

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ “ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА”

Марків Тарас Євгенович



УДК 691.32; 691.328

**НАУКОВІ ЗАСАДИ ОТРИМАННЯ БЕТОНІВ З
ПІДВИЩЕНОЮ ТРІЩИНОСТІЙКІСТЮ ЗА РАХУНОК
КЕРУВАННЯ СТРУКТУРОУТВОРЕННЯМ НА РІЗНИХ РІВНЯХ**

05.23.05 – будівельні матеріали та вироби

Реферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Львів – 2024

Дисертацією є рукопис.

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

Науковий консультант:

доктор технічних наук, професор
Бліхарський Зіновій Ярославович,
Національний університет „Львівська
політехніка”, директор навчально-наукового
інституту будівництва та інженерних систем.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
Плугін Дмитро Артурович,
Український державний університет залізничного
транспорту, завідувач кафедри будівельних
матеріалів, конструкцій та споруд;

доктор технічних наук, професор
Барабаш Іван Васильович,
Одеська державна академія будівництва та
архітектури, професор кафедри процесів та апаратів
в технології будівельних матеріалів;

доктор технічних наук, доцент
Сторчай Надія Станіславівна,
Український державний університет
науки і технологій, навчально-науковий інститут
«Придніпровська державна академія будівництва та
архітектури», професор кафедри технології
будівельних матеріалів, виробів та конструкцій.

Захист відбудеться “10” вересня 2024 р. о 10⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої
вченої ради Д 35.052.17 у Національному університеті “Львівська політехніка” за
адресою: 79013, м. Львів, вул. Карпінського, 6, навчальний корпус II, ауд. 212.

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

Реферат розісланий «06» серпня 2024 року.

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



П.Ф. Холод

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Сучасний досвід будівництва та експлуатації будівель і споруд свідчить, що в цементному бетоні в процесі укладання і тверднення можуть з'являтися дефекти, які зумовлюють недобір проектної міцності, однією з причин якого є тріщиноутворення, внаслідок силових і несилових впливів, що можуть призвести навіть до повного його руйнування. Бетони з підвищеною міцністю, які використовуються в сучасних будівлях і спорудах проектується з покращеними показниками довговічності. Оскільки бетони класів С25/30 і вище мають більш крихкий характер руйнування, ніж звичайний бетон, тому для оцінки та прогнозування поведінки бетону під навантаженням використані силові та енергетичні параметри тріщиностійкості.

Узагальнення результатів наукових досліджень у технології бетонів свідчать, що принципово новим підходом підвищення їх довговічності і надійності є впровадження концепції регулювання тріщиностійкості, що ґрунтується на використанні прийомів направленої формування мікро-, мезо- та макроструктури бетону за рахунок раціонального підбору пуцоланових матеріалів, що характеризуються основним та додатковим позитивними ефектами і забезпечують самоармування бетону на рівні мікроструктури, застосування повітровтягувальних добавок, які покращують властивості на мезоструктурному рівні, та полідисперсного армування фіброю різних видів на макрорівні, що в комплексі дозволяє регулювати та збільшити показники тріщиностійкості бетонів з підвищеною міцністю. Застосування запропонованої концепції актуалізує експериментальні дослідження в цьому напрямку та відкриває шлях до розроблення наукових і технологічних засад створення бетонів з підвищеною міцністю та тріщиностійкістю з необхідними показниками якості, що в результаті призводить до економії сировинних та енергетичних ресурсів, надійності будівельних конструкцій під навантаженням та в різних умовах експлуатації.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тема дисертації є складовою частиною науково-дослідних робіт кафедр будівельного виробництва і автомобільних доріг та мостів Національного університету «Львівська політехніка» і виконувалась в межах кафедральних тематик «Розроблення сучасних технологій енергоефективного будівництва, бетонів та розчинів поліфункціонального призначення, ефективних теплоізоляційних, оздоблювальних, гідроізоляційних матеріалів» (номер держреєстрації 0118U000275) і «Розроблення ефективних технологій і матеріалів для будівництва та ремонту дорожніх одягів; діагностика конструктивних елементів автомобільних доріг та дослідження дорожніх матеріалів, виробів, конструкцій і ґрунтів» (номер держреєстрації 0119U103557), міжнародного гранту № IPBU.01.01.00-06.570/11-00 «Розроблення інноваційної моделі транскордонного використання цеолітового туфу», а також науково-дослідної роботи за міжнародним проектом NAWA «Пуцоланові матеріали, отримані з золи-винесення, як добавки нового покоління, що використовуються в технології виробництва «зеленого» бетону» (договір № М/93-2023). Автор був виконавцем та відповідальним виконавцем зазначених

робіт.

Мета роботи і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є розроблення наукових засад отримання бетонів з підвищеною тріщиностійкістю за рахунок керування структуроутворенням на різних рівнях.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- обґрунтувати актуальність вирішення проблеми одержання бетонів з підвищеною міцністю та тріщиностійкістю за рахунок направленої формування структури на різних рівнях;
- визначити напрями модифікування бетонів з підвищеною міцністю мінеральними добавками на рівнях мікро-, мезоструктури бетону та розробити шляхи направленої керування його властивостями;
- розкрити фізико-хімічні закономірності процесів формування структури на мезорівні бетонів з підвищеною міцністю та тріщиностійкістю, модифікованих добавками пластифікуюче-повітровтягувальної дії;
- встановити механізм покращення тріщиностійкості бетонів з підвищеною міцністю, внаслідок використання природних пуцолан в комплексі з пластифікуюче-повітровтягувальними добавками;
- встановити закономірності полідисперсного армування бетонів на мезо- та макрорівнях з використанням системного підходу до вибору видів фібри;
- розробити алгоритм одержання бетонів з підвищеною міцністю та тріщиностійкістю, який передбачає раціональний підбір і використання мінеральних, пластифікуюче-повітровтягувальних добавок та полідисперсне армування різними видами фібри з подальшою їх оптимізацією;
- розробити критерії оцінки тріщиностійкості бетонів підвищеної міцності із заданою надійністю за рахунок регулювання технологічних чинників на поліструктурних рівнях;
- дослідити фізико-механічні властивості та характеристики тріщиностійкості бетонів з підвищеною міцністю та встановити можливість їх регулювання за рахунок зміни технологічних факторів;
- здійснити промислове впровадження бетонів з підвищеною міцністю та тріщиностійкістю, а також обґрунтувати техніко-економічну ефективність їх виробництва і найбільш ефективні напрямки використання.

Об'єкт дослідження - процеси направленої регулювання мікро-, мезо- та макроструктури бетонів з підвищеною тріщиностійкістю, а також особливості формування їх фізико-механічних та експлуатаційних властивостей.

Предмет дослідження - бетони з підвищеною тріщиностійкістю та покращеними експлуатаційними властивостями і довговічністю, отримані за рахунок керування структуроутворенням на різних рівнях.

Методи досліджень. Експериментальні результати отримані із використанням сучасних методів фізико-хімічного аналізу, а саме рентгенівської дифрактометрії, лазерної гранулометрії, комп'ютерної мікротомографії, електронної мікроскопії з мікрозондовим аналізом та ртутної порометрії. Визначення фізико-механічних, будівельно-технічних та експлуатаційних властивостей бетонів здійснювали згідно з загальноприйнятими методиками та

чинними нормативно-технічними документами. Для дослідження тріщиностійкості бетонів використано методи механіки руйнування. Оптимізацію складів розроблених бетонів виконано із використанням експериментально-статистичних методів планування експерименту.

Наукова новизна одержаних результатів. Основні наукові результати, представлені на захист, полягають в тому, що:

- розроблено наукові основи композиційної побудови бетонів з підвищеною тріщиностійкістю, які базуються на комплексному врахуванні процесів структуроутворення на мікро-, мезо- та макрорівнях при цілеспрямованому модифікуванні пуцолановими матеріалами на основі цеолітів, пластифікуючими і повітровтягувальними добавками, а також дисперсному армуванні різними видами фібри;

- подальший розвиток отримали науково-концептуальні засади керування процесами структуроутворення на мікро- та мезорівнях шляхом раціонального підбору пуцоланових матеріалів, а на макрорівні – введенням пластифікуючих і повітровтягувальних добавок та дисперсних волокон. Зміна технологічних факторів та параметрів проектування дає змогу регулювати та прогнозувати поведінку бетонів в докритичній та закритичній стадіях деформування;

- розроблено алгоритм багатопараметричного проектування бетонів з підвищеними міцністю і тріщиностійкістю. Показано, що при використанні в бетоні пуцоланових матеріалів на основі природних і штучних цеолітів, пластифікуюче-повітровтягувальних добавок і фібри різних типів спостерігається синергічне підсилення їх сумісної дії, що дає змогу покращити як силові, так і енергетичні характеристики бетону ($f_{cm.cube}=67,3$ МПа, $f_{ctfm}=9,0$ МПа, при $F_c=3834$ Н: $\chi_F^c=176$ мм; $G_F=350,47$ Дж/м²), а також його довговічність (F300, W16, $K_{3T}=1,23$);

- поглиблено наукові уявлення про використання цеолітових туфів як для запобігання самообезводненню бетонів з низькими значеннями водоцементного відношення, так і як кристалоутворюючої добавки;

- уточнено механізм дисперсного армування бетонів на різних структурних рівнях як за рахунок саморегулювання фазового складу цементного каменю внаслідок формування волокнистих гідратних новоутворень, так і в результаті введення у склад бетону дисперсної фібри різних типів, що дає можливість отримати неперервність армування, створити «Bridge» ефект та підвищити міцність ($f_{cm.cube}=69,5$ МПа, $f_{ctfm}=11,9$ МПа) і покращити параметри тріщиностійкості (при $F_c=5400$ Н: $G_1=660,19$ Дж/м²; $G_F=840,44$ Дж/м²; $\chi_F^c=209$ мм);

- розраховано і запропоновано до використання параметр питомих енерговитрат на локальне статичне деформування в зоні магістральної тріщини (G_1 , Дж/м²), який разом із стандартизованим показником питомих енерговитрат на статичне деформування до моменту початку руху магістральної тріщини (G_i , Дж/м²) більш точно і в повній мірі характеризує поведінку бетону під навантаженням в докритичній і закритичній областях деформування. Встановлено, що для одержання бетонів з підвищеною тріщиностійкістю значення критерія крихкості χ_F^c має перевищувати 140 мм.

Практичне значення одержаних результатів:

- розроблено бетони з регульованими характеристиками тріщиностійкості,

підвищеними показниками міцності на розтяг при згині ($f_{ctfm}=9-11$ МПа) та довговічності (марка за морозостійкістю не менше F200, вищі коефіцієнти корозійної стійкості, глибина проникнення води до 3,5 мм);

– за алгоритмом багатопараметричного проектування складів розроблено та впроваджено модифікований бетон класу за міцністю на стиск C25/30 та підвищеною корозійною стійкістю на ТзОВ «Угринів Еко Ферм» при бетонуванні ванни тваринницького комплексу із забезпеченням підвищеної тріщиностійкості, внаслідок оптимізації технологічних факторів на різних структурних рівнях, а саме використання пуцоланових матеріалів з необхідними основним і додатковим ефектами та хімічних добавок пластифікуюче-повітровтягувальної дії;

– впроваджено бетони з підвищеною міцністю та тріщиностійкістю на основі БСГ В40Р4F200W10 на ПП «Застава» при будівництві площадки для складування бетонних виробів та БСГ В40Р4F200W10 на ПП «Захід-Бетон-Буд» при будівництві під'їзної дороги до складських приміщень у с. Малехів Львівської ОТГ;

– проведено дослідно-промислову апробацію розроблених бетонів з підвищеною тріщиностійкістю ($G_F=350$ Н/м, $\chi_F=176$ мм) представництвом «Дрог-Буд» Сп. з о.о. при будівництві мостового переходу в с. Корчів;

– використання сучасних підходів при проектуванні складів бетонів з підвищеною міцністю дало змогу покращити тріщиностійкість та експлуатаційні властивості бетонів, які використані для бетонування монолітних стійок опор, ростверків, підферменників, ригелів, буронабивних паль при будівництві мостового переходу через р. Західний Буг на а/д 0141602 Сокаль-Стоянів на км 1+693 ТОВ «Автомагістраль-Південь»;

– оптимізація технологічних факторів на різних структурних рівнях забезпечила одержання однорідних самоущільнювальних бетонних сумішей та бетонів з підвищеною міцністю, тріщиностійкістю, покращеними експлуатаційними властивостями та досягнення високої якості бетонних робіт в умовах знакозмінних та від'ємних температур, що створило можливість вкладання сумішей без ущільнення механічним способом при бетонуванні монолітних, складних за формою, стійок опор при будівництві мостового переходу через р. Західний Буг на а/д 0141602 Сокаль-Стоянів на км 1+693 ТОВ «Автомагістраль-Південь»;

– результати дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі Національного університету «Львівська політехніка» при викладанні дисциплін «Будівельне матеріалознавство», «Бетони та будівельні розчини, заповнювачі для бетонів, ч.1 та ч.2», «Технологічний супровід виготовлення монолітних бетонних і залізобетонних конструкцій» для студентів 192 Будівництво та цивільна інженерія першого (бакалаврського) рівня вищої освіти (вибірковий блок «Технології будівельних конструкцій, виробів та матеріалів») та «Технології моделювання інформації у будівельному виробництві» для студентів другого (магістерського) рівня вищої освіти (ОПП «Технології будівельних конструкцій, виробів та матеріалів»), а також при підготовці здобувачів третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти за спеціальністю 192 Будівництво та цивільна інженерія.

Особистий внесок здобувача. Дисертаційна робота ґрунтується на матеріалах науково-дослідних робіт, виконаних автором на кафедрі будівельного виробництва Національного університету «Львівська політехніка» у 2007–2023 рр. Автору належать постановка мети і завдань дисертації, виконання, оброблення, аналіз та інтерпретація результатів експериментальних досліджень, узагальнення інформації, формулювання висновків. Здобувач брав участь у дослідних та дослідно-промислових випробуваннях розроблених бетонів з підвищеною міцністю та тріщиностійкістю, одержаних керуванням структуроутворенням на різних рівнях. Основні наукові результати дисертації одержані здобувачем особисто, окремі складові теоретичних та експериментальних досліджень виконано із співавторами наукових праць, що вказано в списку публікацій. Участь автора в спільних публікаціях відображена у списку опублікованих праць.

Дисертаційні роботи, в яких використано результати спільних робіт, представлено авторефератами:

Гуняк О. М. Високоміцні бетони транспортного призначення з підвищеною довговічністю: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.23.05 / Національний університет «Львівська політехніка». Львів, 2019. 21 с.;

Турба Ю. В. Тріщиностійкість дисперсно-армованого бетону: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.23.05 / Національний університет «Львівська політехніка». Львів, 2021. 21 с.

Дисертація здобувача не містить матеріалів кандидатської дисертаційної роботи.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати досліджень були представлені на конференціях та семінарах: XII Міжнародній науково-практичній конференції «Дні сучасного бетону» (Запоріжжя, 2012), 19 Internationale Baustofftagung (Веймар, Німеччина, 2015), Міжнародній науково-практичній конференції «Ефективні технологічні рішення у будівництві з використанням бетонів нового покоління» (Харків, 2015), I-III Всеукраїнській науково-технічній конференції «Сучасні тенденції розвитку і виробництва силікатних матеріалів» (Львів, 2007, 2008, 2016), VI Міжнародній конференції SIKA по бетонам (Київ, 2016), XVI International scientific conference «Current issues of civil and environmental engineering» (Кошице, Словаччина, 2017), 20 Internationale Baustofftagung (Веймар, Німеччина, 2018), The 10th International Conference on the Occurrence, Properties, and Utilization of Natural Zeolites (Краків, Польща, 2018), Міжнародному семінарі «Моделювання і оптимізація будівельних композитів» (Одеса, 2018), International Conference «Current Issues of Civil and Environmental Engineering Lviv – Košice – Rzeszów» (Львів, 2019), II International Scientific Conference «EcoComfort and Current Issues of Civil Engineering» (Львів, 2020), 9th Croatian-Slovenian-Serbian Symposium on Zeolites (Спліт, Хорватія, 2021), III International Scientific Conference «EcoComfort and Current Issues of Civil Engineering» (Львів, 2022).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 39 наукових праць, з них 14 статей у наукових фахових виданнях України, 12 – у виданнях, які входять до міжнародних наукометричних баз (з них 9 у Scopus), та у періодичних виданнях інших держав, 1 патент, 1 навчальний посібник, 11 публікацій апробаційного

характеру.

Структура та обсяг дисертації. Основна частина дисертаційної роботи викладена на 269 сторінках друкованого тексту та складається із вступу, шести розділів та загальних висновків. Повний обсяг дисертації становить 360 сторінок; робота містить 57 таблиць, 141 рисунок, список використаних джерел із 381 найменування та 9 додатків на 21 сторінці.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність дисертаційної роботи, сформульовано мету, завдання досліджень, робочу гіпотезу, представлені найважливіші теоретичні положення і закономірності, які отримані автором та мають наукову новизну та практичну цінність.

У першому розділі проведено аналітичний огляд літератури, присвячений проблемі розроблення бетонів з підвищеною міцністю та тріщиностійкістю, які одержані за рахунок керування структуроутворенням на різних рівнях, а також визначено теоретичні передумови досліджень.

Для реалізації завдання підвищення надійності та довговічності бетонних конструкцій необхідно враховувати сумісну дію деформування і тріщиноутворення, оцінити процеси розвитку та поширення тріщин з метою забезпечення необхідної тріщиностійкості (С.Й. Солодкий, В.М. Вировой, Д.А. Плугін та ін.). Принцип рецептурно-технологічної досконалості бетонів з підвищеною міцністю і тріщиностійкістю базується на багаторівневому керуванні структуроутворенням. Найефективнішим методом підвищення тріщиностійкості на мезо- та макрорівні є гальмування тріщин структурними елементами, зокрема в'язкопластичними компонентами, дисперсними армувальними волокнами – сталевими, поліпропіленовими, скляними, базальтовими (С.Й. Солодкий, А.А. Плугін, В.М. Дерев'янко, О.Ю. Дорошенко, А.В. Мішутін, Р. К. Mehta, П. Пейроу, R. Zollo, J. Broda та ін.), що дає змогу не тільки підвищити роботу тріщиноутворення, але й принципово змінити умови розподілення енергії та концентрації напружень при дії на матеріал зовнішніх механічних впливів.

Інноваційним напрямом в технології виготовлення таких бетонів є модифікування мікроструктури шляхом раціонального підбору та використання пуцоланових матеріалів з особливими властивостями (штучні, природні цеоліти та ін.), що володіють позитивним основним і додатковим ефектами (П.В. Кривенко, Л.Й. Дворкін, М.А. Саницький, М.В. Суханевич, В.І. Гоц, З.Я. Бліхарський, Г.М. Шабанова, Х.С. Соболев, О.В. Кондращенко, Т.П. Кропивницька, С.О. Кровяков, Л.О. Шейніч, К.К. Пушкарьова, І.І. Руденко, І.В. Барабаш, О.С. Борзяк, Z. Giergiczny, J. Malolepshy, K. Scrivener, A. Nonat, J. Plank, H. Taylor, M. Schneider, J. Stark, M. Shekarchi, N. Stevulova, B. Uzal, D. Jana, C. Bilim та ін.).

Значний потенціал розвитку сучасних технологій бетонів забезпечують різні види добавок-модифікаторів, які здатні регулювати та суттєво впливати на технологічні властивості бетонних сумішей та бетонів. На основі ґрунтового аналізу літературних джерел, наукових праць, присвячених використанню добавок до бетонів (Л.Й. Дворкін, П.В. Кривенко, Р.Ф. Рунова, М.А. Саницький,

О.В. Ушеров-Маршак, У.Д. Марушак, Н.С. Сторчай, В.В. Троян, Р. Aitcin, E. Tunstall, T. Ley, K. Folliard, G. Gelardi, M. Collepardi, Z. Sun, G.W. Scherer, L. Struble, P. Monteiro та ін.), обґрунтовано новий напрям в технології бетонів, що встановлює зв'язок між структурою і параметрами тріщиностійкості бетонів та передбачає проектування бетонів з підвищеною міцністю та тріщиностійкістю за рахунок раціонального підбору додаткових компонентів, які забезпечують формування впорядкованої структури на мікро- та мезорівнях, а також неперервне комплексне полімасштабне армування бетонів направленим формуванням фазового складу цементної матриці та використанням фібри різних видів для одержання бетонів з підвищеною міцністю, тріщиностійкістю та довговічністю.

У технології бетонів з підвищеною міцністю розв'язання проблеми забезпечення тріщиностійкості набуває особливої уваги, оскільки впливає на довговічність і, як наслідок, дозволяє зменшити використання природних сировинних і енергетичних матеріалів та викиди CO₂ в атмосферу. Крім екологічних переваг, також знижуються інвестиційні витрати на експлуатацію та проведення ремонтно-відновлювальних робіт. Це відповідає вимогам екологічного будівництва. Запроваджені стандарти серії ISO 14000, методології оцінки життєвого циклу (LCA) та потенціалу глобального потепління (GWP) слугують інструментами оцінки, які дають аналітичні результати для вирішення екологічних проблем. Це вимагає необхідності врахування комплексу експлуатаційних та природно-кліматичних впливів, властивостей компонентів та технологічних факторів при проектуванні бетонів.

Аналіз відомих закономірностей синтезу міцності та формування направленої дефектної структури бетонів, а також зародження і поширення тріщин у бетонах дає підстави сформулювати наукову гіпотезу про доцільність розроблення бетонів з підвищеною тріщиностійкістю за рахунок керування структуроутворенням на різних рівнях, що включає модифікування та направлене формування фазового складу цементної матриці пуцолановими матеріалами на основі цеолітів та реалізацію функції поглибленої гідратації, використанням добавок пластифікуюче-повітровтягувальної дії з метою забезпечення впорядкованої структури на мікро- та мезорівнях, що разом із застосуванням комплексного дисперсного армування фіброю на макрорівні забезпечує досягнення нормативних характеристик міцності, експлуатаційних властивостей та довговічності.

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

Другий розділ присвячено вибору напрямів досліджень для розроблення бетонів з підвищеною тріщиностійкістю, а також наведені методологічні принципи підбору, дослідження вихідних матеріалів та використаним методам досліджень.

Для досягнення мети та вирішення поставлених завдань розроблено блок-схему досліджень та алгоритм багатопараметричного проектування бетонів з підвищеною тріщиностійкістю, що передбачає використання ефективного підходу до раціонального підбору пуцоланових матеріалів, їх обов'язкове використання при застосуванні в технології бетону портландцементу типу І, модифікування структури бетону добавками пластифікуюче-повітровтягувальної дії, а також

дисперсне армування бетону волокнами різних типів.

Для бетонів з підвищеною тріщиностійкістю та довговічністю суттєву роль відіграють пуцоланові матеріали, які характеризуються, крім основного ефекту - пуцоланічної активності, також позитивними додатковими ефектами.

Як мінеральні добавки використані побічні продукти промисловості - гранульований доменний шлак (ГДШ) та зола-винесення (ЗВ), природні (цеолітовий туф), а також штучні пуцоланові матеріали (Na-P1, Na-X, Na-A, МСМ-41). При дослідженні пуцоланічної активності за здатністю поглинати СаО з його насиченого розчину встановлено, що показники активності штучних пуцолан перевищують активність побічних продуктів промисловості та природного цеоліту, що підтверджується кінетичними кривими зв'язування СаО (рис. 1, а). Кількість зв'язаного кальцію оксиду з вапняного розчину добавками синтетичних цеолітів Na-P1 та Na-X через 2 доби становить відповідно 39,3 та 35,3 мг СаО/г. Найнижчим значенням кількості поглинутого СаО характеризується гранульований доменний шлак – 10,0 мг СаО/г. Через 2 доби кількість зв'язаного оксиду кальцію з вапняного розчину синтетичним цеолітом Na-A становить 30,8 мг СаО/г, що перевищує показник цеолітового туфу у 1,1 рази. Добавка МСМ-41 характеризується підвищеною активністю і через 2 доби кількість зв'язаного оксиду кальцію становить 86,3 мг СаО/г. Через 7 діб взаємодії пуцоланова активність природного та синтетичних цеолітів Na-P1 та Na-X коливається в межах 60,4–72,5 мг СаО/г. У той час, як добавка МСМ-41 характеризується найвищими показниками пуцоланової активності 149,7 мг СаО/г.

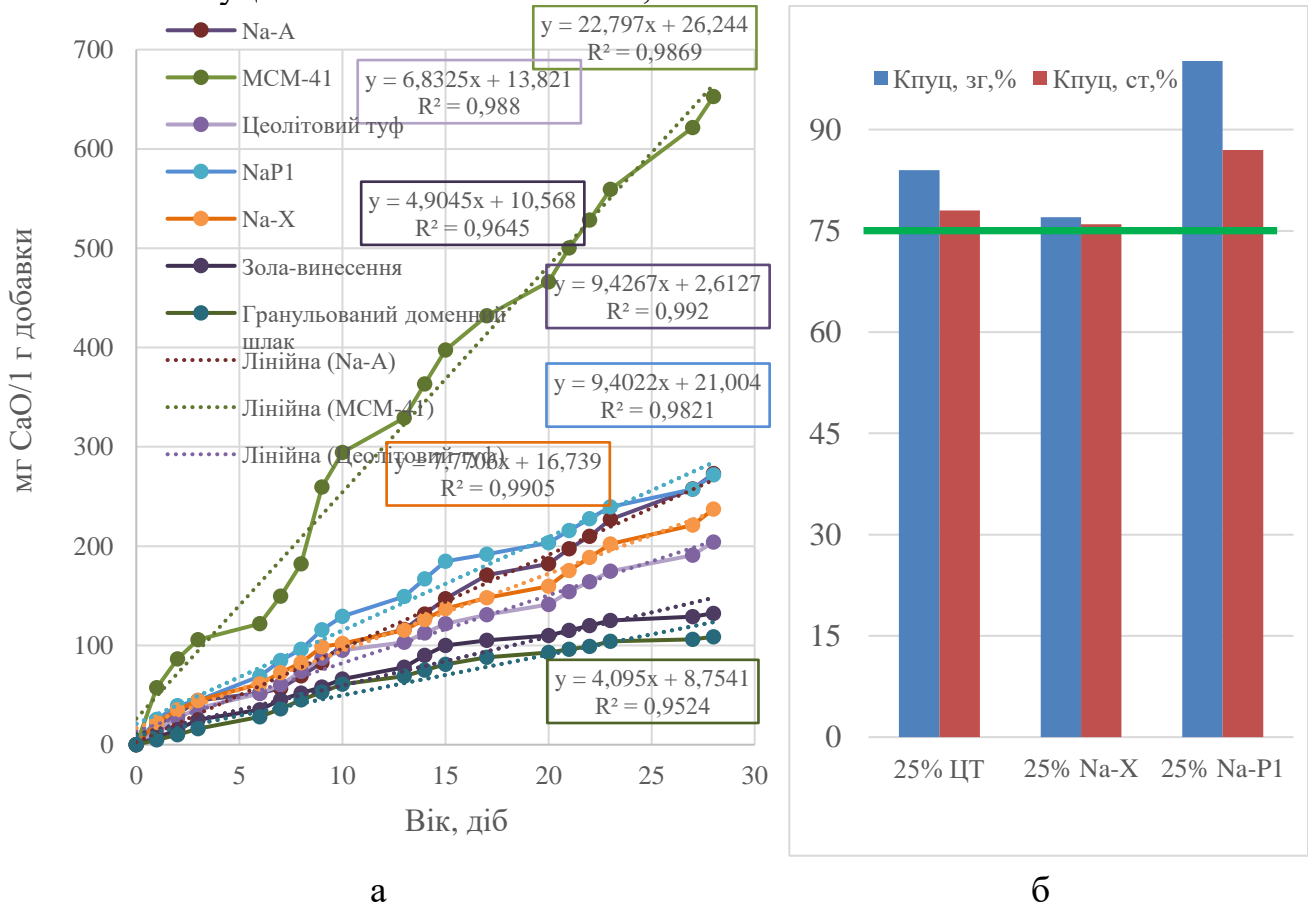


Рисунок 1 - Активність пуцоланових матеріалів за поглинанням СаО з насичених розчинів протягом 28 діб (а) та за ДСТУ EN 450-1:2019 (б)

Показано, що через 28 діб активність досліджуваних матеріалів становить 204,2; 271,9 та 237,2 мг СаО/г для цеолітового туфу, цеоліту Na-P1 та Na-X відповідно. Тоді як для добавок Na-A та МСМ-41 пуцоланова активність через 28 діб досягає 273,0 та 652,6 мг СаО/г відповідно. Встановлено, що за здатністю поглинати СаО з його насиченого розчину мінеральні добавки можна розмістити в такому порядку за зростанням: гранульований доменний шлак → зола-винесення → природні пуцолани → штучні пуцолани.

Активність пуцоланових матеріалів досліджено також за ДСТУ EN 450-1:2019, враховуючи, що в складі портландцементу вони проявляють пуцоланічні властивості не тільки за рахунок взаємодії з Са(ОН)₂. Як видно з рис. 1, б, досліджені пуцоланові матеріали відповідають вимогам стандарту (через 28 діб тверднення значення коефіцієнта пуцоланічної активності на стиск повинно становити $K_{\text{пуц}}^{28} \geq 0,75$).

Оскільки в результаті введення пуцоланових матеріалів відбувається зростання водопотреби бетонних сумішей, для регулювання їх технологічних властивостей в роботі використано пластифікуюче-повітровтягувальні добавки різної генерації.

Дисперсне армування бетонів фіброю (сталевою, поліпропіленовою, скловолоконною та базальтовою) є одним з основних шляхів покращення тріщиностійкості бетонів з підвищеною міцністю, які мають більш крихкий характер руйнування внаслідок формування щільної структури. Використовуючи бетони з номінальним складом Ц:П:Щ=1:2,23:3,19 при В/Ц=0,44 (марка бетонної суміші за осадкою конуса S1) та витраті портландцементу 350 кг/м³, вивчено вплив різних видів фібри на їх властивості. Прийнято такі умовні позначення серій бетонів залежно від виду використаної фібри ((довжина/діаметр фібри, мм) _ (витрата фібри, кг/м³ бетонної суміші)): БФ – без армування фіброю; ФПП1 – фібра поліпропіленова пряма ((12/0,019)_(0,9)), ФПДП2 – фібра поліпропіленова з деформованою поверхнею ((45/0,8)_(5,0)), ФПП3 – фібра поліпропіленова пряма ((54/0,069)_(1,0)), ФПП4 – фібра поліпропіленова пряма ((19/0,4)_(0,9)); ФБ1 – фібра базальтова ((24/0,017)_(1,0)), ФБ2 – фібра базальтова ((50/0,017)_(1,0)); ФМ – фібра металева ((52/1,0)_(20,0)). Слід відзначити, що міцність на стиск не є основною характеристикою бетонів, армованих фіброю. Метою такого армування є зміцнення, головним чином, за рахунок зростання міцності на розтяг при згині. Так, вищими показниками міцності при згині на 1,4 і 11,3% характеризуються фібробетони серії ФПП1 та ФПДП2 відповідно порівняно з бетоном БФ. Результати досліджень енергетичних характеристик дисперсноармованих різними фібрами бетонів, які доповнюють уявлення про поведінку бетонів під навантаженням, представлені на рис. 2. Встановлено, що бетон серії ФМ має суттєву перевагу при роботі в докритичній стадії деформування ($G_i=191,92$ Дж/м²). Слід відзначити, що енергетичні показники підтверджують підвищений опір тріщиноутворенню бетонів, армованих фіброю серій ФПП1, ФПДП2 та ФПП4 на закритичній стадії руйнування. Так, значення питомих енерговитрат (G_1) на локальне статичне деформування в зоні магістральної тріщини в 1,1 - 1,3 рази перевищують показник бетону базової серії.

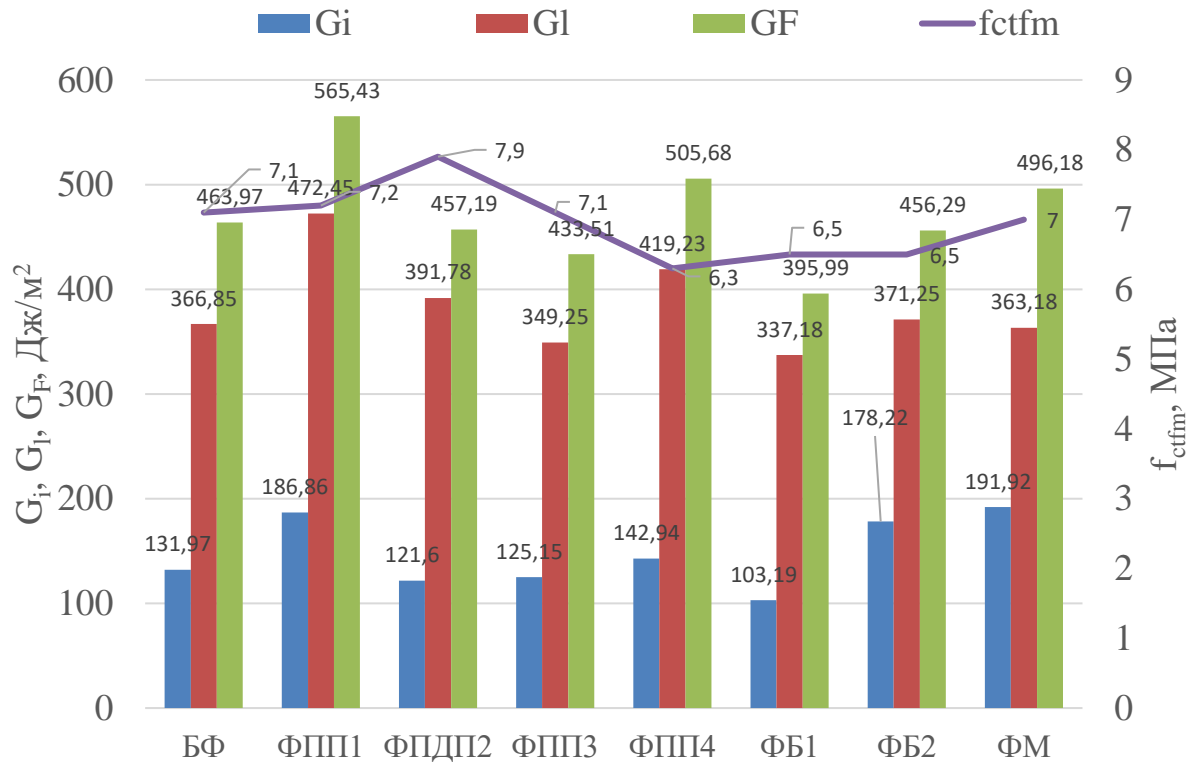


Рисунок 2 – Вплив різних видів фібри на міцність на розтяг при згині та енергетичні характеристики тріщиностійкості бетонів

Встановлено, що зміна рецептурно-технологічних чинників дозволяє регулювати показники міцності та тріщиностійкості бетонів. Показано, що бетони однакової міцності на стиск можуть мати різний рівень тріщиностійкості. При цьому водоцементне відношення та витрата портландцементу відіграють ключову роль в забезпеченні тріщиностійкості бетонів. Отримані результати визначили подальший напрям досліджень, вибір та оптимізацію технологічних факторів для одержання бетонів з підвищеною тріщиностійкістю.

Третій розділ присвячено вивченню впливу пуцоланових матеріалів та пластифікуючих добавок на властивості бетонів, а також процесів структуроутворення їх цементної матриці на мікрорівні.

Досліджено бетони з добавкою штучних цеолітів Na-P1, Na-X та цеолітового туфу (ЦТ). Марка бетонної суміші за осадкою конуса S4, В/Ц=0,4. Витрата компонентів: Ц=450 кг/м³, П=520 кг/м³; Щ₅₋₁₀=1250 кг/м³, 0,6 мас.% суперпластифікатора. У бетонах Na-P1-10, Na-X-10, ЦТ-10 10 мас.% портландцементу замінено на відповідні пуцоланові матеріали. Показано, що для того, щоб компенсувати воду, яка поглинулася використаними штучними пуцоланами, необхідну для забезпечення проектної марки за легкоукладальністю, треба вводити додаткову кількість суперпластифікатора, яка становила 1 мас.%. Встановлено, що найвищою міцністю на розтяг при згині ($f_{ctfm}=7,8$ МПа) та при стиску ($f_{cm.cube}=53,5$ МПа) через 28 діб тверднення характеризується дрібнозернистий бетон з 10 мас.% штучного цеоліту Na-P1, що на 8 і 6% та 24 і 18% перевищує міцність бетону з 10 мас.% цеолітового туфу та контрольного бетону відповідно (рис. 3).

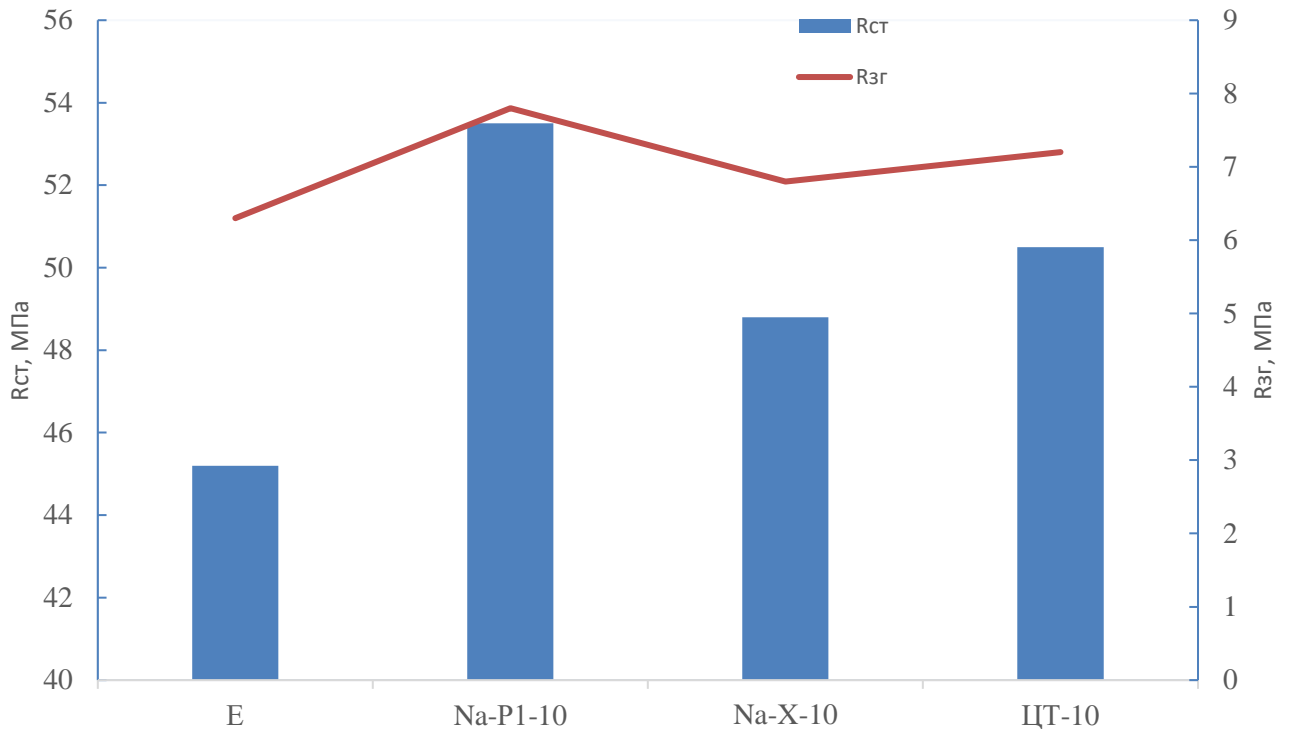


Рисунок 3 - Границя міцності при стиску і на розтяг при згині бетонів через 28 діб тверднення

Дослідженнями показано, що вивчення кінетики процесів гідратації і тверднення цементних систем з досліджуваними пуцолановими матеріалами, а також генезису їх мікроструктури має велике значення, тому що відкриває шлях до наукового прогнозування їх властивостей. Методами фізико-хімічного аналізу вивчено особливості гідратації в'язучих матеріалів, що містять 25 мас.% цеолітового туфу та 25 мас.% штучного цеоліту Na-P1 (рис. 4). Показано, що використання пуцоланових матеріалів цеолітового типу, які є в системі джерелом активних SiO_2 та Al_2O_3 , призводить до зміни габітусу і морфології гідратних новоутворень. Так, в структурі цементної матриці не спостерігаються блоки портландиту, натомість відзначається більша кількість субмікросталічних кристалів гідросилікатів, гідроалюмосилікатів і гідроалюмінатів кальцію та еtringіту. Формується однорідна щільна мікроструктура цементної матриці, насичена голчасто-волокнистими новоутвореннями, які створюють ефект самоармування в зоні контактної взаємодії. Відбувається кольматація порового простору, зменшується кількість дефектів та дислокацій, що в комплексі призводить до підвищення опору руйнуванню та збільшення міцності на розтяг при згині. Одержані результати свідчать про високу ефективність штучних пуцолан у складі бетонів. Разом з тим, слід відзначити, що на сьогоднішній день вони поки що виготовляються в невеликих кількостях, але, як показали проведені дослідження, є перспективними і високоефективними пуцолановими матеріалами.

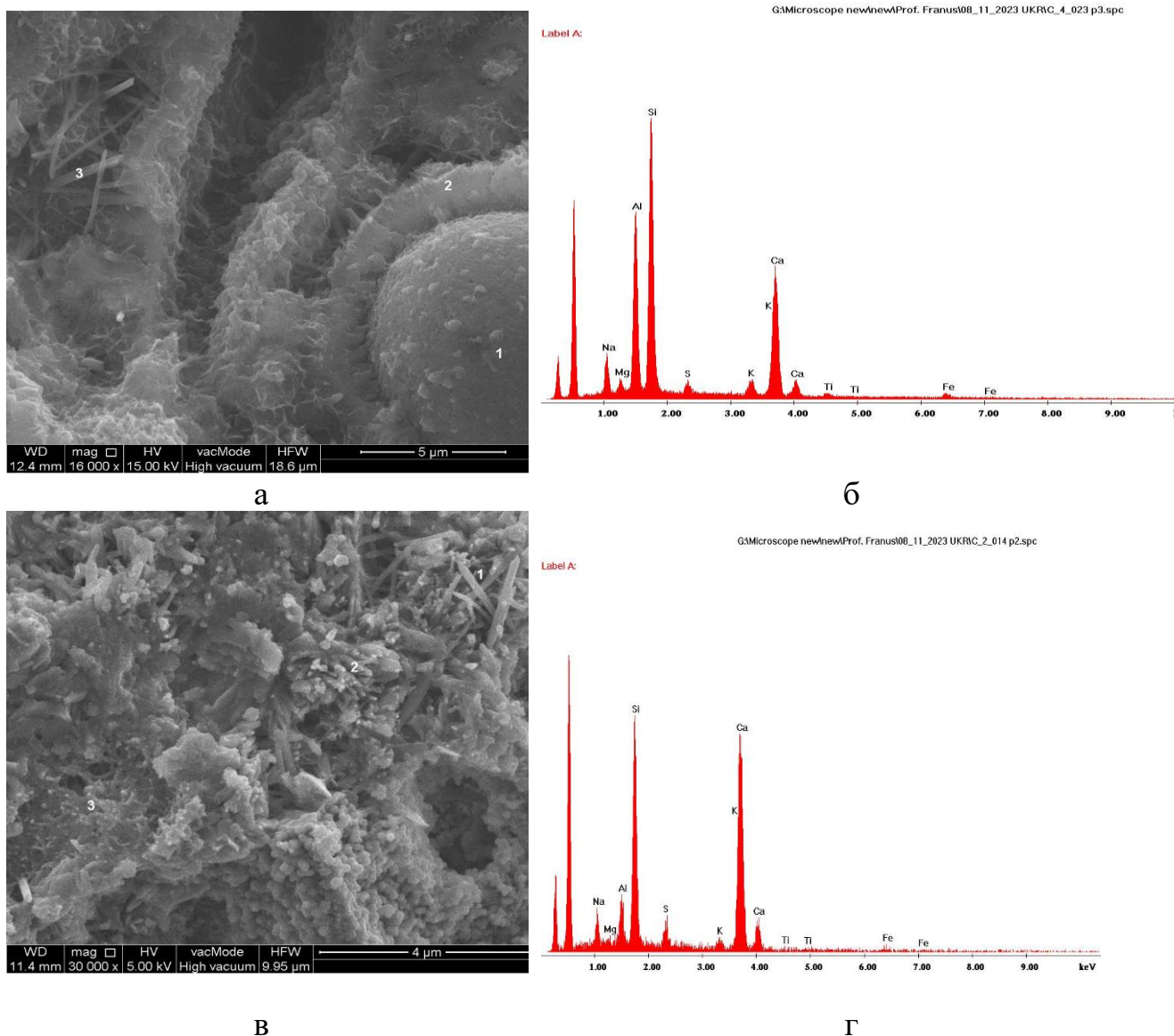


Рисунок 4 – Мікрофотографії та спектри рентгенівського випромінювання цементного каменю на основі 75 мас.% ПЦ I+25 мас.% Na-P1 (а, б) та 75 мас.% ПЦ I+25 мас.% полідисперсний цеолітовий туф (в, г), через 7 діб тверднення в нормальних умовах

Крім досліджених штучних пуцолан, проведені випробування портландцементів та бетонів з добавками традиційних побічних продуктів промисловості, таких як гранульований доменний шлак і золи-винесення з різною дисперсністю. Встановлено, що ступінь заміни портландцементу на мінеральні добавки залежить від їх питомої поверхні. Показано, що збільшення тонини помелу гранульованого доменного шлаку з 310 до 500 м²/кг призводить до зростання міцності в'язучого на 47 і 18% через 2 і 28 діб тверднення відповідно. Отримані результати показують ефективність використання неактивованої золи-винесення для виробництва портландцементу та бетону та необхідність постійного контролю зернового складу золи-винесення для визначення ступеня заміни клінкеру в цементі та цементу в бетоні. Виявлено позитивний синергійний ефект поєднання гранульованого доменного шлаку і золи-винесення на міцність при стиску бетону.

Кінетика набору міцності портландцементів і бетонів, що містять ці пуцоланові матеріали, нижча на ранньому етапі формування структури, але прискорюється у більш пізній період за рахунок пуцоланової реакції.

Результати досліджень свідчать, що неактивована зола-винесення також дозволяє оптимізувати розподіл частинок за розміром у бетонах з підвищеною тріщиностійкістю, щоб забезпечити більш тривалий час гідратації цементу та призводить до отримання більш щільної та компактної структури з часом завдяки її ролі як матеріалу з пуцолановими властивостями, так і як мікронаповнювача. Одночасне використання матеріалів різної природи активності, таких як ГДШ (приховані гідравлічні властивості) і ЗВ (пуцоланічні) дозволяє покращити мікроструктуру бетонів за рахунок утворення додаткової кількості еtringіту та тоберморитоподібних низькоосновних гідросилікатів кальцію в неклінкерній частині цементної складової бетону. Водопоглинання знижується з 5,5 до 4,7% і, як наслідок, підвищується стійкість до пошкоджень, спричинених замерзанням та відтаванням. Так, спад міцності на стиск знижується з 30,2 для бетону контрольного складу до 24,1% для бетону CS10(380)F10(510), що містить 10 мас.% гранульованого доменного шлаку з питомою поверхнею 380 м²/кг та 10 мас.% золи-винесення з питомою поверхнею 510 м²/кг, через 100 циклів заморожування-відтавання. Внаслідок більш щільної структури покращується стійкість арматури в таких бетонах і підвищується довговічність залізобетонних виробів.

Слід відзначити, що скорочення виробництва і відповідне зменшення кількості відходів на теплових енергогенеруючих та металургійній підприємствах передбачає перехід на більш доступні пуцоланові матеріали. До таких матеріалів можна віднести цеолітовий туф, який характеризується необхідною пуцоланічною активністю. Використання полідисперсного цеолітового туфу, який містить фракції 60 - 160 мкм, дає змогу досягнути неперервності гранулометричного складу в системі “портландцемент-цеолітовий туф-дрібний заповнювач”, реалізувати в більш повній мірі його реакційну здатність, прискорити гідратацію портландцементу за рахунок ефекту дрібних порошків та забезпечити можливість поглибленої гідратації. Використаний цеолітовий туф характеризується бімодальною кривою розподілу частинок за розмірами, яка вказує на переважання в його складі зерен в діапазоні 0,01-90 мкм з максимальним вмістом частинок діаметром 25 мкм і 90-2000 мкм (найбільший вміст частинок діаметром 300 мкм). Частинки першого діапазону такого полідисперсного цеолітового туфу будуть забезпечувати пуцоланічну активність, а другого - резерв води для поглибленої гідратації портландцементу. За допомогою методу ортогонального центрального композиційного планування експерименту проведено оптимізацію складу бетону (Ц:П:Щ=1:1,7:3,5; Ц=350 кг/м³, марка за осадкою конуса бетонної суміші S3) з полідисперсним цеолітовим туфом та полікарбоксилатним суперпластифікатором Viscocrete 5320 за критерієм міцності і встановлено, що їхній оптимальний вміст становить 10 і 1 мас.% відповідно. Використання цих добавок в оптимальній кількості дає змогу отримати композит з міцністю на розтяг при згині та стиск через 28 діб тверднення 7,6 та 71,2 МПа відповідно (рис. 5).

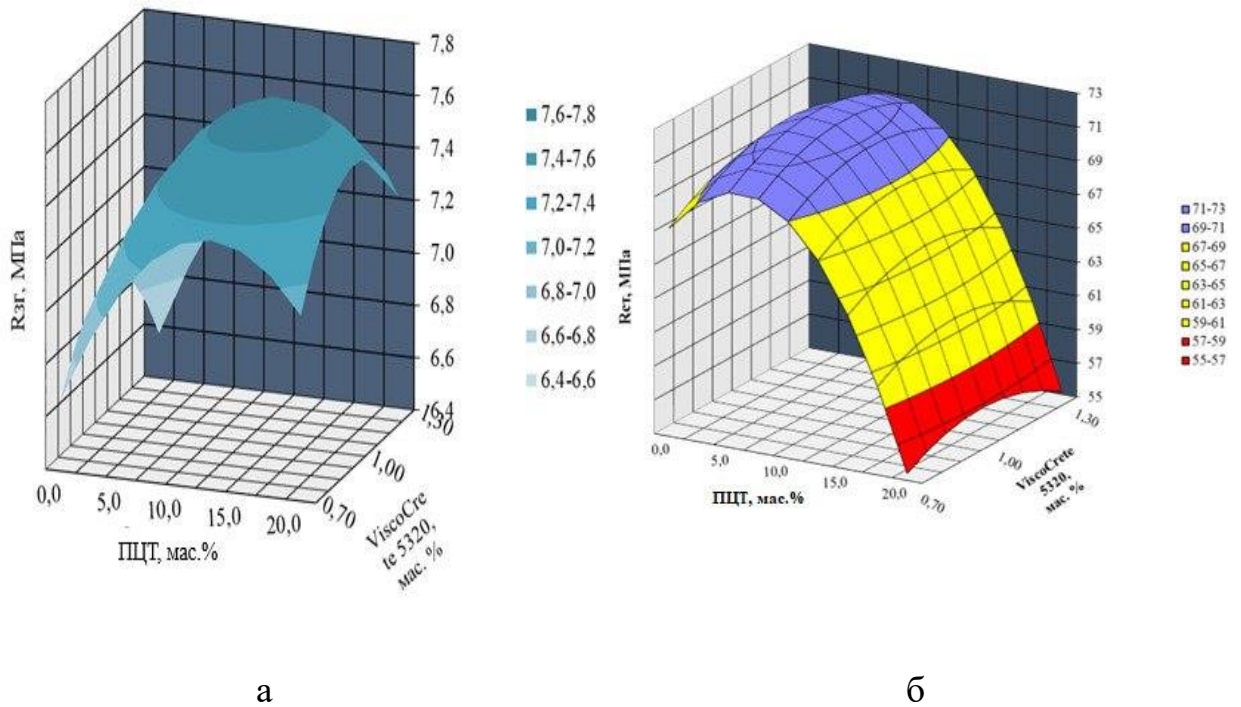


Рисунок 5 - Ізолінії рівної міцності на розтяг при згині (а) та стиску (б) бетонів у віці 28 діб

Підвищена границя міцності на розтяг при згині дрібнозернистих бетонів з добавкою полідисперсного цеолітового туфу, яка є важливою для забезпечення покращених параметрів тріщиностійкості, зумовлена унікальними властивостями будови цеоліту, який має наскрізно-канальну внутрішньокристалічну порову структуру, що забезпечує високий рівень масопереносу та інтенсивне зародкоутворення в об'ємі тверднучої системи (див. рис. 4). В результаті формується однорідна щільна мікроструктура цементної матриці, насичена голчасто-волокнистими гідросилікатами кальцію, які кольматують поровий простір та армують зони контактної взаємодії, забезпечуючи ефект самоармування бетону, підвищують опір руйнуванню та збільшують міцність на розтяг при згині.

У четвертому розділі представлені результати дослідження впливу пластифікуюче-повітровтягувальних добавок на властивості бетонів з цеолітовим туфом на рівні мезоструктури.

Використання полідисперсного цеолітового туфу дає змогу досягнути найвищого рівня неперервності гранулометричного складу в діапазоні мезоструктури та максимальної щільності упакування частинок. Показано, що полідисперсний цеолітовий туф є ефективним для забезпечення поглибленої гідrataції портландцементу. Досліджено міцність бетону з В/Ц=0,37, номінального складу за масою 1:1,65:2,88, Ц=400 кг/м³, марки бетонної суміші за осадкою конуса S1 без пуцоланового матеріалу (К) та з 10 мас.% полідисперсного цеолітового туфу (ПЦТ) в різних умовах тверднення (рис. 6). Встановлено, що бетони з 10 мас.% полідисперсного цеолітового туфу в повітряно-сухих умовах тверднення характеризуються вищою міцністю, ніж контрольний бетон та бетон з полідисперсним перлітом ПП. Полідисперсний цеолітовий туф, маючи внутрішні

резервуари води забезпечує рівномірний перебіг реакцій гідратації і розвиток міцності цементобетону в таких умовах. Створення умов для поглибленої гідратації при введенні цеолітового туфу дає змогу попередити раннє тріщиноутворення у повітряно-сухих умовах.

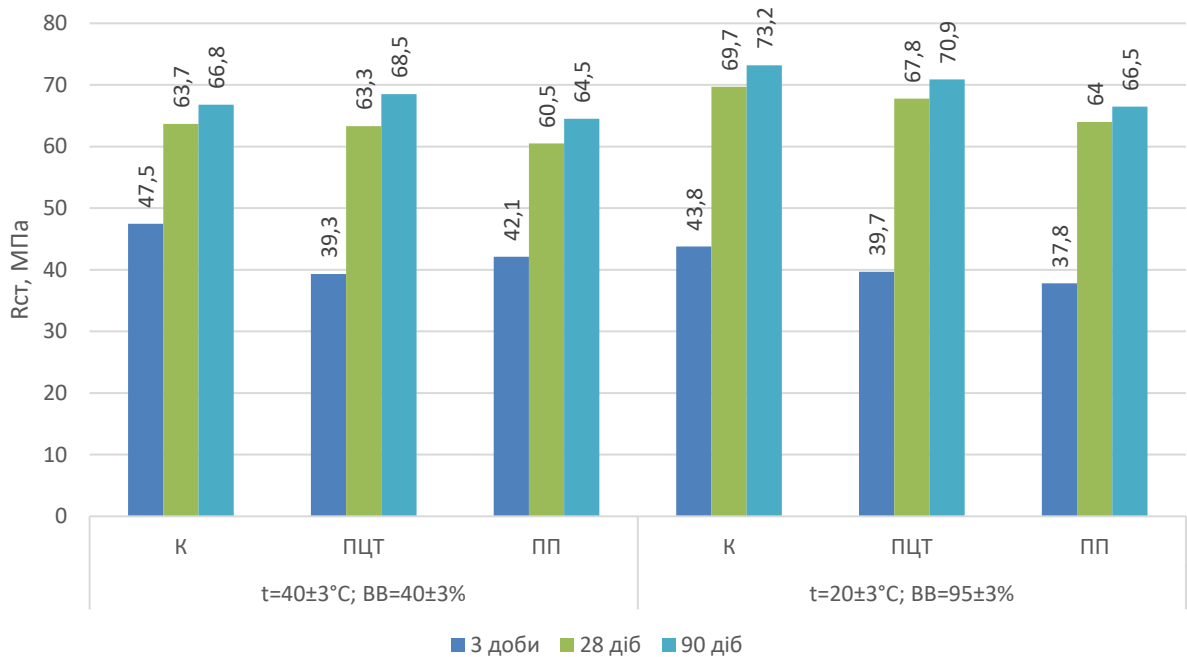


Рисунок 6 - Міцність на стиск бетонів у різних умовах тверднення

Встановлено вплив повітровтягувальної добавки як важливого компонента бетонної суміші на властивості розчинової частини бетону та його експлуатаційні характеристики і довговічність в умовах поперемінного заморожування і відтаювання. Показано, що при введенні повітровтягувальної добавки (0,75 мас.%) в розчинову частину бетону при сталій консистенції суміші (РК=125-135 мм) В/Ц відношення залежить від номінального складу та збільшується зі зменшенням співвідношення портландцемент:заповнювач майже в 1,7 і 2,3 рази для розчинів із номінальним складом за масою портландцемент:заповнювач 1:3 і 1:4 відповідно порівняно з складом 1:2. Кореляція між об'ємом втягнутого повітря та густиною суміші не є строгою. Показано, що густина та міцність на стиск розчинів також залежить від номінального складу суміші. Збільшення міцності на стиск на 13,9% для складу портландцемент:заповнювач=1:2, що містить 11,4% втягнутого повітря, спостерігається навіть порівняно з контрольним розчином такого ж номінального складу за масою через 28 діб тверднення. При сталому ж В/Ц=0,5 розплив конуса розчинової суміші покращується на 12-80% за рахунок так званого "ball-bearing" ефекту, а густина зменшується на 11-16% для номінального складу портландцемент:заповнювач 1:2 і 1:3 порівняно з контрольним розчином Ц:П=1:2. Отже, отримані значення залежать від номінального складу розчину. Об'єм втягнутого повітря може змінюватися не тільки від вмісту повітровтягувальної добавки, але й від номінального складу суміші. Найбільший об'єм втягнутого повітря (14,5%) досягається в суміші з найбільшим вмістом в'язучого компонента (співвідношення портландцементу до заповнювача 1:2). Міцність на стиск знижується, якщо до сумішей додати

повітровтягувальну добавку. Ступінь зниження залежить як від вмісту втягнутого повітря, так і від номінального складу суміші. Найбільш значне зниження міцності на стиск (на 65,9 %) порівняно з контрольним складом через 28 днів тверднення спостерігається для номінального складу портландцемент:заповнювача=1:2. Випробуваннями на морозостійкість встановлено, що після 50 циклів заморожування/відтаювання найбільше зниження міцності на стиск (18,9%) спостерігається для розчину без добавок. У той же час зниження міцності на стиск розчину, що містить повітровтягувальні добавки, становило 8,1%.

Тенденція до зниження міцності при введенні повітровтягувальної добавки зберігається і у важких бетонах (номінальний склад за масою 1:1,9:3,3, Ц=350 кг/м³, В/Ц=0,5, марка бетонної суміші за осадкою конуса S4), модифікованих суперпластифікатором. Введення 0,3 мас.% повітровтягувальної добавки при виготовленні бетонної суміші призводить до деякого зниження міцності бетону протягом 90 днів тверднення, але через 180 днів міцність на стиск бетонів, що містять полідисперсний цеолітовий туф, перевищує міцність бетону без цього пуцоланового матеріалу. Показано, що заміна 10 мас.% портландцементу полідисперсним цеолітовим туфом супроводжується збільшенням витрати суперпластифікатора з 1,22 до 1,64 мас. % для забезпечення проектної марки за легкоукладальністю. Встановлено, що приріст міцності з введенням полідисперсного цеолітового туфу та суперпластифікатора дає змогу дещо знівелювати негативний вплив повітровтягувальної добавки на механічні показники бетону. Введення в бетон полідисперсного цеолітового туфу та пластифікуюче-повітровтягувальних добавок дозволяє модифікувати фазовий склад продуктів гідратації цементу з утворенням додаткової кількості дрібноволокнистих гідросилікатів кальцію, гідрогеленіту та еtringіту, а також покращити структуру бетону на мікро- та мезорівнях. При цьому знижується водонепроникність (глибина penetрації води становить 3,5 мм), підвищується морозостійкість такого бетону (спад міцності через 150 циклів зменшується на 39%) та знижуються усадочні деформації в 5,4 рази порівняно з бетоном без полідисперсного цеолітового туфу. Встановлено, що корозійна стійкість бетонів з 10 мас.% полідисперсного цеолітового туфу підвищується як в агресивному середовищі MgCl₂ (C(Mg²⁺)=10 г/л), так і в Na₂SO₄ (C(SO₄²⁻)=10 г/л).

При зменшенні витрати суперпластифікатора до 1 мас.% та повітровтягувальної добавки до 0,1 мас.% одержується марка бетонної суміші за осадкою конуса S3. Встановлено, що міцність на розтяг при згині бетону з полідисперсним цеолітовим туфом ПЦТ зростає на 11% порівняно з контрольним складом (К) і досягає 6,9 МПа, а бетон ПЦТПВ з повітровтягувальною добавкою характеризуються незначним приростом міцності на розтяг при згині. В той же час, спостерігається найбільше зростання енергії руйнування $\Delta G_F = 64$ Дж/м² бетону ПЦТПВ порівняно з контрольним бетоном.

У роботі вперше запропоновано до використання параметр питомих енерговитрат на локальне статичне деформування в зоні магістральної тріщини G₁, Дж/м²:

$$G_1 = \frac{W_1}{t(b-a_0)},$$

де W_1 - енерговитрати на локальне статичне деформування в зоні магістральної тріщини, Дж;
 t, b - розміри зразка, м;
 a_0 - висота надрізу, м.

Параметр питомих енерговитрат на локальне статичне деформування в зоні магістральної тріщини G_1 разом із стандартизованим показником питомих енерговитрат на статичне деформування до моменту початку руху магістральної тріщини (G_i) більш точно і в повній мірі характеризує поведінку бетону під навантаженням в докритичній і закритичній областях деформування і визначає ефективність армування.

На ефективність застосування полідисперсного цеолітового туфу разом з пластифікуючими та повітровтягувальними добавками вказують показники питомих витрат енергії на статичне руйнування до моменту початку руху тріщини $G_i=163,56$ Дж/м² і питомі енерговитрати на локальне статичне деформування в зоні магістральної тріщини $G_1=367,87$ Дж/м², а також загальні питомі ефективні витрати енергії на статичне руйнування $G_F=521,42$ Дж/м², які збільшуються на 27; 5 та 14% відповідно для бетону ПЦТПв порівняно з контрольним складом (К), про що свідчить аналіз повних діаграм стану бетонів (рис. 7) та розраховані силові і енергетичні характеристики тріщиностійкості (табл. 1).

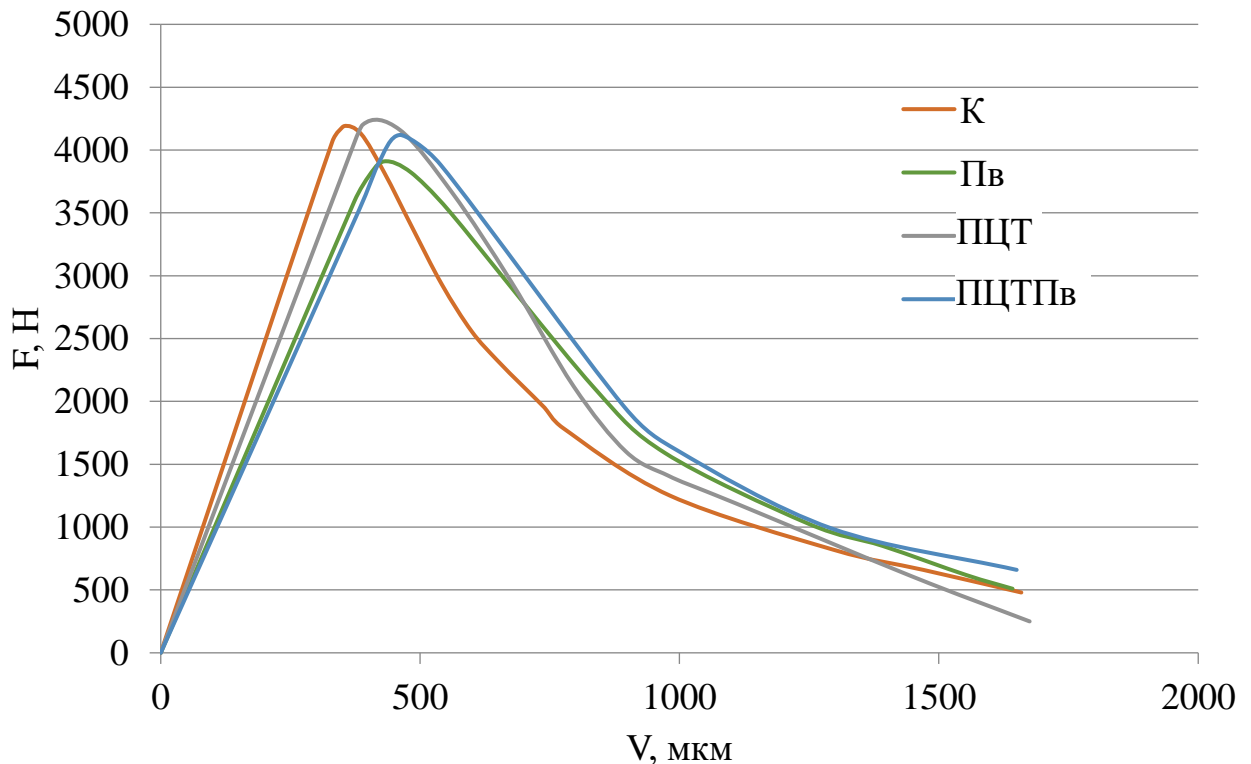


Рисунок 7 - Повні діаграми стану бетонів

Встановлено, що суперпластифікуюча та повітровтягувальна добавка позитивно впливають на енергію руйнування в докритичній (G_I) та закритичній (G_{II}) стадіях, а також на енергію руйнування G_F в бетоні з повітровтягувальною добавкою (Пв). Одержані результати свідчать, що найвищою енергією руйнування в докритичній (G_I) і закритичній (G_{II}) стадіях та енергією руйнування G_F характеризується модифікований бетон з підвищеною міцністю ПЦТПв, а критерій крихкості, який досягає 175 мм, свідчить про менш крихкий характер його руйнування (табл. 1).

Таблиця 1 - Силлові та енергетичні характеристики тріщиностійкості бетонів

Умовне позначення	G_I , Дж/м ²	G_{II} , Дж/м ²	G_F , Дж/м ²	K_i , МПа·м ^{1/2}	Міцність на розтяг при згині, МПа	Критерій крихкості, $\chi_{tb} \cdot 10^{-3}$, м
К	128,61	350,95	457,77	0,70	7,57	90
Пв	148,06	362,00	497,27	0,62	8,11	133
ПЦТ	136,96	376,43	511,68	0,64	8,00	86
ПЦТПв	163,56	367,87	521,42	0,65	8,75	175

При зміні вмісту втягнутого повітря 4,3; 6,5 та 7,2% (витрата повітровтягувальних добавок у бетонах ПЦТПв1, ПЦТПв2 та ПЦТПв3 становить 0,1; 0,15 та 0,25 мас.% відповідно) у бетонних сумішах (марка бетонної суміші за осадкою конуса S1, номінальний склад за масою Ц:П:Щ=1:1,65:2,88, В/Ц=0,35, Ц=400 кг/м³) встановлено закономірне зниження міцності на стиск бетонів ($\Delta f_{cm}=5-26$ %), але суттєво не змінюється міцність на розтяг при згині ($f_{ctb}=9,1-9,4$ МПа). Через 3 роки міцність на розтяг при згині бетону ПЦТПв2 з вмістом втягнутого повітря 6,5% досягає найвищого значення 14,1 МПа. Міцність на стиск через 28 діб тверднення в нормальних умовах становить 65,8 МПа, що відповідає класу С40/50.

Результати досліджень свідчать, що бетони ПЦТПв1 та ПЦТПв2 характеризуються на 8 та 22% відповідно вищими значеннями показника G_I ніж контрольний склад бетону К. При цьому бетон з вмістом 0,25 мас.% повітровтягувальної добавки (ПЦТПв3) має найнижчі питомі енерговитрати на локальне статичне деформування в зоні магістральної тріщини $G_I=381,92$ Дж/м² (рис. 8).

Показники бетону з підвищеною міцністю та об'ємом втягнутого повітря 6,5% (ПЦТПв2) за значеннями питомих енерговитрат на статичне деформування до моменту початку руху магістральної тріщини $G_I=247,44$ Дж/м², питомих

енерговитрат на локальне статичне деформування в зоні магістральної тріщини $G_i=492,28$ Дж/м², питомих ефективних енерговитрат на статичне руйнування $G_F=657,37$ Дж/м² переважають інші досліджувані бетони. Це пояснюється оптимальним вмістом дрібних бульбашок повітря, які, виступаючи демпферами напружень, ефективно сприяють дисипації енергії, гальмуванню процесів мікротріщиноутворення як на докритичній G_i , так і сповільненню руху магістральної тріщини в закритичній G_1 стадіях деформування, а також підвищенню морозостійкості бетону у 1,5 рази.

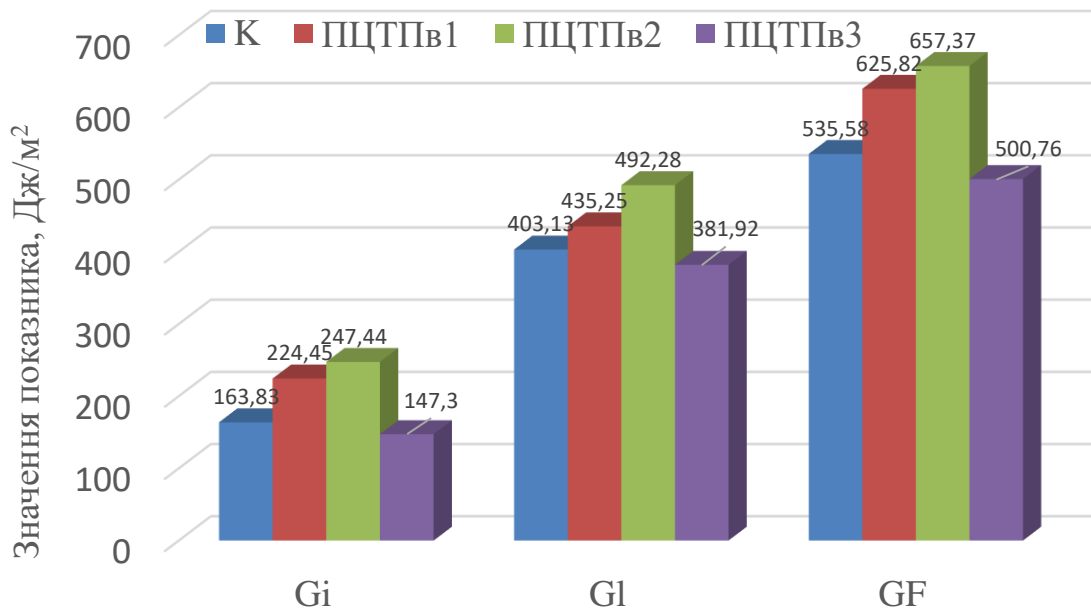


Рисунок 8 - Енергетичні характеристики тріщиностійкості бетонів

Показано, що бетон ПЦТПв3 з об'ємом втягнутого повітря 7,2% має підвищену стиранисть 0,32 г/см². Найменшою стиранистю (0,26 г/см²) характеризується бетон ПЦТПв1 з об'ємом втягнутого повітря 4,3%. Глибина карбонізації зменшується з 9 до 2 мм в бетоні з вмістом 10 мас.% полідисперсного цеолітового туфу та 0,1 мас.% повітровтягувальної добавки порівняно з контрольним складом.

П'ятий розділ присвячений оптимізації вмісту дисперсних волокон для забезпечення армування бетонів з підвищеною міцністю і тріщиностійкістю на мезо- та макроструктурному рівнях.

Армування бетону на мезо- та макроструктурному рівнях різними видами та типами фібрових волокон є завершальною стадією в процесі безперервного армування бетонів з підвищеною міцністю і тріщиностійкістю. З використанням експериментально-статистичного моделювання, застосовуючи трирівневий трифакторний план експерименту (X_1 – витрата поліпропіленової фібри з деформованою поверхнею ФПДП2 і прямої (ФПП1) - 7 ± 3 ($1,35 \pm 0,45$) кг на 1 м³ бетонної суміші; X_2 – відношення довжини фібри до максимального розміру крупного заповнювача (l_f/D_{max}) – $2,25 \pm 0,75$ ($0,6 \pm 0,2$); X_3 – коефіцієнт розсування зерен крупного заповнювача як для ФПДП2, так і для ФПП1 - $1,4 \pm 0,3$), встановлено за силовими і енергетичними параметрами тріщиностійкості оптимальний вміст фібри в бетоні з деформованою поверхнею ФПДП2=10 кг/м³ та фібри прямої

ФПП1=1,35 кг/м³.

Результати досліджень свідчать, що оптимальний вміст фібри ФПДП2 одержується при мінімальному відношенні довжини фібри до максимального розміру крупного заповнювача 1,5 (найбільший розмір зерна щебеню 30 мм), коефіцієнті розсунення зерен крупного заповнювача 1,1, при яких досягаються найвищі показники міцності на стиск (57,8 МПа), розтяг при згині (10,95 МПа) та характеристики тріщиностійкості ($G_I=178,17$; $G_I=640,97$; $G_F=810,15$ Дж/м²), а ФПП1 - при середньому відношенні $l_f/D_{max}=0,6$ (довжини фібри до максимального розміру крупного заповнювача), що відповідає щебеню з $D_{max}=20$ мм, та коефіцієнті розсуву зерен крупного заповнювача 1,4, при яких одержуються найвищі міцності на стиск $f_{cm.cube}=67,8$ МПа і на розтяг при згині $f_{ctfm}=11,4$ МПа, а також характеристики тріщиностійкості, Дж/м²: $G_I=248,82$; $G_I=607,58$; $G_F=760,88$ (рис. 9).

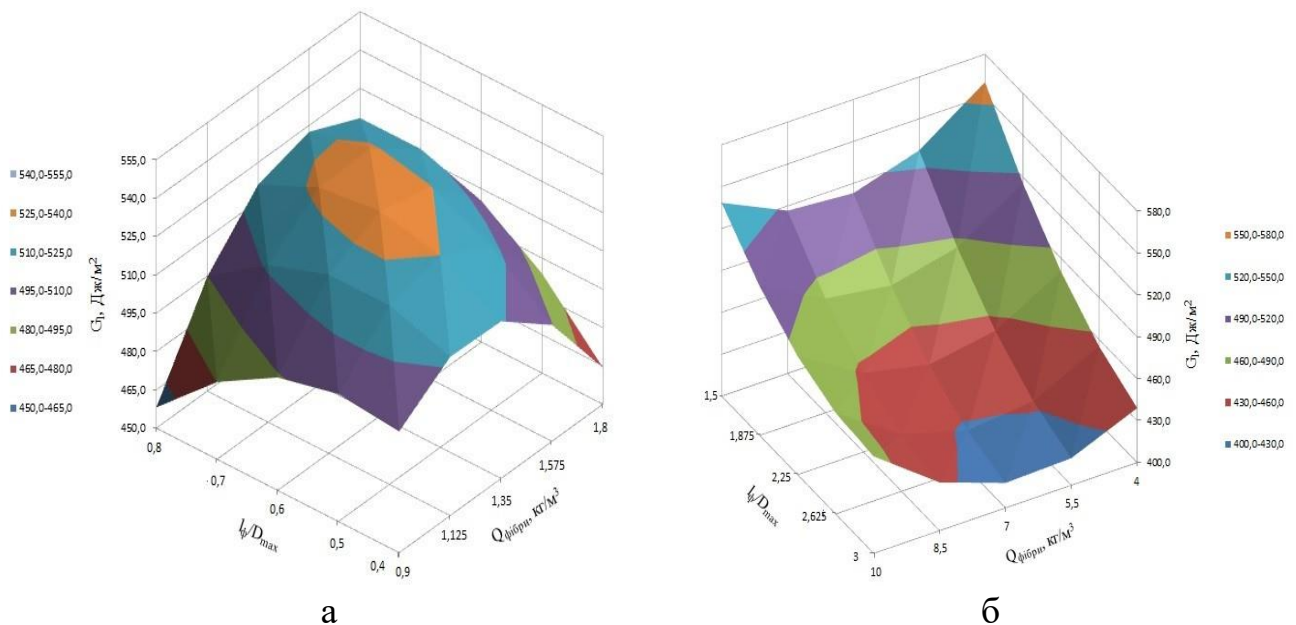


Рисунок 9 - Поверхні відгуку питомих енерговитрат на локальне статичне деформування в зоні магістральної тріщини бетонів, дисперсноармованих прямою фіброю (а) та з деформованою поверхнею (б)

Комплексне поєднання фібри ФПДП2 та ФПП1 дає змогу забезпечити неперервне армування бетону на мезо- та макроструктурному рівні. За результатами оптимізації (X_1 (ФПДП2) – 10 ± 2 кг/м³, X_2 (ФПП1) – $1,05\pm 0,35$ кг/м³ бетонної суміші) встановлено, що при вмісті фібри з деформованою поверхнею в кількості 8 кг/м³ бетонної суміші та прямої фібри 1,05 кг/м³ в розроблених дисперсноармованих бетонах досягаються максимальні значення міцності на розтяг при згині ($f_{ctfm}=11,9$ МПа) та енергетичних ($G_I=207,34$; $G_I=660,19$; $G_F=840,44$ Дж/м²) параметрів тріщиностійкості (рис. 10).

Показано, що поєднання двох видів фібри ФПДП2 та ФПП1 дає змогу покращити міцність на розтяг при згині на 40-75% та енергетичні характеристики тріщиностійкості бетонів в 2,0-2,5 рази порівняно з бетоном без фібри. Дослідженнями будівельно-технічних властивостей бетону встановлено, що міцність на стиск розробленого бетону з композиційним полідисперсним

армуванням перевищує значення для неармованого бетону на 36%, водопоглинання за масою не відрізняється суттєво. Зниження міцності на стиск після 400 циклів заморожування/відтавання для дисперсноармованого та неармованого бетонів становить відповідно 9,8 та 12,3%, що підтверджує ефективність роботи фібри, яка зменшує імовірність руйнування бетону внаслідок зростання внутрішніх напружень в бетоні при замерзанні рідкої фази. Стираність такого бетону зменшується на 19%. Деформації усадки бетону з композиційним дисперсним армуванням поліпропіленовими фібрами різних типів стабілізуються через 22 доби, тоді як для неармованого бетону – через 32 доби, при цьому відносні деформації зменшуються на 26%.

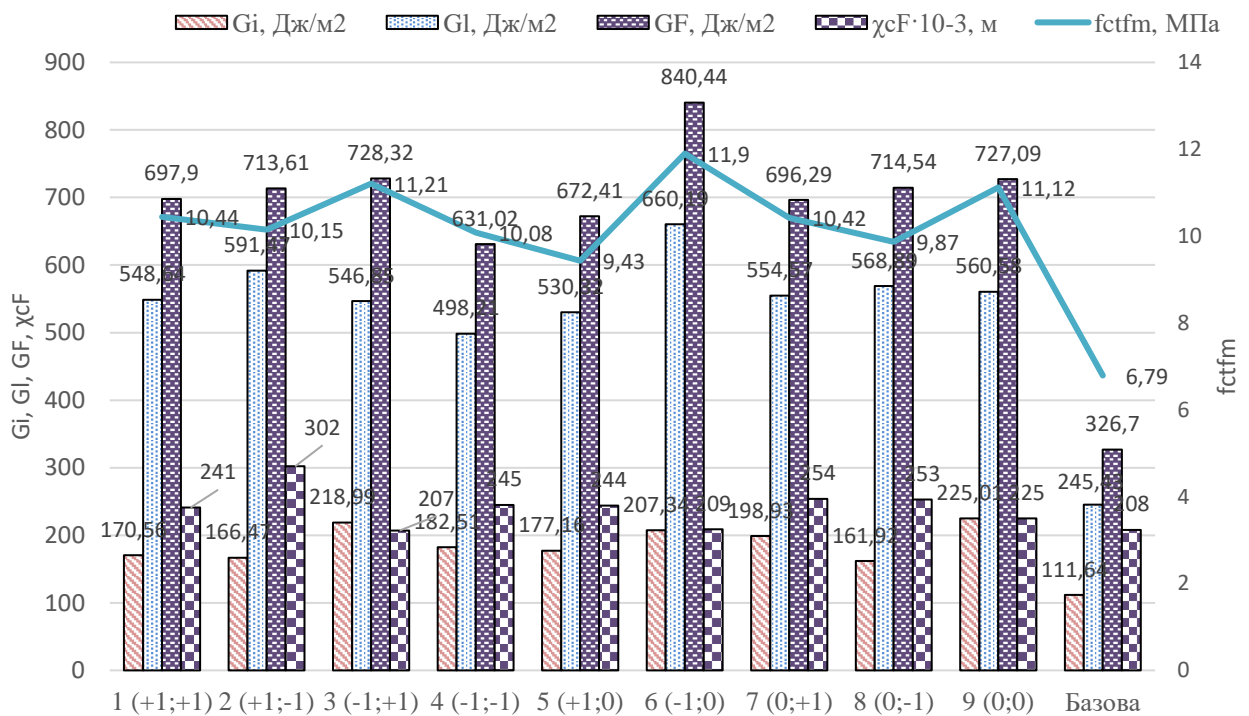


Рисунок 10 - Силові та енергетичні параметри тріщиностійкості бетонів з композиційним полідисперсним армуванням

У шостому розділі представлено результати вивчення комплексу технологічних чинників для керування структуроутворенням та регулювання міцнісних та енергетичних характеристик тріщиностійкості бетонів, практики використання та техніко-економічної ефективності розроблених бетонів з підвищеною тріщиностійкістю.

Параметри тріщиностійкості дають змогу виявити вплив різних технологічних факторів та їх оптимізації на поведінку бетонів з підвищеною міцністю під навантаженням. Склади запроєктованих бетонів наведені в табл. 2.

Міцність бетону R0 через 28 діб тверднення становить 52,5 МПа. Оптимізація зернового складу бетону та використання різних технологічних факторів, а саме полідисперсного цеолітового туфу, повітровтягувальних добавок та дисперсного армування, дає змогу підвищити міцність на 24-28%, яка знаходиться в межах 64,9-67,3 МПа.

Як показано на рис. 11, а, поведінка бетонів, за винятком бетону з полідисперсним цеолітовим туфом, пластифікуючою та повітровтягувальною добавками, різними типами фібри R+Z+F+A, суттєво не відрізняється на стадії пружних деформацій, про що вказують висхідні гілки кривих навантаження-переміщення. Більш нахилена висхідна гілка кривої навантаження-переміщення на докритичній стадії демонструє підвищення в'язкості руйнування бетону R+Z+F+A. Результати також свідчать, що бетон R+Z+F+A демонструє подібну поведінку і на закритичній стадії деформування під навантаженням. Для інших бетонів помітна суттєва різниця після появи тріщини. Спадна частина кривої навантаження-переміщення досить крута для всіх серій бетонів. Низхідна гілка коротша для бетонів R і R0. Використання оптимальної кількості обох фібр істотно збільшує площу під спадною гілкою. Це свідчить про те, що в'язкість руйнування бетону підвищується порівняно з R0, незважаючи на вищий клас міцності на стиск.

Таблиця 2 – Склади бетонів (В/Ц = 0,36, марка бетонної суміші за осадкою конуса - S4)

Компоненти та об'єм втягнутого повітря	Витрата матеріалів для сумішей				
	R0	R	R+F	R+F+A	R+Z+F+A
Ц (ПЦ II/A-III-500P-H), кг/м ³	450	450	450	450	405
Цеоліт, кг/м ³	-	-	-	-	45
П, кг/м ³	400	400	400	300	300
П _{0,63-2} , кг/м ³	-	100	100	100	100
Щ _{5,0-10} , кг/м ³	400	370	370	370	370
Щ _{10,0-20} , кг/м ³	1000	930	930	930	930
Суперпластифікатор, мас.%	0,8	0,8	1,5	1,2	1,5
Повітровтягувальна добавка, мас.%	-	-	-	0,4	0,4
Фібра з деформованою поверхнею, кг/м ³	-	-	8	8	8
Пряма фібра, кг/м ³	-	-	1,05	1,05	1,05
Об'єм втягнутого повітря, %	1,5	1,5	2,0	6,0	6,0

Додавання повітровтягувальної добавки робить спадну гілку меншою. Слід відзначити, що після часткової заміни портландцементу в бетоні з пластифікуючою та повітровтягувальною добавками, різними типами фібри R+F+A на цеолітовий туф (10 мас.%) поведінка бетону R+Z+F+A під навантаженням подібна до бетону з різними типами фібри R+F в закритичній стадії деформування. Однак такий бетон має кращу стійкість до циклічної дії поперемінного заморожування та відтаювання.

Критерій крихкості є важливим параметром тріщиностійкості, який свідчить про характер руйнування бетону. На рис. 11, б показано, що використання полідисперсного армування фіброю призводить до збільшення на 55,0% критерію крихкості бетону R+F порівняно з R. Втягнуті бульбашки повітря в серії R+F+A спричиняють деяке зниження (на 16,6%) критерію крихкості внаслідок закономірного зниження міцності бетону. Проте комплексне поєднання цеолітового туфу і повітровтягувальної добавки в бетоні, що містить різні типи

волокон, покращує тріщиностійкість і критерій крихкості становить 176 мм і є найбільшим серед досліджуваних бетонів. Отже, використання комплексу технологічних факторів для керування структуроутворенням на різних рівнях дозволяє регулювати поведінку бетону під навантаженням, покращити експлуатаційні властивості та довговічність бетонів, що відповідає стратегії сталого розвитку в будівництві.

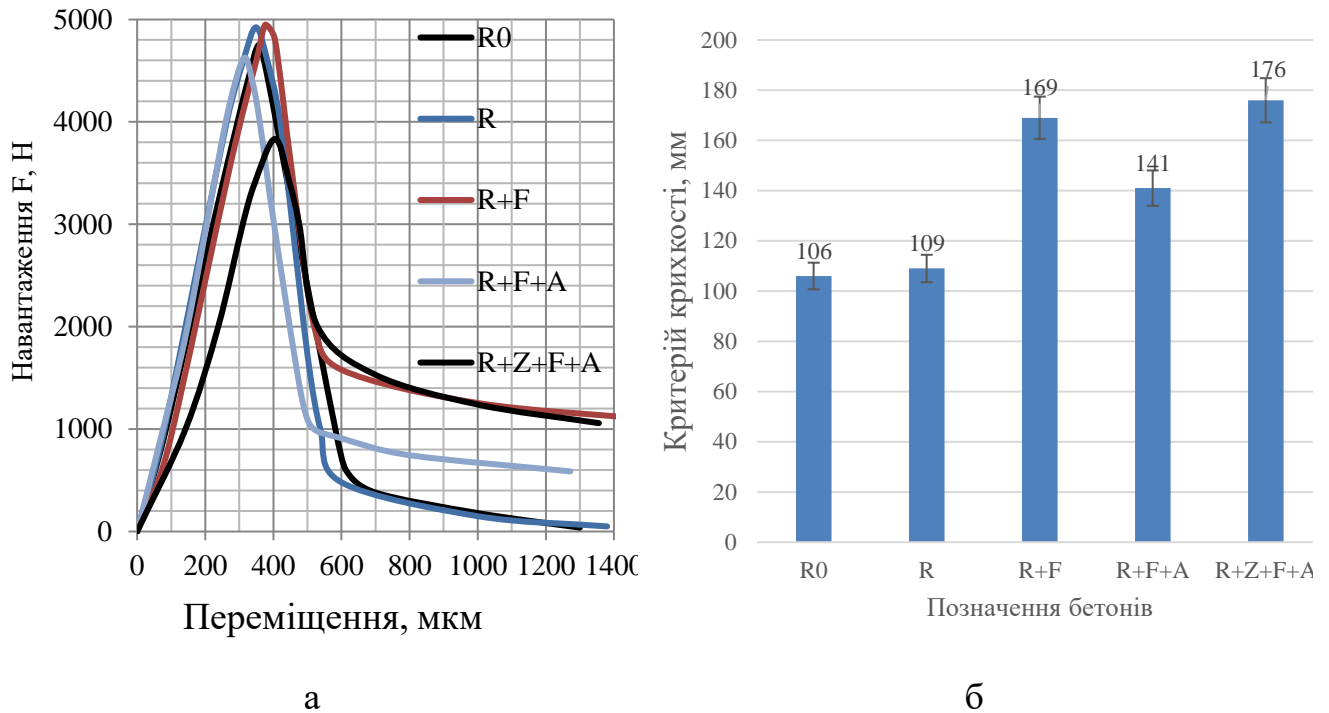


Рисунок 11 - Повні діаграми стану (а) та критерій крихкості бетонів (б)

Дослідження мікроструктури пояснює підвищення механічних властивостей і параметрів тріщиностійкості бетону, що містить цеолітовий туф і добавки пластифікуюче-повітровтягувальної дії. Показано, що структура такого бетону характеризується рівномірно розподіленою системою бульбашок повітря. Використання повітровтягувальної добавки, яка складається з амфіфільних молекул, призводить до утворення навколо бульбашки повітря оболонки, яка забезпечує її стабільність, зменшуючи коалесценцію (рис. 12). Склад оболонки при введенні полідисперсного цеолітового туфу представлений гідросилікатами кальцію, які забезпечують її міцність. Такі бульбашки повітря в цементній матриці можна розглядати як компенсатори напружень, які здатні гальмувати поширення тріщин, поглинаючи пружну енергію. Слід відзначити, що коли навантаження прикладається до такого фіброармованого бетону з повітровтягувальною добавкою та цеолітовим туфом мікроармовані бульбашки повітря призводять до дисипації енергії мікротріщиноутворення під навантаженням. Це супроводжується підвищенням характеристик тріщиностійкості та експлуатаційних властивостей бетонів. Водопоглинання становить 1,5 мас.%, стираність 0,2 г/см², марка за водонепроникністю та морозостійкістю W16 та F300 відповідно.

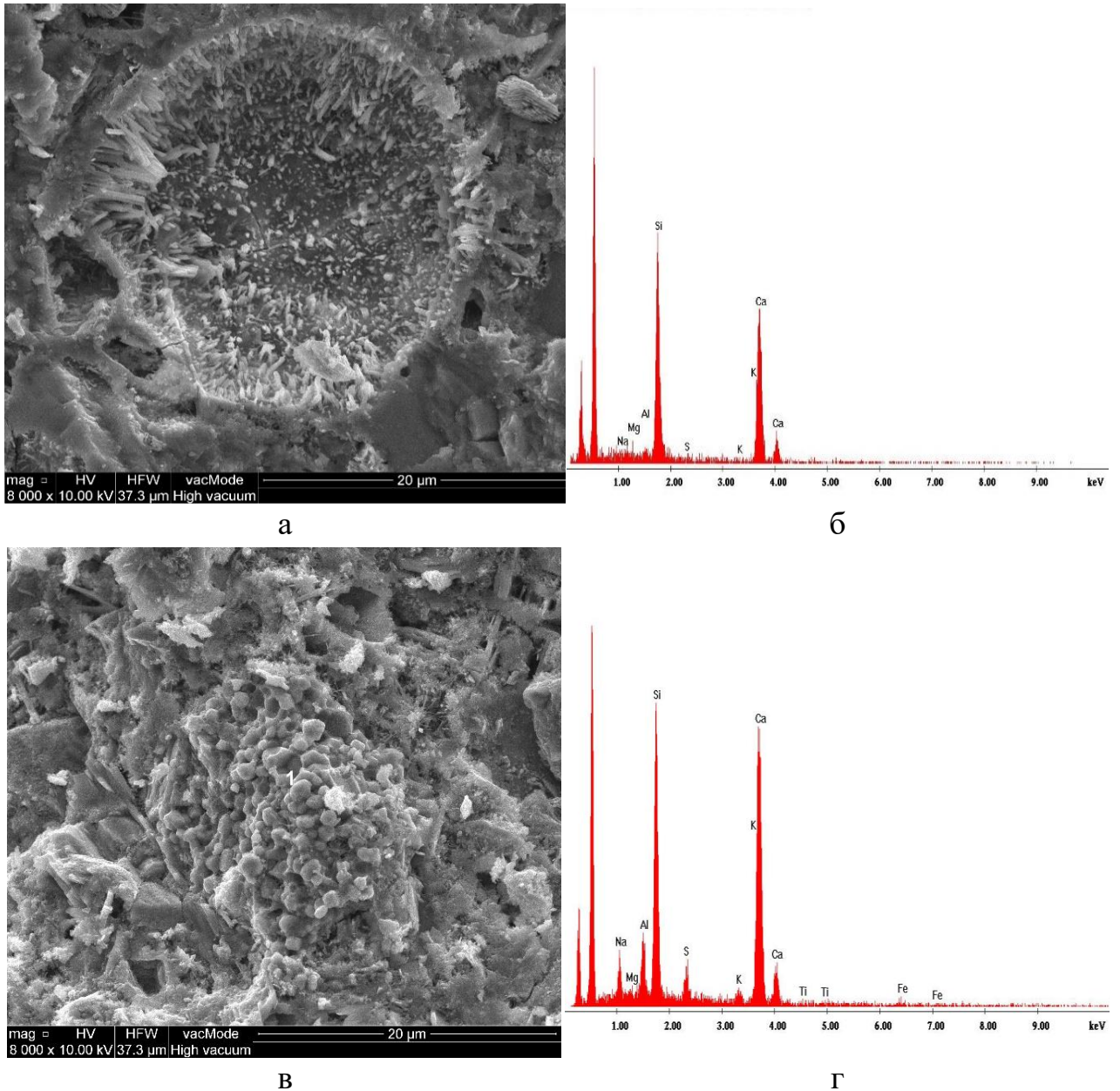


Рисунок 12 - Мікроструктура (а, в) і спектри рентгенівського випромінювання (б, г) цементної матриці бетону

Розроблені бетони впроваджено у виробничих умовах ТзОВ «Угринів Еко Ферм» для бетонування ванни тваринницького комплексу з використанням бетонів з підвищеною міцністю В30 (С25/30), одержаних оптимізацією технологічних факторів на різних структурних рівнях, в кількості 200 м³. При цьому вирішено завдання забезпечення корозійної та тріщиностійкості. При будівництві площадки для складування бетонних виробів на ПП «Застава» використано бетон з підвищеною міцністю та тріщиностійкістю (питомі ефективні енерговитрати на статичне руйнування $G_F=373$ Дж/м², критерій крихкості $\chi_F^c=185$ мм) на основі БСГ В40Р4F200W10. Фактичний економічний ефект при бетонуванні промислової площадки при впровадженні нової технології становить 9005 грн на 100 м² за рахунок зменшення товщини площадки, внаслідок використання бетону з підвищеною міцністю та тріщиностійкістю, та можливості відмовитися від топінгу. Розрахунок товщини площадки проведений згідно з британськими рекомендаціями

щодо влаштування цементобетонних промислових підлог (TR 34 «Concrete industrial ground floors»), що базується на стандарті Eurocode 2 та дає змогу розрахувати в т.ч. плити з комбінованим дисперсним та стрижневим армуванням. При будівництві під'їзної дороги до складських приміщень у с. Малехів Львівської ОТГ використано бетон з підвищеною міцністю на основі БСГ С32/40 S4 F200 W10 в кількості 82 м³, який виготовлений на ПП «Захід-Бетон-Буд» із забезпеченням високої технологічності бетонних сумішей (з нормованим значенням об'єму втягнутого повітря та відсутністю розшарування) та тріщиностійкості і експлуатаційних (підвищеної морозостійкості та водонепроникності) властивостей бетонів. Впроваджено розроблені бетони з підвищеною тріщиностійкістю на основі БСГ В35P4F200W6 на підприємстві «Дрог-Буд» Сп. з о.о. при будівництві мостового переходу в с. Корчів в кількості 116 м³, а також суміші БСГ В30P4F200W6 та БСГ В30P3F200W6 на ТОВ «Автомагістраль-Південь» при бетонуванні монолітних стійок опор, ростверків, підферменників, ригелів, буронабивних паль при будівництві мостового переходу через р. Західний Буг на а/д 0141602 Сокаль-Стоянів на км 1+693 в кількості 580 м³, що дало змогу одержати бетонні суміші з проектними марками за легкоукладальністю S3 та S4 і з нормованим розшаруванням за показниками водо- та розчиновідділення, а затверділий бетон характеризувався швидким наростанням міцності ($f_{cm2}/f_{cm28} \geq 0,5$), підвищеною проектною морозостійкістю та водонепроникністю.

Проведено промислове впровадження розробленого самоущільнювального (розплив конуса 550-620 мм, клас за розпливом конуса бетонної суміші - SF1) бетону з підвищеною тріщиностійкістю класу за міцністю на стиск В30 (С25/30), марки за морозостійкістю F200 та водонепроникністю W6 на ТОВ «Автомагістраль-Південь» для бетонування монолітних складних за формою стійок опор, в яких була утруднена можливість ущільнювати бетон механічним способом із застосуванням глибинних вібраторів, при будівництві мостового переходу через р. Західний Буг на а/д 0141602 Сокаль-Стоянів на км 1+693 в кількості 4 м³. При цьому раціональним підбором хімічних добавок забезпечено одержання об'єму втягнутого повітря в кількості 5% для отримання проектної марки за морозостійкістю бетону та тверднення в умовах знакозмінних температур в діапазоні -10...+3°C.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У результаті узагальнення комплексу експериментально-теоретичних досліджень в дисертаційній роботі вирішено актуальну науково-прикладну проблему з розроблення теоретичних основ і технології бетонів з підвищеною міцністю і тріщиностійкістю, що дає змогу поєднувати системно їх технічні, екологічні та економічні переваги. Нижче сформульовані висновки по найважливіших наукових і практичних результатах:

1. Теоретично обґрунтована та експериментально підтверджена можливість створення бетонів з підвищеною міцністю і тріщиностійкістю за

рахунок направлено формування їх структури на мікро-, мезо- та макроструктурному рівнях шляхом раціонального підбору пуцоланових матеріалів на основі цеолітів, пластифікуючих і повітровтягувальних добавок, дисперсних волокон.

2. Показано, що формування оптимальної структури на мікро-, мезорівнях здійснюються шляхом зв'язування вільного $\text{Ca}(\text{OH})_2$ і утворення гідросилікатів кальцію волокнистої форми, а також гідрогеленіту і збільшеної кількості еtringіту, що може бути реалізовано як введенням добавок пуцоланової дії, так і комплексної пуцоланової і кристалоутворюючої дії (природні і штучні цеоліти).

3. Запропоновано розділити ефекти дії пуцоланових матеріалів на основі і додаткові та враховувати їх при проектуванні бетонів. Дослідженнями пуцоланічної активності (основний ефект) матеріалів показано, що за здатністю поглинати CaO з його насиченого розчину їх можна розмістити в порядку зростання їх активності: гранульований доменний шлак \rightarrow зола-винесення \rightarrow природні пуцолани \rightarrow штучні пуцолани. Підтверджена роль цеолітового туфу як джерела додаткової води (додатковий ефект) для поглиблення гідратації портландцементу в нормальних та повітряно-сухих умовах тверднення і як кристалоутворюючої добавки. Показано, що введення до складу бетону до 10 мас.% цеолітового туфу або штучного цеоліту Na-P1 підвищує міцність на стиск на 28 добу порівняно з контрольним складом на 18,4 і 11,7%, а на розтяг при згині 23,4 і 14,3% відповідно.

4. Встановлено зв'язок показників тріщиностійкого бетону з його структурою на макрорівні і показано, що формування в структурі бетону рівномірно розподілених бульбашок повітря за рахунок введення пластифікуюче-повітровтягувальних добавок забезпечує рівномірний розподіл напружень в бетоні і сприяє дисипації енергії мікротріщиноутворення під навантаженням як на докритичній стадії, так і сповільнення руху магістральної тріщини в закритичній.

5. Запропоновано як один з критеріїв оцінки тріщиностійкості бетонів підвищеної міцності параметр питомих енерговитрат на локальне статичне деформування в зоні магістральної тріщини G_1 , який разом із стандартизованим показником питомих енерговитрат та статичне деформування до моменту початку руху магістральної тріщини (G_1) більш точно і в повній мірі характеризує поведінку бетону під навантаженням в докритичній і закритичній областях деформування і визначає ефективність армування.

6. Виявлено механізм покращення тріщиностійкості бетонів з підвищеною міцністю, внаслідок використання природних пуцолан (10 мас.% цеолітового туфу) в комплексі з повітровтягувальною добавкою (0,15 мас.%). Досліджено, що при вмісті повітря 6,5% такий бетон характеризується системою рівномірно розподілених замкнутих пор, а використання повітровтягувальних добавок з дифільними молекулами забезпечує формування бульбашок повітря з міцною оболонкою, яку утворюють продукти гідратації портландцементу з переважанням в них волокнистих гідросилікатів кальцію. Це зумовлює дисипацію енергії мікротріщиноутворення під навантаженням як на докритичній ($G_1=247,44 \text{ Дж/м}^2$), так і сповільнення руху магістральної тріщини в закритичній

($G_1=492,28$ Дж/м²) стадіях із зростанням критерія крихкості до 206 мм та морозостійкості бетону у 1,5 рази.

7. Уточнено і розвинуто механізм неперервності армування на рівні мікро- і мезоструктури, здійсненого як шляхом направленою формування новоутворень волокнистої форми в цементному камені, так і введенням до складу бетону полідисперсних фібрових волокон, що створює так званий «Bridge» ефект, який призводить до сповільнення розвитку мікротріщин в докритичній стадії деформування та чинить опір в подальшому дефрагментації полідисперсноармуваних бетонів в закритичній стадії деформування.

8. Доведено ефективність полідисперсного армування бетонів, що дає змогу при вмісті фібри з деформованою поверхнею 8 кг/м³ бетонної суміші та прямої фібри 1,05 кг/м³ досягнути максимальних значень міцності ($f_{ctfm}=11,9$ МПа) та енергетичних (при $F_c=5400$ Н: $G_1=207,34$ Дж/м²; $G_1=660,19$ Дж/м²; $G_F=840,44$ Дж/м²) параметрів тріщиностійкості. Показано, що поєднання двох видів фібри ФПДП2 та ФПП1 покращує міцність на розтяг при згині на 40-75% та енергетичні характеристики тріщиностійкості бетонів майже в 2,0-2,5 рази порівняно з бетоном без фібри. Критерій крихкості становить 209 мм.

9. Розроблено алгоритм багатопараметричного проектування, який передбачає комплексне поєднання пуцоланових матеріалів на основі природних і штучних цеолітів, пластифікуюче-повітровтягувальних добавок та різних видів фібри для одержання бетонів з підвищеною міцністю, тріщиностійкістю та експлуатаційними властивостями. Показано, що запроєктовані бетони класів С 25/30-С 50/60 мають кращі міцнісні показники ($f_{cm,cube}=67,3$ МПа, $f_{ctfm}=9,0$ МПа), силові ($\chi_F=176$ мм) та енергетичні (при $F_c=3834$ Н: $G_F=350,47$ Дж/м²) характеристики тріщиностійкості при високих експлуатаційних властивостях ($\dot{G}_c=0,2$ г/см², F300, W16).

10. Розроблено наукові засади технології бетонів з підвищеною тріщиностійкістю. Встановлено, що для одержання таких бетонів значення критерія крихкості χ_F має перевищувати 140 мм. Показано можливість регулювання характеристик тріщиностійкості та довговічності за рахунок зміни технологічних факторів та параметрів проектування. Вивчено поведінку бетону з підвищеною міцністю під навантаженням і встановлено, що бетон, який містить полідисперсний цеолітовий туф, різні види фібри і повітровтягувальну добавку, незважаючи на менший вміст портландцементу (на 10 мас.%), характеризується покращеними (на 3-3,5%) механічними властивостями в більш пізні терміни тверднення та параметрами тріщиностійкості зі збільшенням енергії руйнування на 35,1% і критерію крихкості на 61,5% порівняно з контрольним складом бетону.

11. Результати апробації та промислового випуску підтверджують перспективність застосування розроблених бетонів з підвищеною тріщиностійкістю для будівництва транспортної інфраструктури, гідротехнічних об'єктів, які відповідають різним класам впливу навколишнього середовища на бетон, а також конструкцій з особливими вимогами. Питомий економічний ефект від впровадження розроблених бетонів з підвищеною тріщиностійкістю становить 90,05 грн на 1 м² промислової площадки з фактичним економічним ефектом 9005 грн на 100 м² порівняно з традиційною технологією.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Статті у наукових фахових виданнях України:

1. Будівельні розчини з мікроармувальними добавками / Т. Є. Марків, Х. С. Соболь, Т. П. Кропивницька, П. В. Новосад. Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. Теорія і практика будівництва. 2007. № 602. С. 139–143 (*Вивчено вплив мікроармувальних добавок на формування мезоструктури бетону*).
2. Концепція одержання низькоенерговмісних цементів / Т.Є. Марків, У.Д. Марущак, М.А. Саницький, Х.С. Соболь, Ю.Л. Новицький. Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. Теорія і практика будівництва. 2009. № 655. С. 170-178 (*Інтерпретація одержаних результатів щодо впливу гранульованого доменного шлаку, золи-винесення та комплексних модифікаторів на властивості цементів та бетонів*).
3. Модифіковані малоенергоємні цементи для будівельних розчинів і бетонів / Т. Є. Марків, Т. П. Кропивницька, М. В. Штурмай, Б. В. Федунь. Будівельні конструкції, міжвід. наук.-техн. зб. / Держ. п-во «Держ. н.-д. ін-т буд. конструкцій». Київ. НДІБК, 2009. Вип. 72. Сучасні технології бетону: зб. наук. пр. С. 216–222 (*Показано роль модифікування в забезпеченні необхідних проектних властивостей бетонів*).
4. Модифіковані бетони з поліпшеними експлуатаційними властивостями / Т. Є. Марків, П. В. Новосад, О. П. Новосад, І. В. Саїв. Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. Теорія і практика будівництва. 2010. № 664. С. 93–97 (*Постановка завдання, аналіз результатів*).
5. Саницький М., Кропивницька Т., Марків Т. Мікроструктура та міцність будівельних розчинів з комплексними модифікаторами. Будівельні матеріали та вироби. 2010. № 1 (60). С. 6–9 (*Досліджено міцність будівельних розчинів з комплексними модифікаторами*).
6. Саницький М. А., Марків Т. Є., Круць Т. М. Волокнистоцементні вироби на основі портландцементу, одержаного з використанням вторинних паливних матеріалів. Будівельні матеріали та вироби. 2011. № 4 (69). С. 2–7 (*Показана роль волокнистих матеріалів у забезпеченні проектних показників виробів*).
7. Модифіковані бетони на основі портландцементу композиційного ПЦ П/Б-К (Ш-З)-400 / Т. Є. Марків, У. Д. Марущак, С. В. Міхін, О. О. Серкіз. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. 2013. Вип. 26. С. 286–291 (*Досліджено властивості модифікованих бетонів на основі композиційних портландцементів з добавкою золи-винесення*).
8. Markiv T., Huniak O., Sobol Kh. Optimization of concrete composition with addition of zeolitic tuff. Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Теорія і практика будівництва. 2014. № 781. С. 116–120 (*Інтерпретація одержаних результатів щодо властивостей бетонів з добавкою цеолітового туфу*).
9. Гуняк О.М., Соболь Х.С., Марків Т.Є. Оптимізація складів спеціальних цеолітовмісних портландцементів. Містобудування та територіальне планування.

2014. Вип. 54. С. 139–143 (*Оптимізація вмісту цеолітового туфу в цементуючій системі на рівні мікроструктури бетону*).

10. Солодкий С.Й., Марків Т.Є., Холод Т.П. Способи регулювання тріщиностійкості високоміцних бетонів. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди, зб. наук. пр. Рівне [б. в.], 2015. Вип. 31. С. 357–362 (*Інтерпретація одержаних результатів щодо тріщиностійкості високоміцних бетонів*).

11. Дослідження будівельних розчинів з добавкою цеолітів / Т. Є. Марків, Х. С. Соболю, З. Я. Бліхарський, О. М. Гуняк. Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Теорія і практика будівництва. 2015. № 823. С. 222–228 (*Вивчено властивості розчинової частини бетонів з добавкою цеолітового туфу*).

12. Солодкий С.Й., Гуняк О.М., Марків Т.Є. Тріщиностійкість модифікованих високоміцних дорожніх бетонів. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво, наук.-техн. зб. Київ, 2016. Вип. 98. С. 247–255 (*Показана роль модифікування у забезпеченні тріщиностійкості бетонів*).

13. Активність полідисперсних мінеральних компонентів та їх роль у формуванні структури та міцності цементів / Х. С. Соболю, Т. Є. Марків, Н. І. Петровська, О. М. Гуняк. Вісник Національного університету Львівська політехніка. Теорія і практика будівництва. 2019. № 912. С. 175–182 (*Досліджено властивості цементів з полідисперсними мінеральними компонентами*).

14. Markiv T. Properties of fresh and hardened mortars with air-entraining agent. Theory and Building Practice. 2022. Volume 4(2). P. 105-110.

Патенти:

15. Пат. 154932 Україна. Спосіб одержання зв'язуючого / З. Я. Бліхарський, Х. С. Соболю, Т. Є. Марків, О. М. Гуняк. u 202302590; опубл. 03.01.2024, Бюл. № 1. 4 с. (*Патентний пошук, розроблення складів*).

Статті у наукових періодичних виданнях інших держав та у виданнях України, які входять до міжнародних наукометричних баз:

16. Peculiarities of hydration processes of cements containing natural zeolite / Kh. Sobol, T. Markiv, V. Terlyha, W. Franus. Budownictwo i Architektura. 2015. T. 14. № 1. P. 105–113 (**Index Copernicus**) (*Визначено активну структуроутворювальну роль цеолітового туфу при гідратації цементу*).

17. Effect of Natural Zeolite and Air-Entraining Agent on the Properties of High Strength Concretes / Z. Blikharskyu, S. Solodkyu, O. Pozniak, T. Markiv. Regional Barometer. Analyses & Prognoses. 13(2). 2015. P. 137-138 (**Index Copernicus**) (*Досліджено вплив цеолітового туфу на властивості високоміцних бетонів*).

18. Mechanical and durability properties of concretes incorporating natural zeolite / T. Markiv, K. Sobol, M. Franus, W. Franus. Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2016. Vol. 16(4). P. 554–562 (**SCOPUS, Q1**) (*Планування досліджень, аналіз результатів та формулювання висновків*).

19. Fracture properties of high-strength concrete obtained by direct modification of structure / S. Solodkyu, T. Markiv, K. Sobol, O. Hunyak [Електронний ресурс]. MATEC Web of Conferences. 2017. Vol. 116 (**SCOPUS**) (*Узагальнення отриманих результатів тріщиностійкості високоміцних бетонів та встановлення ефективності модифікування структури*).

20. The effect of natural pozzolans on properties of vibropressed interlocking concrete blocks in different curing conditions / O. Hunyak, K. Sobol, T. Markiv, V. Bidos. *Production Engineering Archives*. 2019. Vol. 22. P. 3–6 (**SCOPUS, Q2**) (*Постановка експерименту з дослідження впливу природних пуцоланових матеріалів на властивості вібропресованих виробів*).

21. Turba Y., Solodkyu S., Markiv T. Strength and fracture toughness of cement concrete, dispersedly reinforced by combination of polypropylene fibers of two types. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2020. Vol. 47. P. 488–494 (**SCOPUS, Q4**) (*Показано ефективність і доцільність поєднання поліпропіленової фібри різних типів*).

22. Effect of plasticizing and retarding admixtures on the properties of high strength concrete / T. Markiv, S. Solodkyu, K. Sobol, D. Rachidi. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2020. Vol. 100. P. 286–293 (**SCOPUS, Q4**) (*Виявлено вплив модифікаторів різних типів на властивості високоміцних бетонів*).

23. Properties of concretes incorporating recycling waste and corrosion susceptibility of reinforcing steel bars / Z. Blikharskyu, K. Sobol, T. Markiv, J. Selejdak. *Materials*. 2021. Vol. 14(10). 2638 (**SCOPUS, Q2**) (*Досліджено властивості бетону та корозійну стійкість арматури в бетоні з добавками побічних продуктів промисловості*).

24. Tomporowski D., Markiv T. Analysis of environmental consequences occurring in the life cycle of a retail facility. *Budownictwo i Architektura*. 2022. T. 21 (4). P. 5–12 (**Index Copernicus**) (*Проведено аналіз результатів*).

25. Markiv T., Blikharskyu Z. Effect of Calcium Nitrate-Based Admixture on the Strength of Concrete and Corrosion Susceptibility of Reinforcing Steel Bars. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2023. Vol. 290. P. 253–261 (**SCOPUS, Q4**) (*Встановлено вплив комплексного модифікатора на міцність бетону*).

26. The effect of air-entraining agent on the properties of mortars / Z. Blikharskyu, T. Markiv, Kh. Sobol, Y. Turba, J. Selejdak. *Archives of civil engineering*. 2023. Vol. 69. № 3. P. 147-156 (**SCOPUS, Q3**) (*Досліджено вплив повітровтягувальних добавок на властивості розчинів*).

27. Mechanical and Fracture Properties of Air-Entrained FRC Containing Zeolitic Tuff / Z. Blikharskyu, T. Markiv, Y. Turba, O. Hunyak, Y. Blikharskyu, J. Selejdak. *Applied Sciences*. 2023. 13(16). 9164 (**SCOPUS, Q1**) (*Встановлено вплив органо-мінеральних добавок на властивості дисперсноармованих бетонів*).

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

28. Модифіковані будівельні розчини з мікроармуючими і хімічними добавками / Т. Є. Марків, Х. С. Соболю, Т. П. Кропивницька, В. А. Пристай, Р. А. Солтисік. І науково-практична конференція «Сучасні тенденції розвитку і виробництва силікатних матеріалів». Львів, 2007. С. 13-15 (*Визначено ефективність використання мікроармуючих і хімічних добавок на мезоструктурному рівні бетонів*).

29. Марків Т.Є., Кропивницька Т.П. Модифіковані будівельні розчини нової генерації. ІІ науково-технічна конференція «Сучасні тенденції розвитку і виробництва силікатних матеріалів». Львів, 2008. С. 43 (*Досліджено вплив повітровтягувальної добавки на властивості розчинової частини бетону*).

30. Саницький М. А., Соболев Х. С., Марків Т. Є. Модифіковані композиційні цементи. Навч. посіб. Львів: Вид-во Львів. політехніки, 2010. 132 с. *(Показано особливості підбору речовинного складу цементів загальнобудівельного призначення).*

31. Саницький М.А., Марків Т.Є., Русин Б.Г. Вплив лужних компонентів на компатибельність портландцементів з хімічними та мінеральними добавками. XII Міжнародна науково-практична конференція «Дні сучасного бетону». Будіндустрія ЛТД. Запоріжжя, 2012. С. 51-57 *(Досліджено вплив мінеральних добавок на властивості портландцементів).*

32. The effect of zeolitic tuff on structure formation and properties of cements / T. Markiv, W. Franus, Kh. Sobol, Z. Blikharskyu. IBAUSIL. 19 Internationale Baustofftagung. Weimar (Germany), 2015. Band 2. P. 415-422 *(Показано активну структуроутворюючу роль цеолітового туфу в забезпеченні властивостей цементу).*

33. Вплив орґано-мінеральних добавок на властивості високоміцних бетонів / С. Й. Солодкий, Т. Є. Марків, О. М. Гуняк, Б. А. Гостинецький. Матеріали міжнародної науково-практичної конференції. Харків. ХНУСА, 2015. С. 29-34 *(Проведено аналіз результатів, сформульовані висновки).*

34. Марків Т. Є., Соболев Х. С., Гуняк О. М. Цеолітовмісні цементи для бетонів транспортного призначення. Матеріали III Всеукраїнської науково-технічної конференції «Сучасні тенденції розвитку і виробництва силікатних матеріалів». Львів, 2016. С. 97-99 *(Планування експериментальних досліджень, аналіз результатів).*

35. Sobol K., Markiv T., Hunyak O. Effect of mineral additives on structure and properties of concrete for pavements. Selected Scientific Papers-Journal of Civil Engineering, 2(12). 2017. P. 95-100 *(Постановка завдань досліджень, аналіз результатів, формулювання висновків).*

36. Markiv T., Turba Yu., Solodkyu S. The influence of polypropylene fibres on fracture parameters of concrete. IBAUSIL. 20 Internationale Baustofftagung. Weimar (Germany), 2018. Band 2. P. 923-929 *(Обґрунтовано використання поліпропіленової фібри для покращення параметрів тріщиностійкості бетонів).*

37. The effect of zeolitic tuff on the properties of concretes / T. Markiv, Kh. Sobol, O. Hunyak, M. Franus, W. Franus. The 10th International conference „The occurrence, properties and utilization of natural zeolites”. Cracow, 2018. P. 153-154 *(Проведено аналіз результатів, сформульовані висновки).*

38. Турба Ю.В., Марків Т.Є., Солодкий С.Й. Вплив дисперсного армування поліпропіленовими фібрами на тріщиностійкість дорожніх бетонів. Матеріали міжнародного семінару “Моделювання і оптимізація будівельних композитів”. Одеса, 2018. С. 119-121 *(Досліджено вплив дисперсного армування поліпропіленовими фібрами на тріщиностійкість дорожніх бетонів).*

39. The durability properties of concrete incorporating zeolitic tuff / Z. Blikharskyu, Kh. Sobol, T. Markiv, O. Pozniak, W. Franus. Proceedings of the 9th Croatian-Slovenian-Serbian Symposium on Zeolites. Split (Croatia), 2021. P. 27-30 *(Визначено ефективність використання цеолітового туфу для підвищення довговічності бетону).*

АНОТАЦІЯ

Марків Т.Є. Наукові засади отримання бетонів з підвищеною тріщиностійкістю за рахунок керування структуроутворенням на різних рівнях. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.23.05 Будівельні матеріали та вироби. - Національний університет “Львівська політехніка”, Львів, 2024.

Дисертаційна робота присвячена розробленню наукових засад одержання бетонів з підвищеною міцністю та тріщиностійкістю. Розроблено алгоритм багатопараметричного проектування бетонів класів за міцністю на стиск С25/30-С50/60, який передбачає раціональний підбір та оптимізацію технологічних факторів на різних структурних рівнях, що забезпечує підвищення тріщиностійкості. Розроблено системний підхід до вибору пуцоланових матеріалів і показано, що досліджені пуцоланові матеріали на основі природних і штучних цеолітів мають суттєвий потенціал для покращення властивостей бетонних сумішей та бетонів. Запропоновано розділити ефекти дії таких матеріалів на основні і додаткові, які необхідно враховувати при проектуванні бетонів. Розкрито фізико-хімічні закономірності та можливості направлено формування фазового складу цементної матриці бетону з пуцолановими матеріалами, створюючи умови для утворення додаткової кількості рівномірно розподілених модифікованих дрібнодисперсних продуктів гідратації, в тому числі голчасто-волокнистих гідросилікатів кальцію, які кольматують поровий простір цементного каменю. Це забезпечує ефект його самоармування на рівні мікроструктури, зменшення кількості дефектів, підвищення опору руйнуванню та синтез міцності бетонів як на розтяг при згині, так і на стиск, а також покращені експлуатаційні властивості бетонів. Показана важлива роль фракційного складу матеріалів пуцоланової природи активності у покращенні гранулометрії тверднучих систем на мезоструктурному рівні. Встановлено, що використання полідисперсного цеолітового туфу частково компенсує існуючу нестачу фракцій 60-160 мкм і створює умови для неперервності гранулометричного складу в системі “портландцемент-цеолітовий туф-дрібний заповнювач”, що забезпечує впорядкування порового простору на рівні мезоструктури бетону та щільнішу упаковку зерен. Підтверджено ефективність використання полідисперсного цеолітового туфу, який є джерелом легкодоступної додаткової води, для забезпечення поглибленої гідратації портландцементу та можливості одержання бетонів з підвищеною тріщиностійкістю в повітряно-сухих умовах тверднення.

Показано, що при введенні повітровтягувальних добавок зростає пластичність розчинової частини бетонної суміші за рахунок “ball-bearing” ефекту. Встановлено механізм підвищення тріщиностійкості бетону з повітровтягувальними добавками, який ґрунтується на формуванні в структурі бетону рівномірно розподілених бульбашок повітря з оболонкою, сформованою з продуктів взаємодії портландцементу з цеолітовим туфом, зокрема волокнистих

гідросилікатів кальцію, які забезпечують рівномірний розподіл напружень в бетоні, що сприяє дисипації енергії мікротріщиноутворення.

Показано, що використання полідисперсного цеолітового туфу, як пуцоланового матеріалу, незважаючи на його пористу структуру, у поєднанні з хімічними добавками пластифікуючої та повітровтягувальної дії робить їх ефективними компонентами бетонних сумішей різної консистенції. В таких бетонах (марка за осадкою конуса бетонної суміші S4, В/Ц=0,5) спостерігається деяке зниження міцності протягом 90 діб тверднення, але через 180 діб міцність на стиск бетонів збільшується, підвищується також морозостійкість, зменшуються усадка та глибина проникнення води.

Аналіз порової структури бетону (марка за осадкою конуса бетонної суміші S1) з полідисперсним цеолітовим туфом та пластифікуюче-повітровтягувальними добавками з використанням комп'ютерної мікротомографії свідчить, що при об'ємі втягнутого повітря 6,5% бульбашки повітря виступають демпферами напружень, а разом із модифікуванням мікро- та мезоструктури бетону призводять до зменшення мікротріщиноутворення на докритичній ($G_i=247,44$ Дж/м²) та сповільнення поширенню магістральних тріщин в закритичній ($G_i=492,28$ Дж/м²) стадіях. Такі бетони також характеризуються покращеними міцнісними та експлуатаційними властивостями: міцністю через 28 діб тверднення на стиск ($f_{cm}=65,8$ МПа) і розтяг при згині ($f_{ctb}=9,3$ МПа), низьким водопоглинанням ($W_m=2,1$ %), підвищеною морозо- (F200) та корозійною стійкістю ($K_{st}=1,23$).

Проведено оцінку впливу армування бетону різними видами фібри на міцнісні властивості та характеристики тріщиностійкості бетонів. Досліджено, що композиційне полідисперсне армування фібрами ФПДП2 та ФПП1 є найбільш ефективним і дозволяє підвищити питомі енерговитрати на статичне деформування до моменту початку руху магістральної тріщини $G_i=207,34$ Дж/м², питомі енерговитрати на локальне статичне деформування в зоні магістральної тріщини $G_l=660,19$ Дж/м², питомі ефективні енерговитрати на статичне руйнування $G_F=840,44$ Дж/м² в 1,8; 2,7 та 2,6 раз відповідно порівняно з контрольним складом. Аналіз бетону на рівні мезо- та макроструктури показує, що ці показники досягаються внаслідок "Bridge" ефекту, який утворюється при армуванні бетону фіброю. При цьому спостерігається сповільнення розвитку макротріщин в докритичній стадії деформування та зростає опір дефрагментації зразків в закритичній стадії руйнування таких бетонів. Відбувається стабілізація деформацій усадки через 22 доби тверднення та подальше їх зменшення на 26% порівняно з неармованим бетоном.

Обґрунтовано наукові засади розроблення принципово нової концепції створення бетонів з підвищеною міцністю і тріщиностійкістю, яка ґрунтується на можливостях регулювання характеристик тріщиностійкості за рахунок зміни параметрів проектування та технологічних факторів, а саме – пуцоланових матеріалів цеолітового типу, пластифікуюче-повітровтягувальних добавок оптимального складу, фібри різних типів та розмірів, що забезпечить отримання щільної неперервно армованої на всіх рівнях структури бетону, який характеризується покращеними експлуатаційними властивостями.

Встановлено, що бетон, який містить 10 мас.% цеолітового туфу, різні типи

фібри (1,05 кг/м³ ФПП1, 8 кг/м³ ФПДП2), пластифікуючу (1,5 мас.%) і повітровтягувальну добавки (0,4 мас.%), незважаючи на менший вміст портландцементу, характеризується подібною поведінкою під навантаженням на стадії після утворення тріщин, як і бетон, в складі якого є тільки фібра, і має покращені експлуатаційні властивості. Такий мультикомпонентний бетон має покращені міцнісні властивості та параметрами тріщиностійкості зі збільшенням енергії руйнування на 35,1% і критерія крихкості на 61,5% порівняно з контрольним бетоном.

Здійснено промислове впровадження та розраховано техніко-економічну ефективність використання бетонів з підвищеною міцністю та тріщиностійкістю, одержаних за рахунок керування структуроутворенням на різних рівнях.

Ключові слова: бетони з підвищеною тріщиностійкістю, пуцоланові матеріали, цеолітовий туф, пластифікуючі і повітровтягувальні добавки, фібра, структуроутворення, технологічні фактори, структурні рівні, довговічність.

ABSTRACT

Markiv T.Ye. Scientific principles of obtaining concretes with increased crack resistance due to control of structure formation at different levels. – Qualifying scientific work on manuscript rights.

The thesis for Doctor of Technical Sciences degree. Specialty 05.23.05 Building materials and products. Lviv Polytechnic National University, Lviv, 2024.

The thesis is devoted to the development of scientific principles for obtaining concretes with increased strength and crack resistance. An algorithm for multi-parameter design of concretes of C25/30-C50/60 compressive strength classes has been developed, which provides the rational selection and optimization of technological factors at different structural levels, which ensures increased crack resistance. A systematic approach to the selection of pozzolanic materials was developed and it was shown that the investigated pozzolanic materials based on natural and artificial zeolites have a significant potential for improving the properties of concrete mixtures and hardened concretes. It is proposed to divide the effects of such materials into main and additional ones, which must be taken into account when designing concrete. The physico-chemical regularities and possibilities of the directed formation of the phase composition of the cement matrix of concrete with pozzolanic materials are revealed, creating conditions for the formation of an additional amount of evenly distributed modified finely dispersed hydration products, including needle-fibrous calcium hydrosilicates that colmatize the pore space of cement paste. This provides the effect of its self-reinforcement at the microstructural level, the reduction of the number of defects, the increase of resistance to destruction and the synthesis of both tensile and compressive strength of concrete, as well as improved operational properties of concrete. The important role of the fractional composition of materials of the pozzolanic nature of activity in improving the granulometry of hardening systems at the mesostructural level is shown. It was established that the use of polydisperse zeolitic tuff creates conditions for the continuity of the granulometric composition and partly compensates usually lack of fractions 60-160 μm in ordinary concretes, which are in the system of "Portland cement- zeolitic tuff-

fine aggregate", which ensures the arrangement of the pore space at the level of the mesostructure of concrete and denser packing of grains. The effectiveness of the use of polydisperse zeolitic tuff, which is a source of readily available additional water, to ensure deep hydration of Portland cement and the possibility of obtaining concrete with increased strength in air-dry hardening conditions has been confirmed.

It has been established that the addition of air-entraining admixtures increases the plasticity of the mortar part of the concrete mixture due to the "ball-bearing" effect. The mechanism for increasing the crack resistance of concrete with air-entraining admixtures has been established, which is based on the formation of evenly distributed air bubbles in the concrete structure with a shell formed from products of interaction between Portland cement and zeolitic tuff, in particular, fibrous calcium hydrosilicates, which ensure a uniform distribution of stresses in concrete, which contributes to the dissipation of the energy of microcracking.

It is shown that the use of polydisperse zeolitic tuff as the mineral addition, despite its porous structure, in combination with chemical admixtures of plasticizing and air-entraining action makes them effective components of concrete mixtures of various consistencies. Some reduction of strength is observed in concretes (slump class S4, W/C=0.5) during 90 days of hardening, but after 180 days, the compressive strength, frost resistance of concrete increase, shrinkage and water penetration depth decrease.

Analysis of the pore structure of concrete (slump class S1) with a polydisperse zeolitic tuff, plasticizer and air-entraining admixtures using computer microtomography shows that with an entrained air volume of 6.5%, such air bubbles act as stress dampers, and together with the modification of the micro- and mesostructure of concrete lead to the decrease in the formation of microcracks in the precritical ($G_i=247.44 \text{ J/m}^2$) and a slowdown in the propagation of main cracks in the post-critical ($G_i=492.28 \text{ J/m}^2$) stages. Such concretes are also characterized by improved strength and performance properties: the compressive ($f_{cm}=65.8 \text{ MPa}$) and flexural strength ($f_{stb}=9.3 \text{ MPa}$) after 28 days of hardening, low water absorption ($W_m=2.1\%$), increased frost (F200) and corrosion resistance ($CR_{stb}=1.23$).

The influence of concrete reinforcement with different types of fiber on the strength properties and crack resistance characteristics of concrete was evaluated. It has been investigated that the composite polydisperse reinforcement with fibers FPDP2 and FPP1 is the most effective and allows to increase the specific energy consumption for static deformation until the moment of the main crack movement $G_i=207.34 \text{ J/m}^2$, specific energy consumption for local static deformation in the main crack zone $G_i=660.19 \text{ J/m}^2$, specific effective energy consumption for static destruction $G_F=840.44 \text{ J/m}^2$ by 1.8; 2.7 and 2.6 times, respectively, compared to the control concrete. Analysis of concrete at the meso- and macrostructural levels shows that these parameters are achieved due to the "Bridge" effect, which is formed when concrete is reinforced with fiber. At the same time, there is a slowdown in the development of macrocracks in the precritical stage of deformation, and the resistance to defragmentation of samples in the post-critical stage of destruction of such concretes increases as well. Shrinkage deformations stabilize after 22 days of hardening and their subsequent reduction by 26% compared to unreinforced concrete is taken place.

The scientific bases of the development of a fundamentally new concept of

concrete production with increased crack resistance are substantiated, which is based on the possibility of crack resistance parameters regulation due to changes in design parameters and various technological factors, namely the use of pozzolanic materials of the zeolite type, plasticizing and air-entraining admixtures of optimal composition, fibers of various types and sizes, which will ensure obtaining a dense, continuously reinforced concrete structure at all levels, which is characterized by improved operational properties.

It was established that concrete containing 10 wt.% of zeolitic tuff, different types of fibers (1.05 kg/m³ FPP1, 8 kg/m³ FPDP2), plasticizer (1.5 wt.%) and air-entraining admixtures (0.4 wt.%), despite the lower content of Portland cement, is characterized by a similar behaviour under the load at the stage after the formation of cracks, as concrete, which contains only fiber, and it has better operational properties. Such multi-component concrete is characterized by improved strength properties and crack resistance parameters with an increase in fracture energy by 35.1% and brittleness criterion by 61.5% compared to the reference ordinary concrete.

The industrial implementation was carried out and the technical and economic efficiency of using concrete with increased crack resistance, due to the regulation of structure formation at different levels, was calculated.

Keywords: concretes with increased crack resistance, pozzolanic materials, zeolitic tuff, plasticizing and air-entraining admixtures, fibers, structure formation, technological factors, structural levels, durability.