним вмістом в клінкері  $C_3A$ , цирконового волокна і заміщення цементу цеолітом може призводити до зменшення числа та розміру крупних пор і викликати утворення мікропор. Об'єктивність вищезазначених представлень про будову пористого простору досліджених композитів підтверджується оптичними дослідженнями.

незалежно від методу ініціювання тріщини в зразках, гасити об'ємні деформації композиту викликані гідратацією цементного в'язучого. При цьому, варто зауважити важливий факт позитивного впливу суперпластифікуючої добавки ( $MF = 0.7\%$ ) на формування структури композиту з високодисперсними наповнювачами (рис. 7).

Дослідження кінетики водопоглинання композитів показали, що інтенсивне водопоглинання за масою  $W_M$  для більшості складів дрібнозернистих композитів спостерігається після 15 хвилин їх замочування. В подальшому інтенсивність насичення значно знижується, хоча при

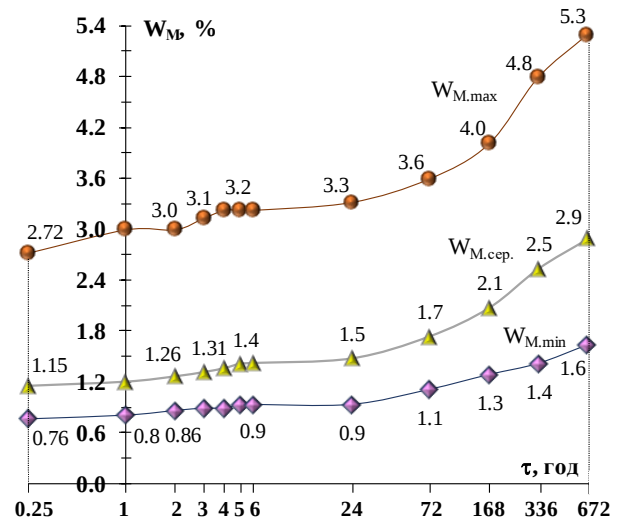


Рис. 8. Кінетика водопоглинання  $W_M$  (%) композитів різного складу

Так, для низько пластифікованих композитів характерна наявність в матриці дрібних і крупних макропор розміром  $\leq 500$  мкм з переривчастою структурою, а у високопластифікованих складів спостерігається значно менша кількість макропор і найбільша неоднорідність пор за розмірами. Однак при такій будові пористого простору механічні характеристики зразків бетону у водонасиченому стані є суттєво вищими. Разом з  $W_M$  було досліджено водопоглинання за капілярним підсосом  $W_{кп}$ . Визначення  $W_{кп}$  проводилось протягом 28 діб, при цьому на поверхні зразків висолоутворень не було помічено. Як зазначає Ф.М. Лі, це обумовлено тим, що на поверхні бетонів при використанні білих цементів висолоутворення не появляються або майже їх не видно, оскільки вони містять дуже мало розчинних луг.

У зв'язку з тим, що інтегральні параметри ( $W_M$  і  $W_{кп}$ ) пористої структури матеріалу суттєво залежать від якісного і кількісного складу бетону подальший аналіз проводився з використанням ЕС-моделей. Аналіз моделей ( $W_M$  і  $\ln W_{кп}$ ) показав, на водопоглинання композитів, зокрема, при безпосередній близькості від волокон, найбільший вплив надає рівень пластифікації композицій ( $MF \geq 0.5\%$ ). Мінімальні значення параметрів  $W$  отримуємо для  $W_{M.min} = 0.78\%$  (рис. 9а) з середнім дозуванням суперпластифікатору в координатах дисперсних волокон  $F6 = 0.014\%$  та  $F12 = 0.03\%$ , а для  $W_{кп.min} = 0.13\%$  (рис. 9б) на високо-

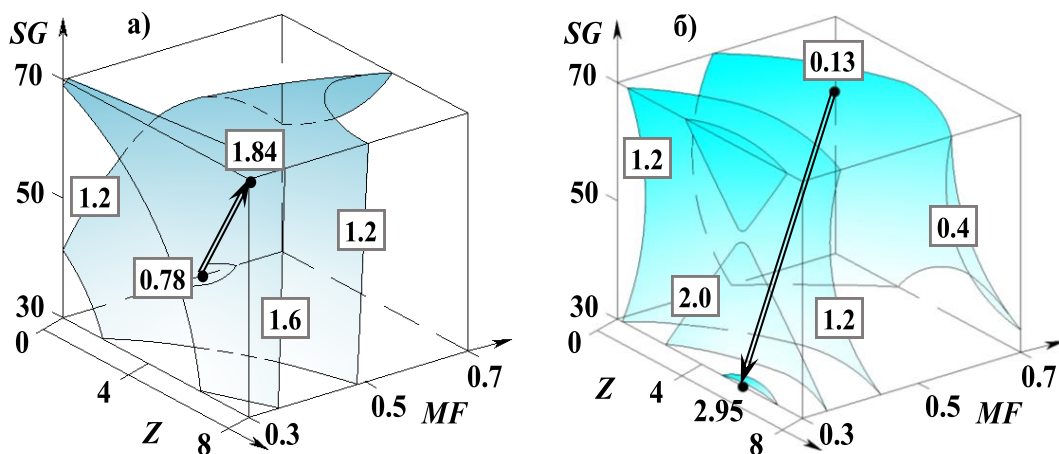


Рис. 9. Вплив факторів складу на водопоглинання бетону:  
а) за масою  $W_M$ ; б) при капілярному підсосу  $W_{кп}$

пластифікованих складах бетону з максимальним рівнем армування матриці тільки фіброю довжиною 12 мм. Вплив фракційного складу пісків SG на  $W_M$  і  $W_{кп}$  зразків бетону досить різний. Виявлена негативна дія тонкодисперсного цеоліту, у композитах з низьким рівнем пластифікації ( $MF=0.3\%$ ), різні дозування якого при розбіжній гранулометрії піску сприяють збільшенню водопоглинання  $W$  матеріалу. Це дозволяє припустити, що причиною підвищення  $W$  є фізико-хімічна і фізико-механічна зміни в зоні контакту заповнювача і матриці матеріалу. Оскільки заміна в'язучого цеолітом і збільшення в суміші пісків зерен дрібної фракції при забезпеченні вимоги по легкоукладальності композицій постійно сприяли зростанню початкового водо-цементного співвідношення.

Проведено дослідження карбонізаційної стійкості 27-ми складів декоративного бетону. Отримані результати продемонстрували, не зважаючи на те, що вік випробовуваних зразків складав 420 діб, карбонізація у 20-ти складів бетону є відсутня, а в інших – не перевищує 2.5 мм. Ймовірно, це пов'язано з підвищеним вмістом тонких частинок у фракційному складі цементу й цеоліту розміром  $<20$  мкм, а також збільшеним вмістом в'язучого в складі декоративного бетону ( $440 \div 490$  кг/м<sup>3</sup>). Тож вибірковість проникнення CO<sub>2</sub> через поверхні зразків в тіло бетону підтверджує відмінність капілярно-пористого простору досліджуваних композитів.

З метою збереження декоративно-експлуатаційних властивостей архітектурних виробів в часі вирішувалась задача визначення раціональних співвідношень вихідних компонентів, які зводять до мінімуму деформації усадки ( $\epsilon_{cs}$ , мм/м) декоративного бетону. Дослідження  $\epsilon_{cs}$  проводилися протягом 154 діб з одночасним контролем втрати маси зразку. За отриманими результатами будувалися кінетичні криві, що відображають залежність усадки композитів  $\epsilon_{cs}$  від часу  $\tau$  вимірювання. Аналіз кривих показав, що розвиваючі стискаючі зусилля стрімко проявляються на ділянці дослідження до 42 діб, а надалі у віці 98 діб загальна усадка стабілізується (рис. 10). Мінімальними значеннями  $\epsilon_{cs, \min}$ , на всьому відрізку дослідження, характеризується низькопластифікований склад бетону #15 на крупнозернистому піску ( $SG=30$  %) з максимальним рівнем гібридного армування без цеоліту. Отже, стохастично розподілені гібридні високодисперсні волокна в цементній системі, утворюючи тривимірний каркас,

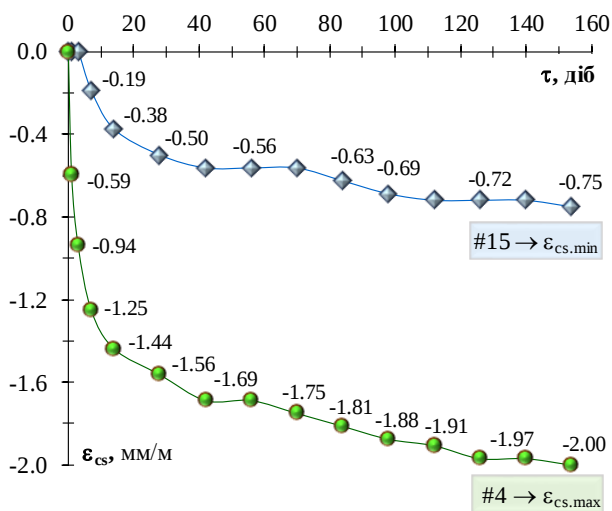


Рис. 10. Узагальнюючі результати кінетики відносної деформації усадки ( $\epsilon_{cs}$ , мм/м) декоративного композиту

впливають на розподіл об'ємних змін. Найбільшими значеннями усадки  $\epsilon_{cs, \max}$ , вирізняється неармований композит #4 з високим вмістом цеоліту ( $Z = 8$  %) і зерен дрібного піску ( $SG = 70$  %) та з низьким рівнем пластифікації сумішей (рис. 10). Також, підтверджено наукові факти проте, що для отримання декоративних бетонів з низькими значеннями деформацій усадки, при використанні в них тонкодисперсного цеоліту взамін частини в'язучого, необхідно збільшувати рівень пластифікації композицій. Це дозволить, зокрема підвищити карбонізаційну стійкість бетону.

Одним з основних критеріїв оцінки довговічності архітектурних елементів, що застосовуються для зовнішнього оздоблення конструктивних елементів будівель і споруд, є морозостійкість. В якості критерію морозостійкості використано коефіцієнт морозостійкості  $K_F$ , значення якого зв'язані з міцністю матеріалу. Для досліджуваних складів бетону, після кожних 5-ти циклів, оцінювались також величина втрати маси зразків. Результати дослідження після

400 циклів показали, що на поверхні одиночних зразків декількох складів бетону почали з'являтися точкового характеру лущення, причому в 3-х із 27-ми складів композиту виявлено втрату маси не більше 0.33 %. Дослідження було припинено у зв'язку з погіршенням зовнішнього виду зразків бетону, що є неприпустимим. Розраховані значення критерію  $K_F$  знаходяться в межах від 0.96 до 1.74, що підтверджує початок незворотних змін в структурі композитів у яких  $K_F < 1.0$ .

Результати математичної обробки значень міцності на стиск  $f_{cm,F}$  зразків, що пройшли випробовування на морозостійкість показали, підвищити стійкість декоративного бетону до морозного руйнування можливо за рахунок збільшення рівня пластифікації цементних композицій та введенням при його виготовленні високоефективних дисперсних наповнювачів (цеоліту і фібри). Використання пуцолану взамін частини в'язучого ( $Z = 8$  %), скловолокон і заповнювачів оптимального гранулометричного складу в комплексі з полікарбоксилатною добавкою на високому рівні ( $MF = 0.7$  %) сприяє зменшенню інтегральної пористості та забезпечує, під час експлуатації композиту, збереження його міцності, і відповідно, стійкість до кліматичних впливів при збереженні декоративних властивостей.

**П'ятий розділ** присвячений вирішенню задач отримання раціональних складів декоративних бетонів і практичній реалізації результатів досліджень. Проведені експериментальні дослідження з розробки високопродуктивного декоративного бетону були направлені на отримання штучного декоративного каменю, який за фактурою і кольоровою гамою наближений до природного каменю характерного для Півдня України та який здатен створити конкуренцію природному каменю-піщанику. Аналіз отриманих результатів досліджень (Розділи 3 і 4) властивостей 27-ми складів декоративного бетону дозволив встановити, що технологічні, фізико-механічні та експлуатаційні характеристики композиту значною мірою залежать від його структурного оформлення. Порівняння критеріїв якості розробленого штучного декоративного каменю-піщаника з природнім, і зокрема, з нормативними вимогами зазначених в ДСТУ Б В.2.7-161:2008 та ДСТУ Б EN 13198:2016, показало, що в загальному задовольняються вимоги до властивостей досліджених складів декоративного штучного каменю.

Визначення раціональних співвідношень між факторами складу, для забезпечення нормованих рівнів характеристик композиту найбільш раціонально проводити при спільній реалізації натурних і обчислювальних експериментів. Використовувались графічний метод сполучення ізоповерхонь трьохфакторних діаграм, побудованих за ЕС-моделями критеріїв якості, та метод Монте-Карло для випадкового сканування рецептурних полів і визначення області допустимих і раціональних складів бетону (В.А. Вознесенський, Т.В. Ляшенко).

Для реалізації обчислювальних експериментів з «повної» ЕС-моделі властивості  $Y(1)$  отримувались 3-х факторні моделі, які описували локальні поля, що формуються трьома факторами ( $Z$ ,  $SG$  і  $MF$ ) при фіксованих дозуваннях волокон  $x_4 = x_5 = -1, 0$  і  $+1$  (або  $F6 = F12 = 0, 0.015, 0.03$  %). За результатами обчислювального експерименту «найкращими» величинами всіх властивостей складів декоративного композиту виділяється допустима область, що утворена

під впливом середніх дозувань високодисперсних волокон  $F6 = F12 = 0.015\%$  (рис. 11). Для підвищення надійності декоративного бетону при виборі раціональних складів враховувались значення характеристик композиту – щільності, коефіцієнту технологічного впливу  $K_T$  на тріщиностійкість. В області

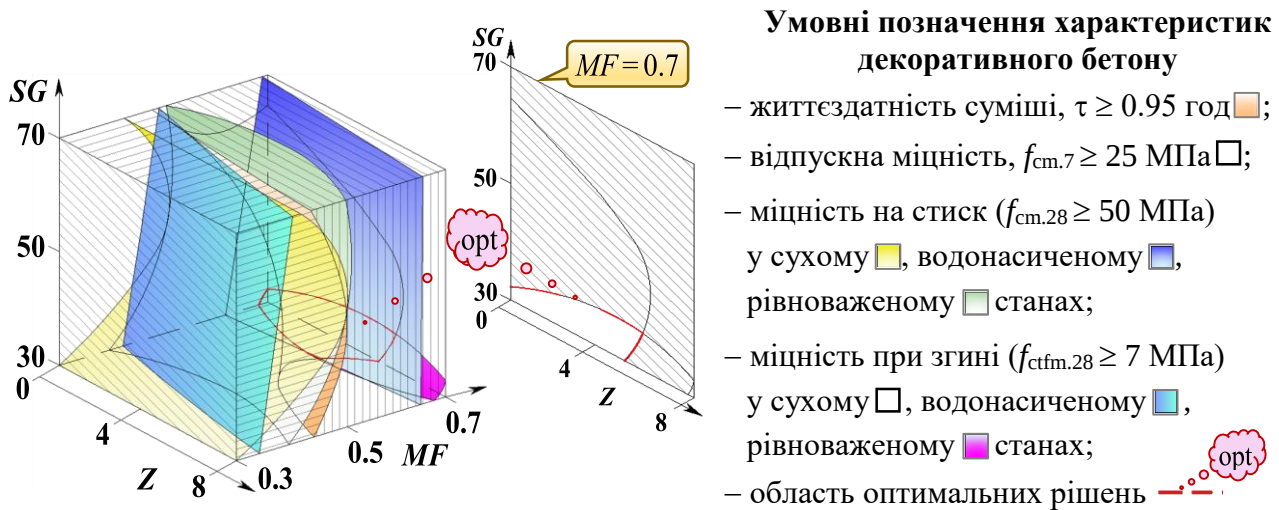


Рис. 11. Розташування на трьох факторному полі нормованих рівнів критеріїв бетону

допустимих рішень вибрано три склади декоративного бетону. Витрата сировинних матеріалів на  $1\text{ м}^3$  дрібнозернистої суміші для одного із трьох рекомендованих складів бетону становить: цементного в'язучого – 457 кг (при максимальній – 490 кг/м<sup>3</sup>), тонкодисперсного цеоліту – 24.4 кг, суміш кварцових зерен дрібного і крупного піску – 1639 кг, суміш скляних волокон різної довжини – 0.60 кг від маси композиції. Водо-цементне відношення відповідає 0.39, при використанні полікарбоксилатної добавки на рівні 0.7% від маси цементу. Даний склад характеризується: збережуваністю рухомості композиції (марка S4)  $\tau=0.95$  год, відпускну міцністю  $f_{cm,7} = 45.3$  МПа, міцністю на стиск  $f_{cm} \geq 55$  МПа і міцністю на згин  $f_{ctfm} \geq 7.3$  МПа, щільністю  $\rho_b = 2140$  кг/м<sup>3</sup>, водопоглинанням  $W_M = 1.78\%$ , пористістю визначеною за  $W_o = 3.73\%$ , коефіцієнтом технологічного впливу на тріщиностійкість  $K_T = 0.98$ , маркою по морозостійкості F400. На основі раціональних складів декоративного бетону виготовлено архітектурні елементи (об'ємом більше 10 м<sup>3</sup>), що пройшли дослідно-промислову перевірку при оздобленні фасадів житлових будівель і споруд в м. Одесі.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. В результаті проведених експериментально-теоретичних досліджень розроблені раціональні склади декоративного дрібнозернистого бетону та технологічні умови отримання архітектурних елементів складної форми з поліпшеними декоративно-художніми, фізико-механічними та експлуатаційними властивостями. Цілеспрямоване використання місцевих пісків дало змогу отримати кольорові гами, які зберігаються без змін на весь термін експлуатації виробів. Застосування дисперсної гібридної арматури дозволили забезпечити підвищену тріщиностійкість матеріалу, що, при одночасній модифікації структури шляхом застосування полікарбоксилату та

цеоліту, забезпечило підвищення стійкості в умовах дії погодних навантажень – багаторазових зволоження та висушування, заморожування та відтавання.

2. Розроблена блок-схема досліджень дозволила комплексно оцінити логічну послідовність поетапного проведення досліджень характеристик декоративного композиту при виконанні натурних і обчислювальних експериментів. Аналіз якісних характеристик вихідної сировини, комплексний підхід до визначення властивостей композиту і використання експериментально-статистичного моделювання для аналізу і оптимізації параметрів структури готового матеріалу дозволяють говорити про достовірність і обґрунтованість отриманих наукових результатів.

3. Встановлено закономірності впливу двох груп рецептурних факторів «Модифікатори цементно-піщаної матриці» і «Параметри дисперсного армування» на структурну міцність декоративних композитів. Експериментально підтверджено, що раціональним способом підвищення ефективності мінеральних високодисперсних наповнювачів (цеоліту і гібридних скловолокон) бетону є максимальна пластифікація сумішей полікарбоксилатним суперпластифікатором (*Melflux 2651F*). Використання полікарбоксилатної добавки на рівні 0.7 % від маси цементу дозволяє отримати розчинні суміші з  $V/C \leq 0.4$  і щільністю  $\rho_c \geq 2050$  кг/м<sup>3</sup>. Виявлено, що заміна частини в'язучого цеолітом, в кількості 8 %, прискорює процес початкового структуроутворення композицій більш, ніж на 50%, а вміст гібридних волокон на середніх рівнях (0.6 кг/м<sup>3</sup>) скорочує період формування коагуляційної просторової структури на 65%. Отримані «повні криві» процесів структуроутворення для 27-ми складів бетону підтверджують, що початкові значення структурної міцності з плином часу в значній степені залежать від початкового  $V/C$  співвідношення. Встановлено, високопластифіковані склади бетону, які містять цеоліт і скловолокна характеризуються швидким набором структурної міцності, зокрема, після 1-ї доби тверднення досягається більше 50 % від нормативної міцності в 50 МПа.

4. Проведений комплекс досліджень експлуатаційних властивостей декоративного бетону в часі показав, що тріщино-, карбонізаційна і морозостійкість, водопоглинання матеріалу в значній мірі залежать від раціональних співвідношень вихідних компонентів. Використання високодисперсних мінеральних наповнювачів і заповнювачів оптимальної гранулометрії сприяє зменшенню інтегральної пористості та забезпечує, під час експлуатації композиту, збереження його міцності, і відповідно, стійкість до кліматичних впливів при збереженні кольорової палітри архітектурних виробів протягом тривалого періоду. Результати вимірювання усадки протягом 154 діб показали, що стохастично розподілені гібридні високодисперсні волокна в цементній системі, утворюючи тривимірний каркас, впливають на розподіл об'ємних змін в матеріалі виробів. Підтверджено наукові факти стосовно введення тонкодисперсного цеоліту взамін частини цементу – позитивний вплив пуцолану на фізико-механічні характеристики композитів спостерігається виключно за умови пластифікації композицій на рівні 0.7 % від маси цементу.

5. Комплексне використання ЕС-моделей і методу Монте-Карло дозволило визначити області допустимих складів і рівні рецептурних факторів

«Модифікації цементно-піщаної матриці» і «Параметрів дисперсного армування» при забезпеченні нормативних вимог до функціональних показників матеріалу виробів. Знайдені раціональні склади декоративного бетону характеризуються високими показниками технологічності ( $S_4$ ,  $\tau \leq 0.95$  год,  $K_T = 1.0$ ), ранньої і нормативної міцності ( $f_{cm} > 40$  і  $55$  МПа відповідно), карбонізаційної й морозостійкості (марка  $F400$ ), низькими значеннями водопоглинання та пористості ( $W_M < 2\%$ ,  $W_o < 4\%$ ). Склади дисперсно-армованих декоративних бетонів використано при виготовленні архітектурних елементів (об'ємом більше  $10 \text{ м}^3$ ), які пройшли дослідно-промислово перевірку при оздобленні фасадів житлових будівель і споруд в м. Одесі.

### Список опублікованих праць за темою дисертації

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

#### *Статті у наукових фахових виданнях України*

1. Довгань П.М., Довгань О.Д., Воронов Ю.Н. Исследование свойств гибридно-армированных цементных композитов. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. 2009. Вип. 35. С. 144-148.
2. Довгань П.М., Довгань А.Д. Влияние стеклянных и полипропиленовых волокон на пределы прочности и ударостойкость фибробетона. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. 2010. Вип. 38. С. 236-241.
3. Lyashenko T.V., Dovgan A.D., Dovgan P.M. Decorative concrete with hybrid glass fibre: design and first results of the experiment. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. Вип. 70, 2018. С. 99-105 (індексується наукометричною базою *Index Copernicus*).
4. Довгань А.Д., Довгань П.М., Ляшенко Т.В. Влияние цеолита и стеклянных волокон на кинетику структурообразования цементных композиций. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Сер. Технічні науки*. Вип. №2 (82), 2018. С. 273-287.
5. Lyashenko T.V., Dovgan A.D., Dovgan P.M. Fibre-reinforced decorative composite: the effects of composition on the strength. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. Вип. 73, 2018. С. 89-97 (індексується наукометричною базою *Index Copernicus*).
6. Довгань О.Д., Вировий В.М., Довгань П.М. Водопоглинання, як функція складів декоративних бетонів. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Сер. «Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди»*. Вип. 38, 2020. С. 148-160.
7. Dovgan A.D., Vyrovoy V.M., Dovgan P.M. Dispersed-reinforced decorative concrete: influence of composition factors on shrinkage deformations. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. Вип. 78, 2020. С. 79-88 (індексується наукометричною базою *Index Copernicus*).

*Стаття у науковому періодичному виданні іншої держави*

8. Dovgan A.D., Vyrovoy V.M., Dovgan P.M. Crack resistance of decorative composites. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 708. (індексується наукометричними базами Web of Science, Scopus) ISSN 1757-899X.

*Патент на корисну модель*

9. Патент № 45587, Україна, Фібробетонна суміш / Вознесенський В.А., Довгань П.М., Довгань О.Д. заявник і утримувач патенту Вознесенський В.А., Довгань П.М., Довгань О.Д., 2009 р.

*Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації*

10. Довгань А.Д., Довгань П.М., Ляшенко Т.В. Предпланирование эксперимента для исследования свойств песчаного бетона. *Моделирование и оптимизация строительных композитов*: матеріали Міжнар. наук.-техн. сем. Одеса: ОДАБА, 2017. С. 26-29.

11. Довгань П.М., Довгань А.Д., Ляшенко Т.В., Хлыцов Н.В. Планирование эксперимента в исследовании декоративных песчаных бетонов. *Структуроутворення, міцність та руйнування композиційних будівельних матеріалів і конструкцій*: зб. тез доп. Міжнар. конф. Одеса: ОДАБА, 2018. С. 27-30.

12. Довгань А.Д., Довгань П.М., Хлыцов Н.В. Исследование технологических свойств декоративных цементно-песчаных композиций / 74-я наук.-техн. конф. професорсько-викладацького складу академії. Одеса: ОДАБА, 2018. С. 178.

13. Довгань А.Д., Довгань П.М. Взаимодействие современных технологий и социума. *Проблеми та перспективи розвитку будівельного комплексу м. Одеси*: зб. тез доп. II наук.-практ. конф. Одеса: ОДАБА, 2018. С. 73.

14. Довгань А.Д., Довгань П.М., Ляшенко Т.В., Хлыцов Н.В. Экспериментально-статистическое моделирование при исследовании дисперсно-армированного песчаного бетона *Моделирование и оптимизация строительных композитов*: матеріали Міжнар. наук.-техн. сем. Одеса: ОДАБА, 2018. С. 30-35.

15. Довгань П.М. Дисперсно-армовані дрібнозернисті бетони на природних пісках для виготовлення архітектурних елементів. *Структуроутворення, міцність та руйнування композиційних будівельних матеріалів та конструкцій*: зб. тез доп. Міжнар. конф. Одеса: ОДАБА, 2019. С. 35-38.

16. Довгань О.Д., Довгань П.М., Хлыцов М.В. Вплив дисперсного армування на пластичну міцність дрібнозернистих композицій / 75-а наук.-техн. конф. професорсько-викладацького складу академії. Одеса: ОДАБА, 2019. С. 153.

17. Lyashenko T., Dovgan A., Dovgan P. Glass fibre reinforced decorative composite: components influence and multicriterial optimization. *Brittle Matrix Composites 12*. Warsaw, Institute of Fundamental Technological Research, 2019. P. 107-116 (індексується наукометричною базою Scopus).

18. Довгань О.Д., Вировой В.М., Довгань П.М. Тріщиностійкість декоративних композитів. *Експлуатація та реконструкція будівель і споруд*: зб. тез доп. учасн. III Міжнар. конф. Одеса: ОДАБА, 2019. С. 60.

19. Вировой В.М., Довгань О. Д., Довгань П.М. Вплив технологічної пошкодженості на тріщиностійкість декоративного композиту. *Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті*: зб. тез доп. 8-ї Міжнар. наук.-техн. конф. Ч.2. Харків: УкрДУЗТ, 2019. С. 140-142.

20. Довгань О.Д., Вировой В.М., Довгань П.М., Хлицов М.В. Карбонізаційна стійкість декоративних бетонів. *Моделирование и оптимизация строительных композитов*: матеріали Міжнар. сем. Одеса: ОДАБА, 2019. С. 45-50.

21. Довгань О.Д., Хлицов М.В., Довгань П.М. Використання наукових і виробничих розробок в навчальному процесі. *Управління якістю підготовки фахівців*: зб. матеріалів XXV Міжнар. наук.-метод. конф. Одеса: ОДАБА, 2020. С. 151-152.

22. Довгань О.Д., Довгань П.М., Хлицов М.В. Оцінка водопоглинання декоративного бетону / 76-а наук.-техн. конф. професорсько-викладацького складу академії. Одеса: ОДАБА, 2020. С. 149.

## АНОТАЦІЯ

Довгань П.М. Дисперсно-армовані декоративні бетони для архітектурних елементів. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.05 – будівельні матеріали та вироби. Одеська державна академія будівництва та архітектури. – Одеса, 2020.

Розроблено раціональні склади декоративного бетону, на основі місцевих пісків природної гранулометрії й кольорової гами, та технологічні умови отримання архітектурних елементів складної форми з поліпшеними декоративними, фізико-механічними та експлуатаційними властивостями. За результатами спланованого експерименту побудовано і проаналізовано комплекс експериментально-статистичних моделей, який дозволив оцінити вплив двох груп факторів складу «Модифікації цементно-піщаної матриці» і «Параметрів дисперсного армування», а також визначити закономірності цього впливу на аналізовані характеристики декоративних композитів. Встановлено, що використання цеоліту взамін частини цементу, гібридних скловолокон і піску оптимальної гранулометрії при максимальній пластифікації сумішей полікарбонатом забезпечує, під час експлуатації композиту, збереження його міцності, і відповідно, стійкість до кліматичних впливів при збереженні кольорової палітри архітектурних виробів протягом тривалого періоду. Раціональні склади декоративних бетонів використано при виготовленні елементів декору, які пройшли дослідно-промислово перевірку при оздобленні фасадів житлових будівель і споруд.

Ключові слова: декоративний бетон, скляна фібра, цеоліт, полікарбонат, експериментально-статистична модель, міцність, архітектурні елементи.

## АННОТАЦИЯ

Довгань П.М. Дисперсно-армированные декоративные бетоны для архитектурных элементов. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.05 – строительные материалы и изделия. Одесская государственная академия строительства и архитектуры. – Одесса, 2005.

Разработаны рациональные составы декоративного бетона на основе местных песков природной гранулометрии и цветовой гаммы, и технологические условия получения архитектурных элементов сложной формы с улучшенными декоративными, физико-механическими и эксплуатационными свойствами. По результатам спланированного эксперимента построен и проанализирован комплекс экспериментально-статистических моделей, который позволил оценить влияние двух групп факторов состава *«Модификации цементно-песчаной матрицы»* и *«Параметров дисперсного армирования»*, а также определить закономерности этого влияния на анализируемые свойства декоративных композитов. Установлено, что использование цеолита взамен части цемента, гибридных стекловолокон и песка оптимальной гранулометрии при максимальной пластификации смесей поликарбонатом обеспечивает, во время эксплуатации композита, сохранение его прочности и, соответственно, стойкость к климатическим влияниям при сохранении цветовой палитры архитектурных изделий в течение длительного периода. Рациональные составы декоративных бетонов использованы при изготовлении элементов декора, которые прошли опытно-промышленную проверку при отделке фасадов жилых зданий и сооружений.

Ключевые слова: декоративный бетон, стеклянная фибра, цеолит, поликарбонат, экспериментально-статистическая модель, прочность, архитектурные элементы.

## ABSTRACT

Dovgan P.M. Dispersed-reinforced decorative concretes for architectural elements. – Manuscript.

The thesis to gain the candidate of science degree on speciality 05.23.05 – Building materials and products. Odessa State Building and Architecture Academy. – Odessa, 2020.

Rational compositions of decorative concrete have been developed based on local quartz sands of natural granulometry and color gamut, and technological conditions to obtain architectural elements of complex shape with enhanced decorative, physical-mechanical and operational properties.

The experimental research to develop the high-performance decorative concrete is aimed at obtaining an artificial decorative stone, which is approximated to natural stone by texture and color gamut, and which is typical for Southern Ukraine, in particular for Odessa – to shelly limestone, that can create competition with natural sandstone. The use of decorative products of light shades will allow to preserve and give buildings or structures aesthetic and artistic expressiveness, create required

landscape design of the outdoors territory and public areas, and lead the surroundings to the necessary style.

To substantiate scientific research of decorative concrete quality criteria, a flowchart of applied empirical studies was used, which is based on the mathematical theory of the experiment. The compiled flowchart has enabled to comprehensively evaluate the logical sequence of phased studies of material characteristics under the joint implementation of full-scale and computational experiments. The raw materials taken in the studies, research methods of performance indicators of the decorative composite are consistent with the target and objectives of scientific work.

The studies on the properties of decorative composite were carried out according to a symmetrical 5-factor plan with 27 experiments. Depending on the nature of the action on fine-grained composite, the variable raw materials are combined into two groups of recipe factors – «*Modifiers of cement-sand matrix*» and «*Parameters of dispersed reinforcement*». According to the obtained results of the full-scale experiment, kinetic curves, correlation were built, optical studies of the macrostructure of composites were carried out. In particular, a complex of experimental-statistical models was built and examined, allowing to assess the impact of two groups of composition factors on analyzed characteristics of decorative fine-grained concretes.

To provide the equal mobility of decorative compositions of the grade S4, a water-cement ratio (W/C) was selected, which was changing depending on the composition of the mixture in the range of 0.360 to 0.553. Due to the fact that W/C and the degree of compaction affect the volume of voids in the fine-grained composite, the relationship of these values to the density of mixtures is considered. A close correlation between the average density and the compaction coefficient was revealed, the correlation coefficient amounted to 0.73, thus concluding about the optimal conditions (duration of mixture compaction, etc.) of forming articles from mobile mixtures. It has been experimentally confirmed that a rational way to improve the efficiency of high-dispersed mineral fillers of the solution is a maximum plasticization of compositions with a superplasticizer. The use of polycarboxylate additive at the level of 0.7 % of the cement mass made it possible to obtain mixtures with a reduced  $W/C \leq 0.4$  and increased density  $\rho_m \geq 2050 \text{ kg/m}^3$ .

The initial process of structure formation of hardening multicomponent compositions was analyzed by a growth curves of plastic strength, and exponential-polynomial models were applied to describe them. The analysis of plastograms for 27 compositions allowed to highlight the formative period of their coagulation spatial structure and the beginning of the period of intense increase in plastic strength. It was revealed that the replacement of a part of binder with a zeolite, in a quantity of 8%, accelerates a process of initial structure formation of the compositions by more than 50%, and the content of hybrid fibers at medium levels ( $0.6 \text{ kg/m}^3$ ) reduces the formative period of a coagulation spatial structure by 65 %. Based on experimental data on structural strength characteristics (plastic and mechanical) «complete curves» of structure formation were obtained for all compositions of the composite. It was confirmed that the initial strength values of composites depend to a large extent on the original water-cement ratio over time. It has been established that highly plasticized compositions of decorative composite contain zeolite and glass fibres, and are

characterized by a rapid set of structural strength. It enables to increase a turnover of shapes in the manufacture of architectural products due to early dismantling and, as a result, to reduce the period of natural hardening of decorative concretes. The analysis of the constructed diagrams by models of mechanical strength showed that the use of zeolite instead of a part of binder, glass fibres and fillers of optimal granulometric composition with maximum plasticization of mixtures with a polycarboxylate additive allows to obtain high-strength decorative concrete ( $f_{cm} \geq 50$  MPa) and maintain its strength in the aquatic environment (evaluated via  $f_{ctfm}$ ). It was discovered that optimum levels of compression strength  $f_{cm}$  and tensile strength under bending  $f_{ctfm}$  are in different zones of the prescription area.

The complex of studies of the operational properties of decorative concrete showed over time that the values of the characteristics depend to a large extent on the appropriate ratio of the initial components. The use of high-dispersed fillers and sands of optimal granulometry contributes to the reduction of integral porosity, also ensures in the operation of the composite a preservation of its strength, and accordingly, resilience to climate impacts while maintaining the color palette of architectural products for long periods. The optimal compositions of the artificial decorative stone are characterized by high rate of technological efficiency ( $S_4$ ,  $\tau \leq 0.95$  h,  $K_T = 1.0$ ), early and normative strength ( $f_{cm} > 40$  and 55 MPa, respectively), carbonization stability, frost resistance (the grade F400) and low values of water absorption and porosity ( $W_M < 2$  %,  $W_o < 4$  %). The rational compositions of decorative concretes are used in the manufacture of decor elements which have been exposed to experimental-industrial operation in the decoration of facades of residential buildings and constructions.

Key words: decorative concrete, glass fibre, zeolite, polycarboxylate, experimental-statistical model, strength, architectural elements.