

УДК 691.32

DOI: 10.15587/2706-5448.2021.225500

## ПІДВИЩЕННЯ ТРІЩИНОСТІЙКОСТІ ВИСОКОМІЦНИХ БЕТОНІВ, ЗДАТНИХ ДО САМОУЩІЛЬНЕННЯ

Троян В. В., Кіндрась Б. П.

*Об'єктом дослідження є високоміцний бетон, здатний до самоущільнення, що не потребує додаткової вібрації при укладанні. Одним з найбільш проблемних питань високоміцних бетонів, здатних до самоущільнення є підвищене тріщиноутворення, пов'язане з більшими усадочними деформаціями таких бетонів та їх крихким руйнуванням.*

*Встановлено зменшення усадочних деформацій бетону при заміні частини цементу мінеральними добавками. Такий ефект пояснюється зменшенням вмісту цементу і, відповідно, зменшенням хімічної складової аутогенної усадки бетону, та посиленням адсорбційного зв'язування капілярної вологи мінеральними добавками, що зменшує фізичну складову усадки бетону внаслідок висихання. При цьому тип та дисперсність використаної мінеральної добавки можуть впливати на усадочні деформації бетону. Істотне зменшення усадочних деформацій при використанні метакаоліну пояснюється збільшенням кількості новоутвореного еттрингіту внаслідок реагування активного  $Al_2O_3$  метакаоліну з двохводним гіпсом цементу. Встановлено, що заміна цементу 10 % мінеральних добавок призводить до зниження значення критичного коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН), що компенсується зниженням крихкості руйнування бетону (збільшенням ділянки мікропластичних деформацій). В той же час, вид використаної мінеральної добавки не впливає на значення критичного КІН, але істотно впливає на крихкість руйнування зразків бетону. Введення 10 % мінеральних добавок (на заміну цементу) позитивно позначалося на збереженості рухомості бетонних сумішей, здатних до самоущільнення, найкращі результати за цим критерієм спостерігались при використанні мікрокремнезему, золи винесення та вапнякового борошна. Всі мінеральні модифікатори, крім мікрокремнезему, призводили до зниження міцності високоміцних бетонів на стиск на всіх термінах тверднення. У випадку міцності бетону на розтяг при згині та розколюванні, при введенні мікрокремнезему, метакаоліну та золи винесення спостерігався позитивний ефект, порівняно з базовим складом без добавок.*

*Комплексне врахування одержаних результатів дозволить обґрунтовано підходити до проектування високоміцних бетонів, здатних до самоущільнення підвищеної тріщиностійкості.*

**Ключові слова:** *високоміцний бетон, бетон здатний до самоущільнення, тріщиностійкість бетону, модуль пружності, коефіцієнт інтенсивності напружень.*

### 1. Вступ

Використання високоміцних бетонів з бетонних сумішей здатних до

самоущільнення, що не потребують додаткової вібрації, дозволяє зменшувати перетин бетонних конструкцій, а отже їх вартість при забезпеченні однакової несучої здатності. В той же час, такі бетонні конструкції потребують забезпечення тріщиностійкості бетону, оскільки тріщиноутворення може збільшувати проникність бетону конструкції щодо агресивних середовищ, зменшуючи їх довговічність. Проблема тріщиноутворення особливо актуальна для бетонів здатних до самоущільнення, що мають більші усадочні деформації ніж звичайний бетон, та високоміцних бетонів, що характеризуються крихким руйнуванням. Вирішення проблеми тріщиностійкості таких бетонів лежить в площині рецептури – на рівні заповнювачів, в'язучих речовин, мінеральних та хімічних добавок.

Таким чином, враховуючи поширення використання високоміцних бетонів здатних до самоущільнення, що характеризуються підвищеними усадочними деформаціями та крихким руйнуванням, актуальним є дослідження можливостей підвищення їх тріщиностійкості на рецептурному рівні. Проблема тріщиностійкості високоміцних бетонів здатних до самоущільнення особливо актуальна з точки зору забезпечення довговічності бетонних конструкцій зі зменшеним перетином. Комплексне врахування результатів таких досліджень дозволить обґрунтовано підходити до проектування високоміцних бетонів здатних до самоущільнення підвищеної тріщиностійкості.

## **2. Об'єкт дослідження та його технологічний аудит**

*Об'єктом дослідження є високоміцний бетон, здатний до самоущільнення, що не потребує додаткової вібрації при укладанні. Для контролю реології бетонних сумішей, здатних до самоущільнення можуть бути використані наступні критерії: діаметр розтікання (>620 мм, марка F6) та час розтікання до Ø 500 мм (3–5 с). Високоміцними традиційно вважають бетони класів міцності С60 та більше. Одержання високоміцних бетонів передбачає використання підвищеної кількості в'язучих речовин та низьке водоцементне відношення. Підвищена витрата в'язучих речовин та дисперсних наповнювачів потребується для забезпечення здатності бетонних сумішей до самоущільнення. Внаслідок цього, одним з найбільш проблемних питань високоміцних бетонів, здатних до самоущільнення є підвищене тріщиноутворення, пов'язане з більшими усадочними деформаціями таких бетонів та їх крихким руйнуванням.*

## **3. Мета та задачі дослідження**

*Метою роботи є підвищення тріщиностійкості високоміцних бетонів з бетонних сумішей, здатних до самоущільнення за рахунок модифікації мінеральними добавками.*

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

1. Дослідити вплив мікрокремнезему, метакаоліну, золи винесення та вапнякового борошна на реологічні властивості бетонних сумішей, здатних до самоущільнення.
2. Дослідити ефективність використання мікрокремнезему, метакаоліну, золи винесення та вапнякового борошна за критерієм міцності високоміцних бетонів.
3. Оцінити вплив мінеральних модифікаторів на показники тріщиностійкості високоміцних бетонів з бетонних сумішей, здатних до

самоушільнення за комплексом критеріїв (усадочні деформації, початковий модуль пружності, критичний КІН, крихкість руйнування).

#### **4. Дослідження існуючих рішень проблеми**

Бетони, здатні до самоушільнення (SCC), що вперше були розроблені в Японії, не вимагають додаткової вібрації для ущільнення, що зменшує витрати на укладання та покращує умови праці [1]. До недоліків SCC відносять більшу усадку, порівняно зі звичайним бетоном, що призводить до збільшення тріщиноутворення [2, 3]. Розрізняють такі основні типи усадочних деформацій SCC: аутогенна усадка внаслідок хімічних реакцій між цементом і водою, усадка внаслідок випаровування вільної води з пор затверділого бетону та пластична усадка ще не затверділого бетону [4, 5]. Якщо аутогенна усадка SCC може бути на рівні усадки звичайного бетону, то усадка внаслідок випаровування води з пор бетону у випадку SCC є більш значною. Зниження водно-цементного відношення та більший вміст цементу призводить до збільшення аутогенної усадки високоміцних бетонів. Міжнародні дослідження свідчать, що усадка SCC на 10–50 % вища, ніж усадка звичайного бетону [6]. При цьому, розтріскування бетону починається, коли розтягувальні напруження досягають граничного значення міцності на розтяг [7]. Зазвичай усадочні тріщини в SCC спостерігаються на ранніх термінах гідратації [4, 8]. Так, дослідження усадки бетону в обмежених умовах свідчить, що розтріскування SCC починалось через 8–13 діб, в той час як звичайний бетон не мав усадочних тріщин до 28 діб [9].

Для зменшення деформацій усадки рекомендується забезпечувати відповідний догляд за бетоном [1]. Також, з цією метою використовують мінеральні та хімічні розширювальні та протиусадочні добавки (SRA) [10, 11]. SRA запобігають усадочному розтріскуванню за рахунок зменшення випаровування води з капілярних пор бетону, однак можуть негативно впливати на реологічні властивості бетонних сумішей. Підвищення тріщиностійкості бетону також досягається при додаванні армуючих волокон, які також призводять до погіршення реології бетонних сумішей SCC [12, 13].

Більший вміст дрібних фракцій наповнювачів та цементу призводить до збільшення вмісту цементуючої пасти в SCC, ніж в звичайному бетоні, що збільшує аутогенну усадку бетону та усадку внаслідок випаровування води [4, 14]. Однак на значення усадки SCC також впливають інші фактори, зокрема пов'язані з капілярним тиском [15]. Так, усадка SCC може зменшуватись при використанні наповнювачів, таких як мікрокремнезем [16], зола виносу та вапняк [17]. Відомий позитивний вплив на зменшення деформацій бетону, спричинених фізичними та хімічними факторами, добавки метакаоліну [18, 19].

Слід відзначити, що ризик тріщиноутворення залежить не лише від усадки, на цей параметр також впливають такі властивості бетону, як модуль пружності, повзучість, міцність на розтяг тощо [20]. Всі ці властивості слід враховувати при оцінці тріщиностійкості SCC [21]. Проте, результатів комплексних досліджень таких властивостей SCC в літературі недостатньо. Спробу комплексної оцінки тріщиностійкості SCC з вапняком і

мікрокремнеземом шляхом врахування властивостей, що впливають на ризик тріщиноутворення (усадка, модуль пружності, повзучість, параметри руйнування) наведено в роботі [22]. Наведені результати моделювання тріщиностійкості збігаються з результатами випробувань тріщиноутворення SCC за методом з обмежуючим кільцем (RRTM) [23]. Доцільним є проведення подібних комплексних досліджень SCC із золою винесення та метакаоліном, що характеризуються наявністю в складі активного  $Al_2O_3$  та можуть здійснювати істотний вплив на тріщиностійкість бетонів [18, 19].

Отже, за результатами огляду літератури можна відзначити можливість підвищення тріщиностійкості високоміцних бетонів з бетонних сумішей, здатних до самоущільнення (без погіршення рухомості), шляхом модифікації мінеральними добавками (мікрокремнезем, вапняк, зола винесення, метакаолін). Це потребує комплексного дослідження усадки, модуля пружності та параметрів, що характеризують тріщиноутворення модифікованих бетонів.

## **5. Методи досліджень**

В дослідженнях використано портландцемент СЕМ І 42,5 R (Публічне акціонерне товариство «Подільський Цемент», СРН, Україна). Мінеральні добавки: метакаолін METAVER I (NEWCHEM AG, Австрія), мікрокремнезем Microsilica 940 (Elkem, Норвегія), вапнякове борошно (Державне підприємство Закупнянський кар'єр, Україна). Заповнювачі: пісок річковий кварцовий, щебінь гранітний фракцій 5–10 та 10–20 мм. Добавки суперпластифікатори виробництва «МС-Vauchemie», Німеччина.

Фізико-механічні дослідження здійснювали у відповідності з діючими нормативними документами. Бетонні суміші досліджували за ДСТУ EN 206:2018, ДСТУ Б В.2.7-176:2008, ДСТУ Б В.2.7-96-2000 та ДСТУ Б В.2.7-114-2002. Міцність бетону визначали за ДСТУ EN 206:2018, ДСТУ Б В.2.7-176:2008, ДСТУ Б В.2.7-214:2009, ДСТУ Б В.2.7-224:2009. Модуль пружності бетону визначали відповідно ДСТУ Б В.2.7-217:2009. Параметри тріщиностійкості (в'язкості руйнування) бетонів при статичному навантаженні визначали на зразках-призмах з ініційованою тріщиною за ДСТУ Б В.2.7-227:2009.

## **6. Результати дослідження**

### **6.1. Вплив мінеральних добавок на реологічні властивості бетонних сумішей, здатних до самоущільнення**

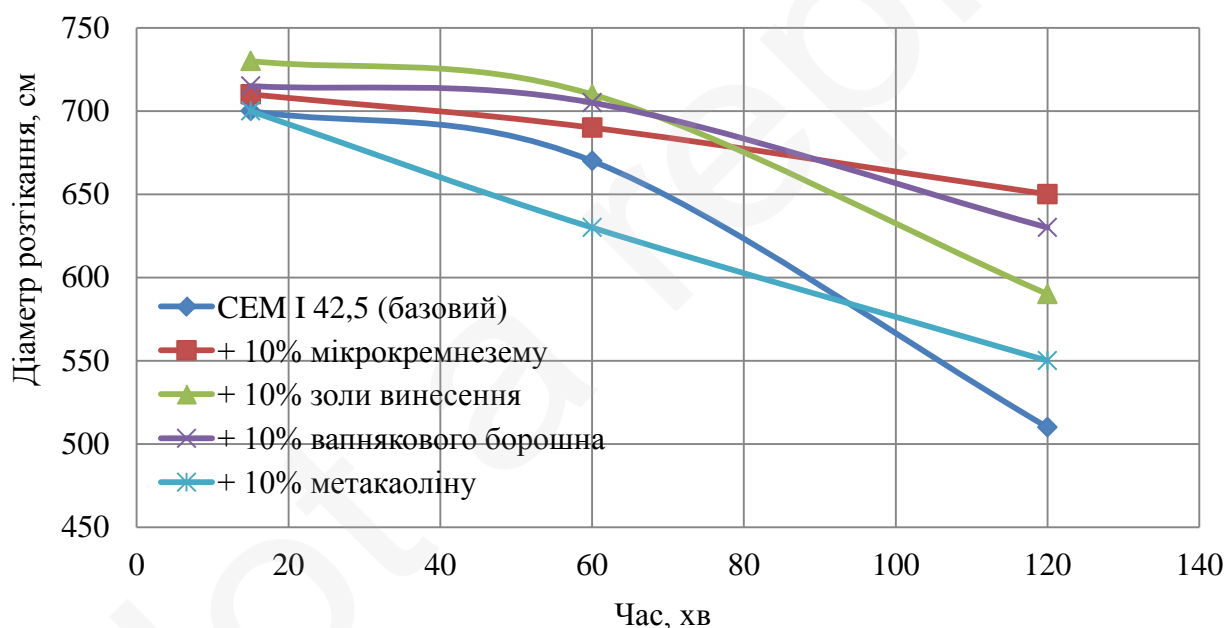
Дослідження впливу мінеральних добавок на реологічні властивості бетонних сумішей здатних до самоущільнення проводилися за критеріями: діаметра розтікання, швидкості розтікання до  $\varnothing$  500 мм та збереження консистенції в часі.

Склади бетонних сумішей характеризувались сталим водоцементним відношенням (В/Ц=0,3). Склад № 1 (базовий) характеризувався вмістом  $500 \text{ кг/м}^3$  СЕМ І 42,5. В якості мінеральних добавок використовували: золу винесення, мікрокремнезем, вапнякове борошно, метакаолін у кількості 10 % на заміну цементу.

Реологічні властивості бетонної суміші контролювали на трьох часових проміжках: 15 хв, 60 хв та 120 хв після замішування з водою. В якості вимог,

що висуваються до реологічних властивостей бетонних сумішей, здатних до самоущільнення, використовували діаметр розтікання (>620 мм, марка F6) та час розтікання до Ø 500 мм (3–5 с) та їх збереженість в часі.

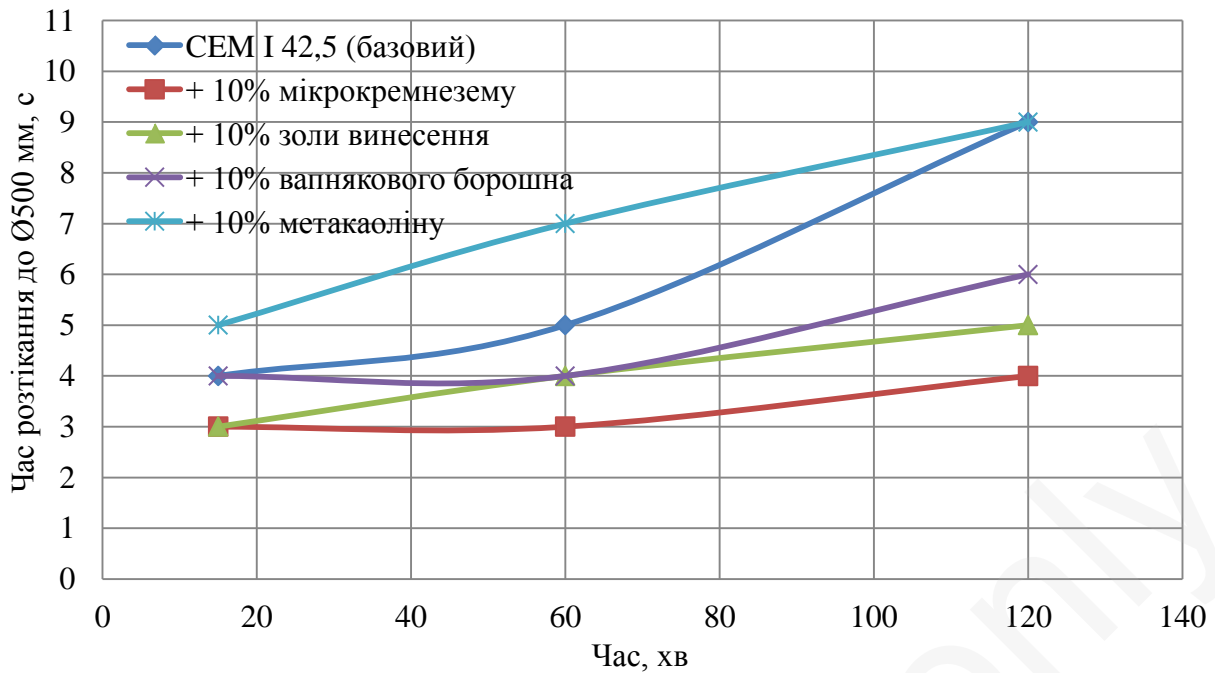
Базовий склад бетонної суміші, при витраті суперпластифікатору (СП) 1 % від маси цементу, характеризувався маркою за розтіканням F6 лише протягом 60 хв, а вже через 120 хв марка за розтіканням знизилась до F4 (рис. 1). Бетонна суміш з 10 % золи винесення, при витраті СП 1 %, також протягом 60 хв характеризувалася маркою за розтіканням F6, яка через 120 хв становила F5 (рис. 1). В той же час, бетонна суміш з 10 % мікрокремнезему, що потребувала збільшеної витрати СП (1,35 % від маси в'язучого), протягом 120 хв характеризувалася маркою за розтіканням F6. Схожі результати спостерігалися в складі бетонної суміші з вмістом 10 % вапнякового борошна та 1 % СП, що також характеризувалася розтіканням в межах однієї марки F6 протягом 120 хв. Використання 10 % метакаоліну на заміну цементу призводить до значного збільшення водопотреби бетонної суміші або збільшення витрати СП до 1,4 % від маси в'язучого. Бетонна суміш відповідала марці за розтіканням F6 протягом 60 хв, а через 120 хв – марці F4 (рис. 1).



**Рис. 1.** Діаметр розтікання бетонної суміші в часі

Загалом, як видно з рис. 1, у всіх складах бетонних сумішей спостерігається закономірна втрата рухомості, особливо помітна через 120 хв, що найшвидше відбувається у випадку базового складу бетонної суміші без мінеральних добавок з найбільшою витратою цементу.

Швидкість розтікання досліджуваних бетонних сумішей до Ø 500 мм (рис. 2) відтворює основні закономірності, відзначені вище. Показником часу розтікання до Ø 500 мм – 3–4 с протягом 120 хв характеризувався склад із мікрокремнеземом. Склад бетону із золою виносу характеризувався розтіканням бетонної суміші до Ø 500 – 4–5 с протягом 120 хв. Бетонна суміш з вапняковим борошном мала швидкість розтікання до Ø 500 4 с протягом 60 хв та 6 с через 120 хв.



**Рис. 2.** Час розтікання бетонної суміші до діаметру 500 мм

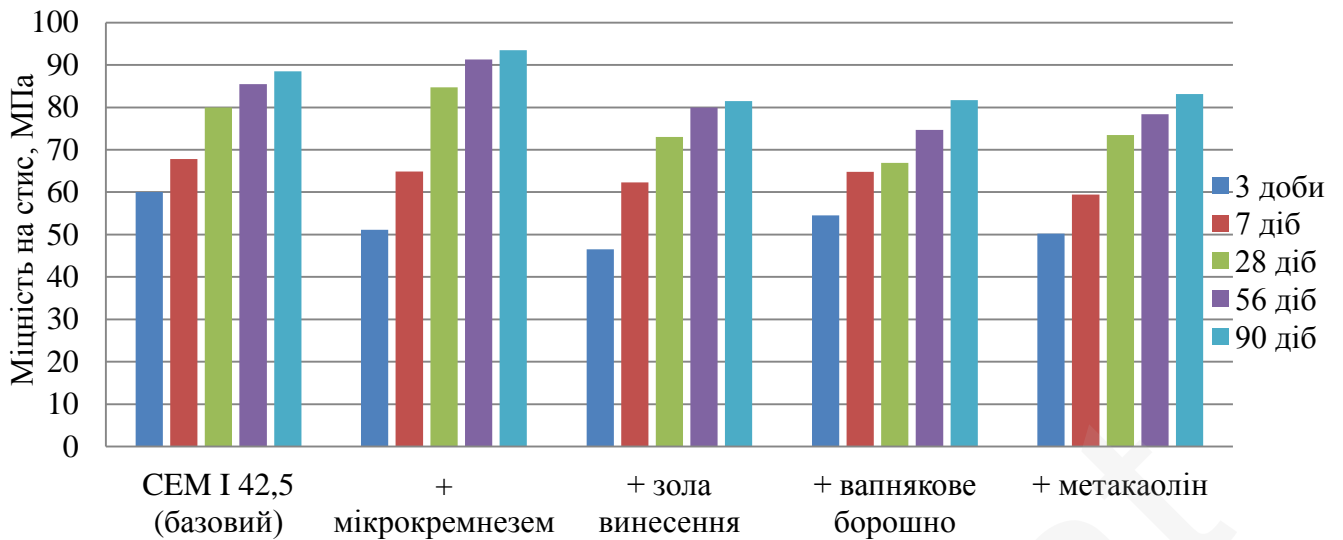
При введенні метакаоліну спостерігалось істоте уповільнення розтікання бетонної суміші до 5–9 с на всіх контрольних проміжках часу. Істотною втратою швидкості розтікання (9 с) через 120 хв характеризувався базовий склад бетону без мінеральних добавок.

Таким чином, за критерієм рухомості всі досліджувані склади бетонів можуть бути використані для виготовлення збірних залізобетонних конструкцій. В той же час, за критерієм збереження рухомості протягом 120 хв для виготовлення монолітних конструкцій можна рекомендувати лише склади бетонів з мікрокремнеземом, золою винесення та вапняковим борошном.

## **6.2. Дослідження впливу мінеральних добавок на міцність високоміцних бетонів**

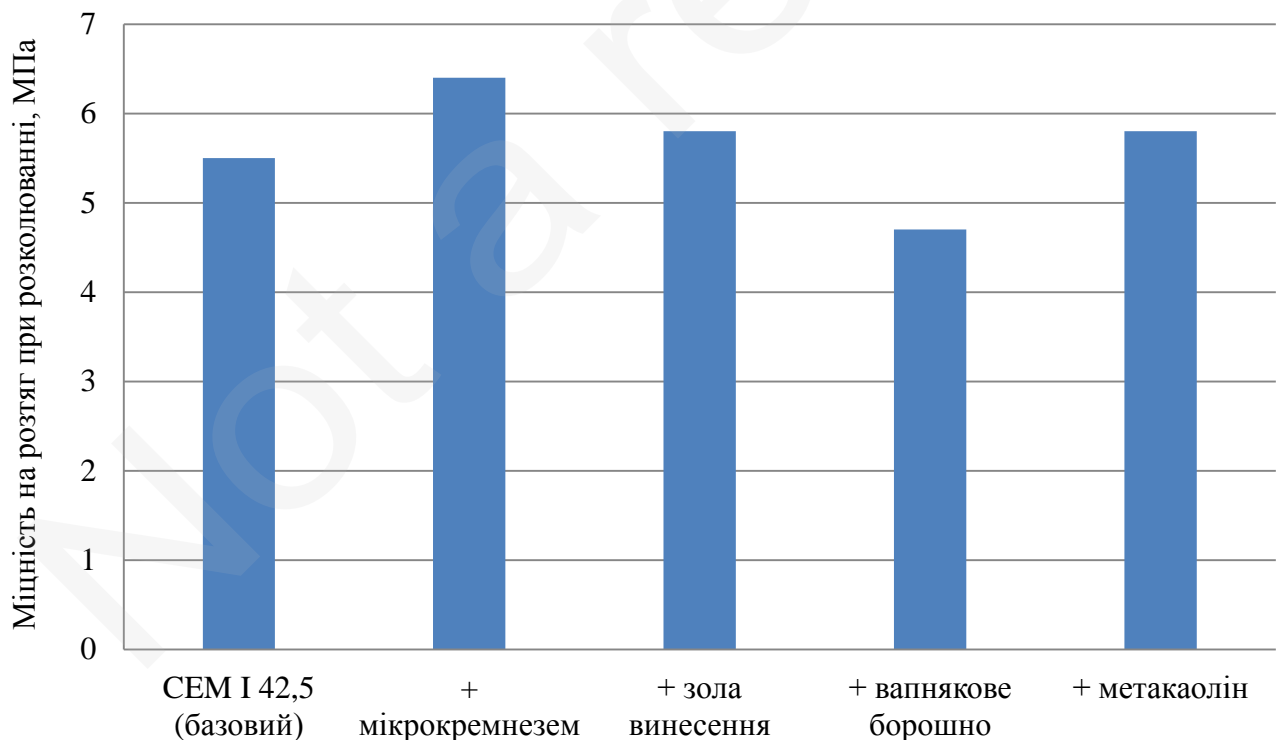
Дослідження ефективності введення 10 % (від маси в'язучого) мінеральних добавок за критерієм міцності бетонів на стиск, розтяг при розколюванні та розтяг при згині наведено на рис. 3–5, відповідно.

Як видно з рис. 3, найбільшою міцністю на 3 добу тверднення (60 МПа) характеризується базовий склад бетону без мінеральних добавок. Найменшу міцність на 3 добу (46,5 МПа) має склад бетону з золою виносу. Найкращий результат на 28 добу (84,7 МПа) спостерігається при додаванні мікрокремнезему. При введенні 10 % вапнякового борошна на 28 добу спостерігалася найменша міцність (66,9 МПа). На 90 добу міцність всіх досліджуваних складів бетону відповідала класам С60/75–С70/85. Введення мікрокремнезему дозволило одержати клас бетону за міцністю С70/85 (93,5 МПа).



**Рис. 3.** Міцність високоміцних бетонів на стиск

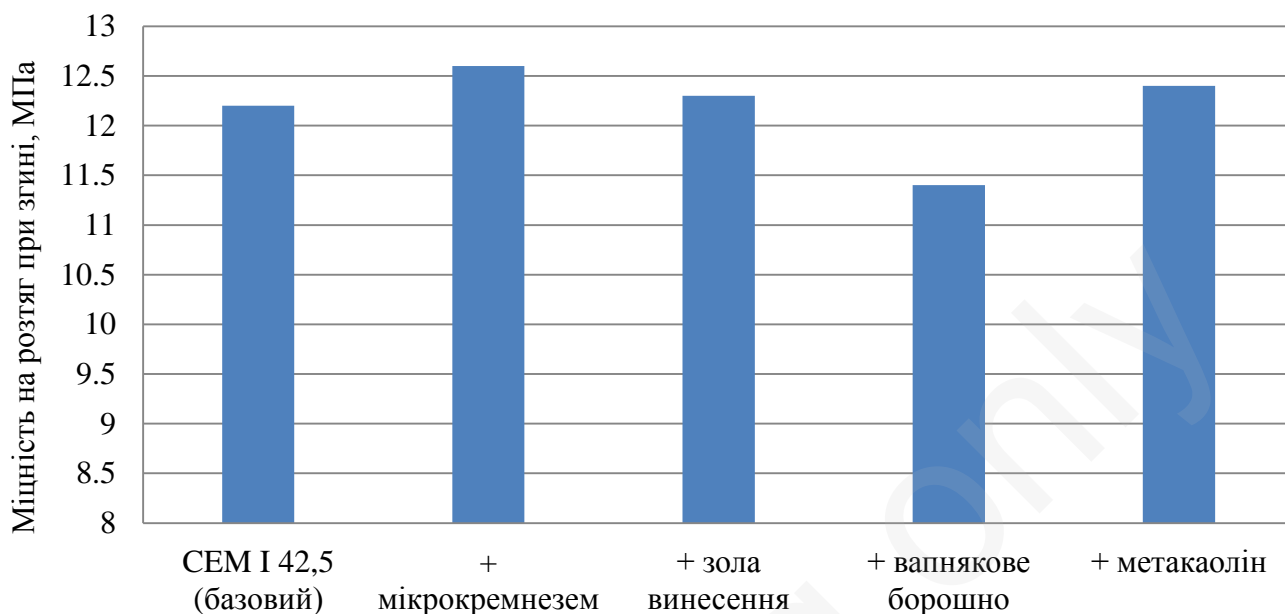
Дослідження міцності високоміцних бетонів на розтяг при розколюванні свідчить (рис. 4), що введення 10 % вапнякового борошна знижує цей показник до 4,7 МПа, порівняно з базовим складом (5,5 МПа). При використанні 10 % золи виносу та метакаоліну спостерігається незначне підвищення міцності на розтяг при розколюванні до 5,8 МПа. Введення до складу бетону 10 % мікрокремнезему підвищує міцність на розтяг при розколюванні до 6,4 МПа.



**Рис. 4.** Міцність високоміцних бетонів на розтяг при розколюванні

Результати досліджень міцності бетону на розтяг при згині (рис. 5) відтворюють основні закономірності, наведені вище. Склади бетону з 10 % золи виносення та метакаоліну незначно перевищували міцність на розтяг при згині

базового складу (12,3–12,4 МПа). Введення 10 % мікрокремнезему дозволило підвищити міцність на розтяг при згині до 12,6 МПа. Введення 10 % вапнякового борошна знизило міцність бетону на розтяг при згині до 11,4 МПа.



**Рис. 5.** Міцність високоміцних бетонів на розтяг при згині

Таким чином, за критеріями міцності всі досліджувані рецептури можуть бути віднесені до високоміцних бетонів класів С60/75–С70/85. Найбільшими показниками міцності характеризувався склад бетону з 10 % мікрокремнезему, якому дещо поступалися за міцністю базовий склад бетону, та склади з 10 % золи виносення та метакаоліну. Найменшими показниками міцності характеризувався склад бетону з 10 % вапнякового борошна.

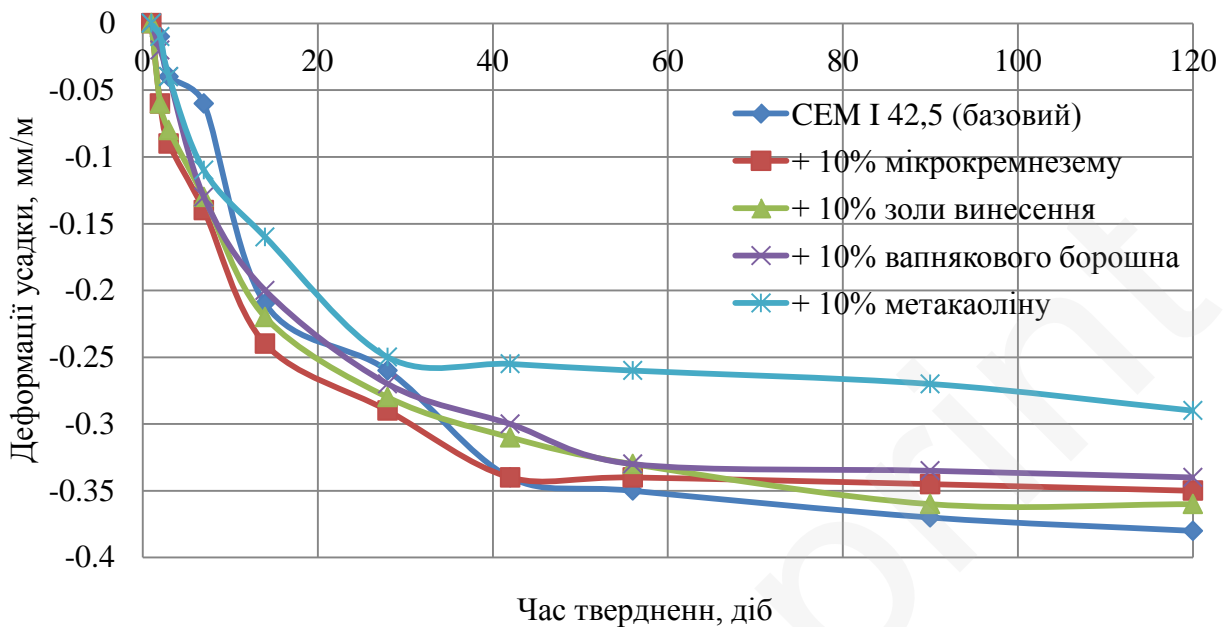
### **6.3. Дослідження впливу мінеральних добавок на деформативні властивості високоміцних бетонів**

Основними причинами утворення тріщин в бетоні є усадочні деформації бетону. Розрізняють дві основні складових усадочних деформацій бетону: деформації, які відбуваються внаслідок випаровування вільної води з пор бетону, що є фізичним процесом та аутогенні усадочні деформації внаслідок хімічних реакцій між цементом і водою. Якщо вміст цементу в бетоні переважно впливає на значення хімічної (аутогенної) складової усадки, то наявність дисперсного мінерального компонента впливає на силу фізичного (адсорбційного) зв'язування капілярної вологи в порах бетону і, відповідно, на величину фізичної складової усадки.

На рис. 6 наведено результати дослідження усадочних деформацій, модифікованих мінеральними добавками високоміцних бетонів на зразках – призмах (500x100x100 мм) протягом 120 діб у повітряно-сухих умовах. Наведені дані свідчать, що введення до складу бетону 10 % золи виносення, мікрокремнезему та вапнякового борошна дозволило знизити усадочні деформації на 120 добу до 0,34–0,36 мм/м. Введення 10 % метакаоліну знизило



усадку до 0,29 мм/м, порівняно з усадкою базового складу без добавок, що досягала 0,38 мм/м. В той же час, на 7 добу тверднення базовий склад SCC характеризувався меншою усадкою (0,06 мм/м), ніж склади з мінеральними добавками (0,11–0,14 мм/м).



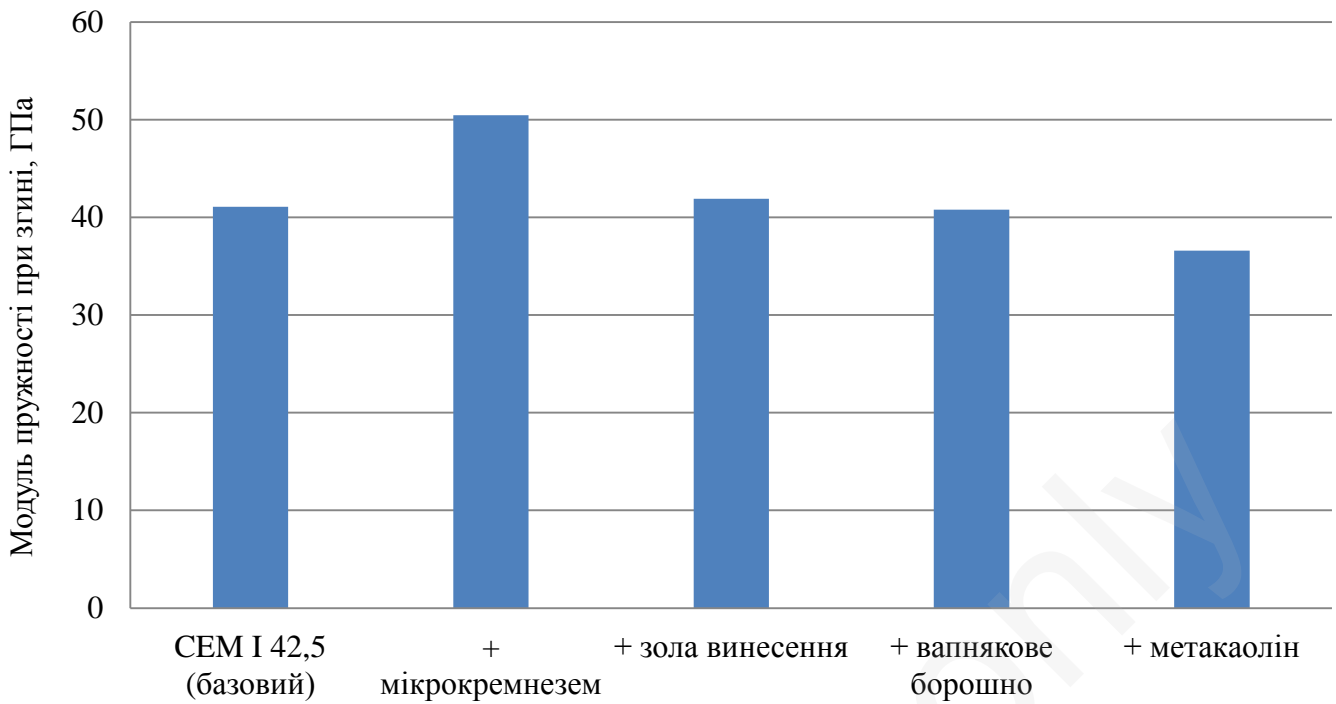
**Рис. 6.** Усадочні деформації високоміцних бетонів

Усадочні деформації бетону, при їх обмеженні, можуть призводити до виникнення напружень, що перевищують міцність бетону на розтяг та спричиняють тріщиноутворення. При цьому напруження бетону, що виникають внаслідок його деформацій, прямо пропорційні його модулю пружності.

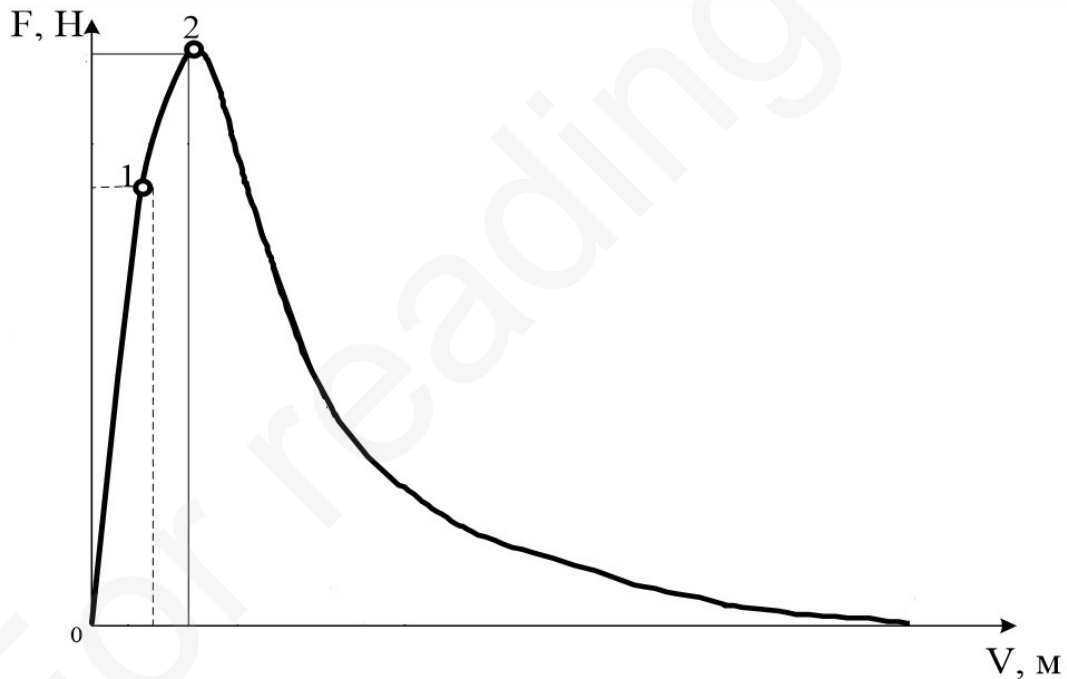
За результатами досліджень початкових модулів пружності бетонів при згині (рис. 7) у віці 56 діб найнижчим показником модуля пружності 36,6 ГПа характеризувався склад бетону з 10 % метакаоліну. Модулями пружності 41–42 ГПа характеризувалися бетони базового складу та складів бетону з 10 % золи винесення та вапнякового борошна. Найвищим модулем пружності 50,4 ГПа характеризувався склад бетону з 10 % мікрокремнезему.

Оцінку тріщиностійкості високоміцних бетонів здійснювали за показником критичного коефіцієнту інтенсивності напружень (КІН) Кіс. Значення критичного КІН, що відповідають початку утворення мікротріщин, визначали за діаграмами деформування при згині зразків-призм бетонів з ініційованою тріщиною, як кінець лінійної ділянки (0–1) пружного деформування матеріалу (рис. 8).

В якості показника крихкості руйнування бетону розглядали розмір ділянки мікропластичних деформацій (1–2), що відповідає різниці деформацій початку мікротріщиноутворення (1) та початку утворення магістральної тріщини (2).

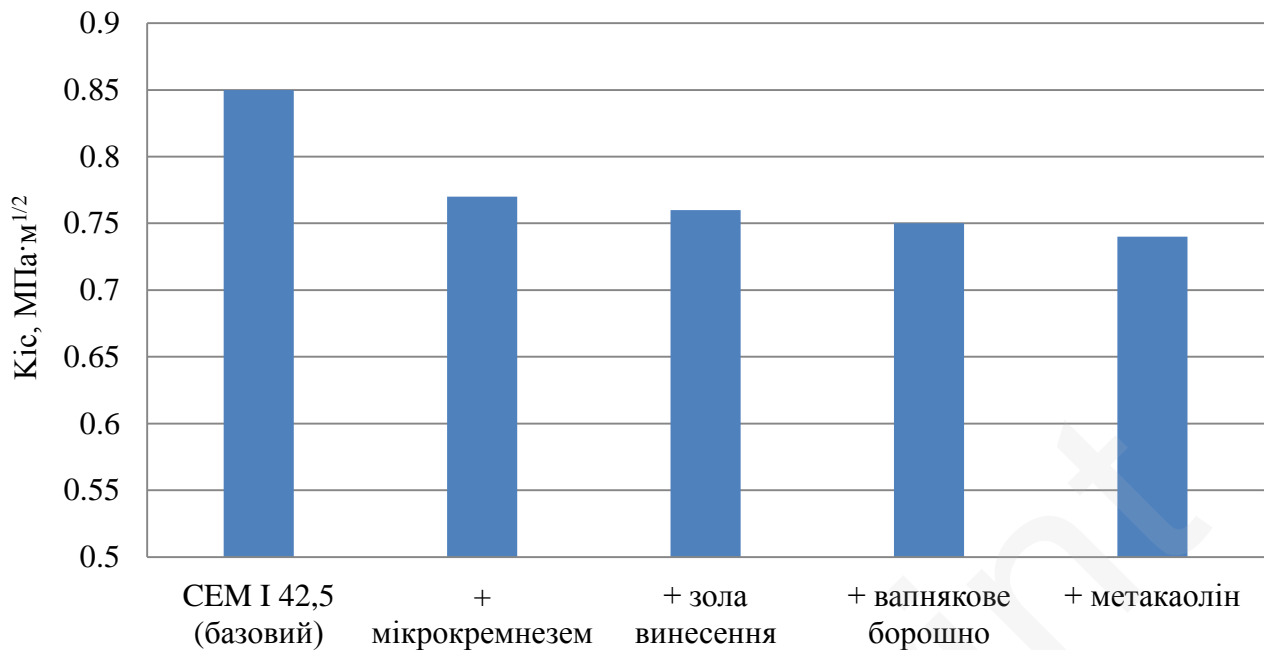


**Рис. 7.** Початкові модулі пружності досліджуваних бетонів при згині



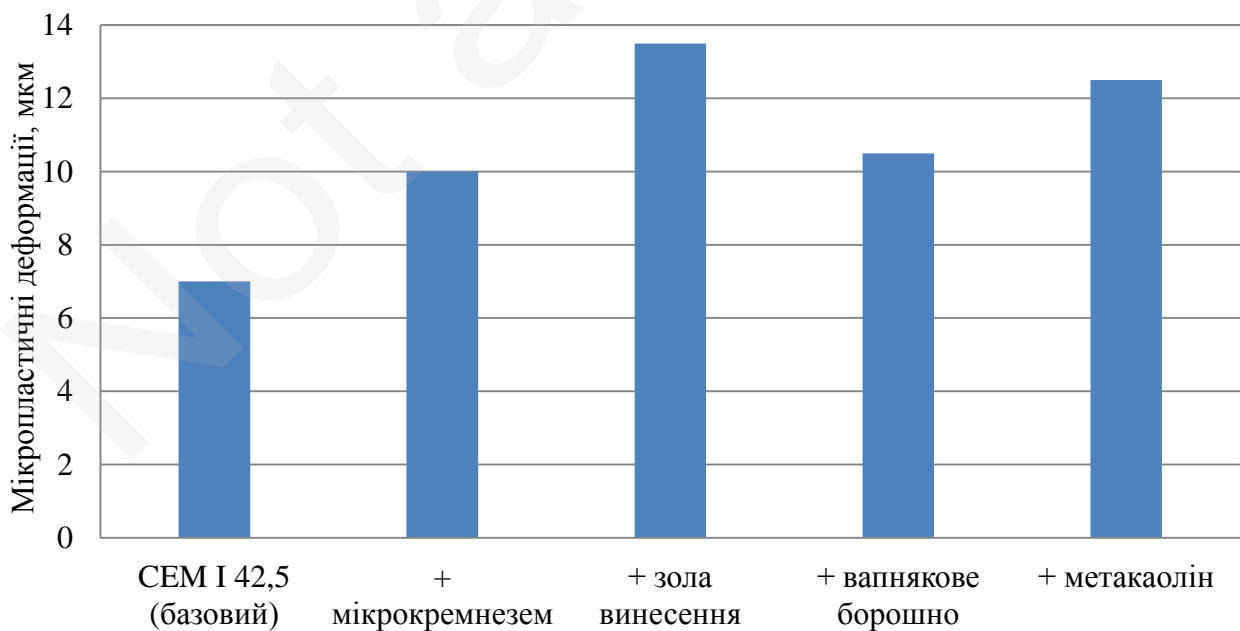
**Рис. 8.** Діаграма деформування при згині бетонної призми з ініційованою тріщиною

Як видно з рис. 9, за критерієм критичного КІН найбільш тріщиностійким можна вважати бетон базового складу, що характеризується  $K_{ic} = 0,85 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$ . Цей показник для бетонів з 10 % мінеральних добавок становить  $K_{ic} = 0,74\text{--}0,76 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$  та збільшується в ряді бетон з метакаоліном, вапняковим борошном, золою винесення та мікрокремнеземом.



**Рис. 9.** Критичні коефіцієнти інтенсивності напружень

Як видно рис. 10, найбільш крихким руйнуванням характеризувалися зразки бетону базового складу (ділянка мікропластичних деформацій ~7 мкм). Найменш крихким руйнуванням – зразки бетону із золою винесення та метакаоліном (ділянки мікропластичних деформацій ~ 13,5 та 12,5 мкм, відповідно). Середніми показниками крихкості руйнування характеризувалися зразки бетону з мікрокремнеземом і вапняковим борошном (ділянки мікропластичних деформацій ~10 і 10,5 мкм, відповідно).



**Рис. 10.** Розмір ділянки мікропластичних деформацій

Кожний з розглянутих вище показників дозволяє окремо судити про

деформативні властивості високоміцних бетонів, однак, для більш точної оцінки тріщиностійкості доцільно розглядати їх комплексно. При цьому, оцінка тріщиностійкості бетонів за комплексом критеріїв може бути ускладнена. Так, бетон базового складу одночасно характеризується найбільшими усадочними деформаціями за 120 діб та найбільшими значеннями критичного КІН. Склад бетону з метакаоліном, хоча і має найнижчі усадочні деформації та модуль пружності, проте характеризується найнижчим значенням критичного КІН. Отже, комплексну оцінку тріщиностійкості бетонів за розглянутими критеріями доцільно здійснювати шляхом моделювання тріщиноутворення, наприклад, методом кінцевих елементів [24].

## 7. SWOT-аналіз результатів досліджень

*Strengths.* Як видно з результатів досліджень, заміщення цементу 10 % мінеральних добавок позитивно позначалося на збереженості рухомості бетонних сумішей, здатних до самоущільнення, що пояснюється зменшенням вмісту цементу. Найкращі показники збереження рухомості були одержані при використанні мікрокремнезему, золи винесення та вапнякового борошна. При цьому, збільшення проектної міцності на стиск, порівняно з базовим складом без добавок спостерігалось лише при використанні 10 % мікрокремнезему. Всі інші мінеральні модифікатори призводили до зниження міцності бетону на стиск на всіх термінах тверднення. У випадку міцності бетону на розтяг при згині та розколюванні введення (на заміну цементу) 10 % мікрокремнезему, метакаоліну та золи винесення здійснювало позитивний ефект, порівняно з базовим складом без добавок. Такий ефект пояснюється збільшенням вмісту в продуктах гідратації цементу з пуцолановими добавками низькоосновних гідросилікатів кальцію [18].

За результатами дослідження усадки високоміцних бетонів можна відзначити позитивний вплив заміни частини цементу мінеральними добавками. Це пояснюється ефектом від зменшення вмісту цементу і, відповідно, зменшення хімічної складової аутогенної усадки бетону. Також має місце ефект від дисперсного мінерального компонента, що посилює адсорбційне зв'язування капілярної вологи і, таким чином, зменшує фізичну складову усадки бетону внаслідок висихання. Істотне зменшення усадочних деформацій при використанні метакаоліну не може бути пояснене лише фізичними факторами, як у випадку інших мінеральних добавок. Такий ефект пов'язують зі збільшенням кількості новоутвореного етtringіту внаслідок реагування активного  $Al_2O_3$  метакаоліну з двохводним гіпсом цементу [18].

*Weaknesses.* Заміна цементу 10 % мінеральних добавок призводить до зниження значення критичного КІН, що компенсується зниженням крихкості руйнування бетону (збільшенням ділянки мікропластичних деформацій). В той же час, вид використаної мінеральної добавки не впливає на значення критичного КІН, але істотно впливає на крихкість руйнування зразків бетону. Такі ефекти можуть бути пояснені кількісними та якісними змінами в цементній матриці, що відбуваються при введенні мінеральних добавок на заміну цементу та потребують додаткових фізико-хімічних досліджень.

Кожний з розглянутих показників дозволяє окремо судити про деформативні властивості високоміцних бетонів, однак, для більш точної оцінки тріщиностійкості доцільно розглядати їх комплексно. Проте, оцінка тріщиностійкості бетонів за комплексом критеріїв може бути ускладнена. Наприклад, бетон базового складу одночасно характеризується найбільшими усадочними деформаціями та найбільшими значеннями критичного КІН. Склад бетону з метакаоліном має найнижчі усадочні деформації та модуль пружності, однак характеризується найнижчим значенням критичного КІН. В даній роботі значення початкового модуля пружності та параметри руйнування бетону визначали у віці 56 діб, в той час, як за літературними даними тріщиноутворення SCC може відбуватися на більш ранніх термінах тверднення. При оцінці тріщиностійкості бетонів доцільно враховувати деформації повзучості, що можуть істотно впливати на релаксацію напружень в бетоні, що твердне.

*Opportunities.* Розвиток наведених досліджень передбачається в моделюванні тріщиноутворення з метою комплексної оцінки тріщиностійкості SCC за критеріями усадки, повзучості, модуля пружності, критичного коефіцієнта інтенсивності напружень на різних термінах тверднення. Пояснення одержаних результатів передбачається одержати за результатами фізико-хімічних досліджень.

*Threats.* Підвищене тріщиноутворення, властиве високоміцним бетонам здатним до самоущільнення, може істотно погіршувати проникність бетону конструкцій щодо агресивних середовищ, зменшуючи їх корозійну стійкість та довговічність. Забезпечення регламентованої тріщиностійкості (довговічності) таких бетонів потребує додаткових заходів на рівні рецептури (використання протиусадочних, розширюючих добавок та фібри) та догляду за бетоном (використання засобів догляду за бетоном). Отже вирішення проблеми тріщиноутворення високоміцних бетонів, здатних до самоущільнення потребує додаткових витрат, що можуть знижувати економічну ефективність їх використання.

## **8. Висновки**

1. Досліджено вплив 10 % мінеральних добавок (на заміну цементу) на реологічні властивості бетонних сумішей, здатних до самоущільнення, за критеріями діаметру розтікання (>620 мм, марка F6) та часу розтікання до діаметру 500 мм (3–5 с). Встановлено, що за цими критеріями всі досліджувані склади бетонів можуть бути використані для виготовлення збірних залізобетонних конструкцій. Проте, за критерієм збереження рухомості протягом 120 хв для виготовлення монолітних конструкцій можна рекомендувати лише склади бетонів з мікрокремнеземом, золою винесення та вапняковим борошном.

2. Досліджено ефективність введення 10 % мікрокремнезему, метакаоліну, золи винесення та вапнякового борошна за критеріями міцності бетонів на стиск та розтяг. Встановлено, що за міцністю на стиск всі досліджувані склади можуть бути віднесені до високоміцних бетонів класів C60/75–C70/85. Найбільшими показниками міцності на стиск характеризувався склад з мікрокремнеземом (93,5 МПа), базовий склад бетону (88,5 МПа) та склад

бетону з метакаоліном (83,1 МПа). Найбільші показниками міцності на розтяг при згині (12,3–12,6 МПа) та розколюванні (5,8–6,4 МПа) мали склади бетону з мікрокремнеземом, метакаоліном та золою винесення.

3. Досліджено вплив мінеральних модифікаторів на тріщиностійкість високоміцних бетонів за критеріями усадки, модуля пружності та критичного коефіцієнта інтенсивності напружень. Встановлено, що порівняно з усадкою базового складу без добавок (0,38 мм/м), склади бетону з 10 % золи винесення, мікрокремнезему та вапнякового борошна на 120 добу характеризуються усадочними деформаціями 0,34–0,36 мм/м. Введення 10 % метакаоліну знижує усадку до 0,29 мм/м. В той же час, на 7 добу тверднення базовий склад SCC характеризується меншою усадкою (0,06 мм/м), ніж склади з мінеральними добавками (0,11–0,14 мм/м). Встановлено, що найнижчим показником модуля пружності при згині (36,6 ГПа) характеризується бетон з метакаоліном, а найвищим (50,4 ГПа) – бетон з мікрокремнеземом. Модулі пружності 41–42 ГПа мають бетони базового складу та складів із золою винесення та вапняковим борошном. За критерієм критичного КІН найбільш тріщиностійким можна вважати бетон базового складу, що характеризується критичним значенням КІН –  $0,85 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ . Цей показник для бетонів з 10 % мінеральних добавок становить  $0,74\text{--}0,76 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ . В той же час, базовий склад бетону характеризувався найбільш крихким руйнуванням (ділянка мікропластичних деформацій  $\sim 7$  мкм). Найменш крихким руйнуванням характеризувалися склади бетону із золою винесення та метакаоліном (ділянки мікропластичних деформацій  $\sim 13,5$  мкм та  $12,5$  мкм, відповідно). Середніми показниками крихкості руйнування характеризувалися склади бетону з вапняковим борошном і мікрокремнеземом (ділянки мікропластичних деформацій  $\sim 10,5$  та  $10$  мкм, відповідно).

### Література

1. Maia, L., Figueiras, H., Nunes, S., Azenha, M., Figueiras, J. (2012). Influence of shrinkage reducing admixtures on distinct SCC mix compositions. *Construction and Building Materials*, 35, 304–312. doi: <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.033>
2. Turcry, P., Loukili, A., Haidar, K., Pijaudier-Cabot, G., Belarbi, A. (2006). Cracking Tendency of Self-Compacting Concrete Subjected to Restrained Shrinkage: Experimental Study and Modeling. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 18 (1), 46–54. doi: [http://doi.org/10.1061/\(asce\)0899-1561\(2006\)18:1\(46\)](http://doi.org/10.1061/(asce)0899-1561(2006)18:1(46))
3. Rozière, E., Granger, S., Turcry, P., Loukili, A. (2007). Influence of paste volume on shrinkage cracking and fracture properties of self-compacting concrete. *Cement and Concrete Composites*, 29 (8), 626–636. doi: <http://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.03.010>
4. Alrifai, A., Aggoun, S., Kadri, A., Kenai, S., Kadri, E. (2013). Paste and mortar studies on the influence of mix design parameters on autogenous shrinkage of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 47, 969–976. doi: <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.024>
5. Leemann, A., Nygaard, P., Lura, P. (2014). Impact of admixtures on the plastic shrinkage cracking of self-compacting concrete. *Cement and Concrete Composites*, 46, 1–7. doi: <http://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.11.002>

6. Klug, Y., Holschemacher, K. (2003). Comparison of the hardened properties of self-compacting and normal vibrated concrete. *Proc. 3rd Int. RILEM Symp. on Self-Compacting Concrete*. Reykjavik, 596–605.
7. Weiss, J., Berke, N. (2002). Shrinkage reducing admixtures in early age cracking in cementitious systems. *Report of RILEM Technical Committee 181-EAS. Early age shrinkage induced stresses and cracking in cementitious systems*. RILEM Publications SARL, 350.
8. Oliveira, M. J., Ribeiro, A. B., Branco, F. G. (2015). Curing effect in the shrinkage of a lower strength self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 93, 1206–1215. doi: <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.04.035>
9. Lomboy, G., Wang, K., Ouyang, C. (2011). Shrinkage and Fracture Properties of Semiflowable Self-Consolidating Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23 (11), 1514–1524. doi: [http://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0000249](http://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000249)
10. Collepardi, M., Borsoi, A., Collepardi, S., Ogoumah Olagot, J. J., Troli, R. (2005). Effects of shrinkage reducing admixture in shrinkage compensating concrete under non-wet curing conditions. *Cement and Concrete Composites*, 27 (6), 704–708. doi: <http://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.09.020>
11. Corinaldesi, V. (2012). Combined effect of expansive, shrinkage reducing and hydrophobic admixtures for durable self compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 36, 758–764. doi: <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.129>
12. Aslani, F., Nejadi, S. (2013). Creep and Shrinkage of Self-Compacting Concrete with and without Fibers. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 11 (10), 251–265. doi: <http://doi.org/10.3151/jact.11.251>
13. Apoorva, C., Nitin, A., Divyansh, T., Abhyuday, T. (2016). Analysis of Self-Compacting Concrete Using Hybrid Fibres. *International Journal of Trend in Research and Development*, 3 (2).
14. Aslani, F., Nejadi, S. (2012). Shrinkage behavior of self-compacting concrete. *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*, 13 (6), 407–419. doi: <http://doi.org/10.1631/jzus.a1100340>
15. Heirman, G., Vandewalle, L., Van Gemert, D.; De Schutter, G., Boel, V. (Eds.) (2007). Influence of Mineral Additions and Chemical Admixtures on Setting and Volumetric Autogenous Shrinkage of SCC Equivalent- Mortars. *Proceedings of 5th international RILEM symposium on selfcompacting concrete*. RILEM Publications S.A.R.L. Ghent, 553–558.
16. Lothenbach, B., Le Saout, G., Gallucci, E., Scrivener, K. (2008). Influence of limestone on the hydration of Portland cements. *Cement and Concrete Research*, 38 (6), 848–860. doi: <http://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.01.002>
17. Valcuende, M., Marco, E., Parra, C., Serna, P. (2012). Influence of limestone filler and viscosity-modifying admixture on the shrinkage of self-compacting concrete. *Cement and Concrete Research*, 42 (4), 583–592. doi: <http://doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.01.001>
18. Дворкін, Л. Й., Лушнікова, Н. В., Рунова, Р. Ф., Троян, В. В. (2007). *Метакаолін в будівельних розчинах і бетонах*. Київ: КНУБА, 216.
19. Troyan, V., Sova, N. (2019). Improving the resistance of concrete for sleepers to the formation of delayed and secondary ettringite, the alkali-silica reaction, and electric corrosion. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (6 (102)), 13–19. doi: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.185613>

20. Shah, S. P., Ouyang, C., Marikunte, S., Yang, W., Becq-Giraudon, E. (1998). A method to predict shrinkage cracking of concrete. *ACI Materials Journal*, 95 (4), 339–346. doi: <http://doi.org/10.14359/9875>

21. Hammer, T. A. (2003). Cracking susceptibility due to volume changes of self-compacting concrete. *Proc. 3rd Int. RILEM Symp. on Self-Compacting Concrete*. Reykjavik, 553–557.

22. Turcry, P., Loukili, A., Haidar, K., Pijaudier-Cabot, G., Belarbi, A. (2006). Cracking Tendency of Self-Compacting Concrete Subjected to Restrained Shrinkage: Experimental Study and Modeling. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 18 (1), 46–54. doi: [http://doi.org/10.1061/\(asce\)0899-1561\(2006\)18:1\(46\)](http://doi.org/10.1061/(asce)0899-1561(2006)18:1(46))

23. Carlson, R. W., Reading, T. J. (1988). Model study of shrinkage cracking in concrete building walls. *ACI Structural Journal*, 85 (4), 395–404. doi: <http://doi.org/10.14359/2666>

24. Троян, В. В. (2019). *Забезпечення тріщиностійкості бетону масивних споруд*. Київ: ТОВ НВП «Інтерсервіс», 92.