

## ГАЗОБЕТОН З ДОБАВКОЮ МЕТАКАОЛІНУ

© Мельник А.Я., Позняк О.Р., Солтисік Р.А., 2012

Наведено результати дослідження впливу технологічних чинників, таких як витрата портландцементу та розплив циліндра Суттарда на властивості газобетону. Проаналізовано вплив добавки метаксаоліну та армувальних волокон на реологічні властивості газобетонної суміші. Досліджено фазовий склад продуктів гідратації міжпорових перегородок.

**Ключові слова:** газобетон, мінеральна добавка, структуроутворення, кратність спучування, міцність.

**The results of the influence of such technological factors as amount of Portland cement and the flowability (Suttard) on the properties of aerated concrete are shown. The influence of metakaolin additive and reinforcing fibers on the rheological properties of aerated concrete mixture were analysed. The phase composition of hydration products in pore partitions was investigated.**

**Key words:** aerated concrete, mineral supplement, structure, frequency of flatulence, strength.

**Вступ.** Газобетон є екологічно чистим, ефективним будівельним матеріалом з достатньою сировинною базою для його виготовлення. У найпростішому випадку він складається з цементу, наповнювача, води і газоутворювача, має властивості, з одного боку, каменю, з іншого, – дерева. Унікальне поєднання цих властивостей робить газобетон чудовим будівельним матеріалом. За рахунок підвищення пористості матеріалу відбувається зменшення густини бетону і підвищення його теплоізоляційних властивостей. Із цим тісно пов'язані будівельні та експлуатаційні властивості виробів і огорожувальних конструкцій – маса стін, навантаження на фундамент, паропроникність, сорбційна вологість матеріалу, теплозахисні властивості матеріалу, питомі витрати теплової енергії на опалення будівель.

**Постановка проблеми.** Актуальність зростання виробництва ніздрюватих бетонів зумовлена необхідністю збільшення обсягів будівництва житла. Останнім часом у галузі будівництва прийнято багато нових нормативних документів, спрямованих на зниження енергетичних і сировинних ресурсів, а також підвищення якості й надійності будівництва. Одним зі шляхів збільшення виробництва ніздрюватих бетонів в Україні є широке застосування газобетону неавтоклавного тверднення, оскільки на освоєння його виробництва потрібно значно менше капітальних вкладень, ніж на освоєння виробництва автоклавного ніздрюватого бетону.

Проте неавтоклавний спосіб виробництва має істотний недолік, який полягає у тому, що усадження такого ніздрюватого бетону у процесі експлуатації значно більша (2–3 мм/м), ніж в автоклавного бетону (0,3 мм/м), за однакової густини виробів. Специфіка технології виготовлення неавтоклавного газобетону вимагає і підвищеної витрати цементу.

Науково-практичні роботи в галузі ніздрюватих бетонів неавтоклавного тверднення ведуться у напрямку підвищення якості продукції за зниження собівартості виробів. Тому покращення фізико-механічних характеристик ніздрюватих бетонів за рахунок модифікування їх структури зміною властивостей міжпорових перегородок, зокрема введенням до їх складу активних мінеральних добавок, є актуальною проблемою.

**Аналіз останніх джерел і публікацій.** Як відомо з [1], стіни, виконані із застосуванням ніздрюватого бетону, забезпечують комфортні умови завдяки особливостям пористої структури

бетону. Сукупність фізичних та теплофізичних властивостей (висока пористість бетону, теплопровідність, теплосвоєння, достатня повітропроникність і паропроникність) забезпечує мінімальну величину коливань температури в середині приміщення за зміни температури зовнішнього повітря. Ніздрюватий бетон за рахунок власної високої повітро- і паропроникності, яку можна регулювати товщиною і властивостями оздоблювальних внутрішніх покриттів, забезпечує часткову інфільтрацію антропогенних (шкідливих речовин життєдіяльності людини) і дає змогу підтримувати високі комфортні умови у приміщенні. Ці властивості газобетону зумовлюють зменшення кратності повітрообміну і відповідно зниження витрат на підтримання нормальної температури у приміщенні. Теплоакуючі властивості газобетону забезпечують потрібний рівень комфортності проживання та зниження витрат на опалення будівель, а також гарантують вирівнювання температурних коливань не тільки влітку та взимку, але й за змінних коливань температури дня та ночі.

Ніздрюватий бетон виготовляється на основі порландцементу з його витратою 400–500 кг/м<sup>3</sup>. Можливою економією цементу під час виробництва ніздрюватих бетонів є введення золи-винесення замість частини цементу, або використання вапняно-зольних чи золотужних в'язучих, а також шлакових в'язучих композицій, для одержання яких використовуються побічні продукти металургійної та хімічної промисловості. Існують теоретичні і експериментальні дослідження з використання золи ТЕС у технології виробництва ніздрюватих бетонів, проведені на основі загальних положень, розроблених П.І. Боженюком, А.Т. Барановим та ін. Проте збільшення вмісту золи-винесення у складі ніздрюватого бетону призводить до зменшення механічної міцності, що вимагає додаткових методів її підвищення [2].

З [3] відомо, що особливістю отримання газобетону є утворення значної кількості гідроалюмінатів кальцію, що негативно впливають на міцність виробів. Тому для їх зв'язування під час виробництва газобетону неавтоклавно тверднення вводять тонкодисперсні добавки, що дає можливість сформувати міцну міжпорову перегородку. Активні пуцоланові мінеральні добавки цілеспрямовано використовуються уже багато десятиріч з метою модифікування складів на основі порландцементу для підвищення міцності, довговічності, хімічної стійкості отриманих матеріалів і конструкцій.

В останні роки як високоефективна пуцоланова добавка популярності набуває високоактивний метаколін (ВМК). Введення ВМК до складу ніздрюватобетонних сумішей дає змогу підвищити міцність ніздрюватих бетонів за заданої густини або знизити густину за заданої міцності. Це зумовлено двома факторами: зростанням міцності міжпорових перегородок за рахунок підвищення міцності цементного каменю; покращенням порової структури газобетону [4].

Основний вплив на міцність газобетону має міцність міжпорових перегородок. Розглядаючи міжпорові перегородки ніздрюватого бетону з позицій бетонознавства, доводиться враховувати негативний вплив на їхню міцність надлишкової кількості води замішування. Тому одним з головних шляхів збільшення міцності міжпорових перегородок є зниження водотвердого (водоцементного) відношення, що веде до зменшення капілярної пористості матеріалу та підвищення його міцності. У практиці виробництва різних видів бетону обґрунтоване застосування пластифікаторів, що уможливило підвищити рухливість бетону без збільшення кількості вільної води [5].

**Методи досліджень і матеріали.** У роботі під час проведення експериментальних досліджень використовували порландцемент ПЦ І-500 ВАТ “Івано-Франківськцемент” з такими показниками: питома поверхня  $S_{\text{пит}}=350$  м<sup>2</sup>/кг, залишок на ситі №008 – 1,1 мас. %, початок тужавіння – 3 год 20 хв, кінець тужавіння – 6 год 10 хв.

Як дрібнодисперсний наповнювач використовували золу-винесення Бурштинської ТЕС з такими властивостями: істинна густина – 2,21 г/см<sup>3</sup>, насипна густина – 870 кг/м<sup>3</sup>, залишок на ситі №008 – 8,7 мас. %, хімічний склад, мас. %: SiO<sub>2</sub> – 54; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 23,75; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + FeO – 13,8; MgO – 1,91; CaO – 4,98; SO<sub>3</sub> – 0,53; K<sub>2</sub>O + Na<sub>2</sub>O – 0,25.

Як мінеральну добавку використовували високоактивний метаколін. Це штучний екологічно чистий матеріал, який виготовляється з коалінітів. За хімічною природою – це суміш аморфного кремнезему і глинозему фактично в рівних кількостях, середній розмір частинок – 1–5 мкм, насипна

густина,  $\text{кг/м}^3$  – 304,0 (до ущільнення), 447,0 (після ущільнення), залишок на ситі 0063–1,32 мас. %, питома поверхня –  $15 \text{ м}^2/\text{г}$ , втрати при прожарюванні – 1,2 мас. %, хімічний склад, мас. %:  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 43,8;  $\text{SiO}_2$  – 53,42;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – 0,75;  $\text{TiO}_2$  – 0,58;  $\text{CaO}$  – 0,45;

Фізико-механічні властивості газобетону визначали згідно зі стандартними методами випробувань.

**Результати досліджень.** Найважливішою технологічною особливістю отримання високоякісних газобетонних виробів максимальної пористості і достатньої міцності є створення оптимальних умов для двох процесів, що одночасно перебігають: газовиділення і газотримання. Необхідно забезпечити відповідність між швидкістю реакції газовиділення і швидкістю наростання структурної в'язкості газобетонного масиву. При цьому виділення газу має якнайшвидше закінчитися до початку тужавіння системи цемент - вода. Перебіг процесу газотворення визначається великою кількістю різних чинників. Найбільший вплив на швидкість цього процесу мають вид, кількість і властивості газотворювача, лужність і температура середовища, рухливість газобетонної суміші. За допомогою методу експериментально-статистичного моделювання досліджено вплив технологічних чинників, зокрема витрати портландцементу та рухливості газобетонної суміші на властивості газобетону. З цією метою на основі портландцементу ПЦ І-500 ВАТ “Івано-Франківськцемент” з різною витратою (250; 300; 350  $\text{кг}$ ) та за різної рухливості газобетонної суміші ( $\text{PK} = 15; 19; 23 \text{ мм}$ ) одержували газобетон.

Дослідженнями впливу витрати портландцементу та розпливу конуса циліндра Суттарда (рис. 1) встановлено, що для отримання газобетону з середньою густиною  $550 \text{ кг/м}^3$  та марочною міцністю 1,13 МПа витрата портландцементу повинна становити  $350 \text{ кг/м}^3$ , розплив конуса циліндра Суттарда для газобетонної суміші становить 190 мм.

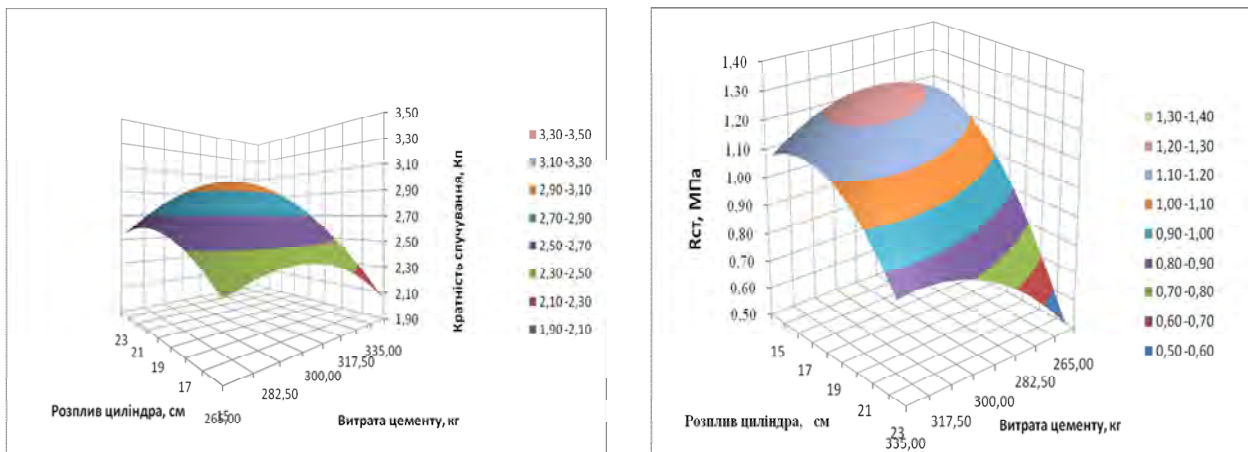


Рис. 1. Поверхні відгуку та ізолінії кратності спучування (а) і міцності (б) газобетону залежно від витрати цементу та розпливу циліндра Суттарда

Для підвищення міцності, довговічності, хімічної стійкості газобетону неавтоклавного тверднення до його складу вводять активні мінеральні добавки, зокрема метакаолін. Використання метакаоліну дає змогу частково знизити витрату цементу, істотно зменшити витрату суперпластифікаторів, необхідних для компенсації ефекту загустіння, що виникає під час введення тонкодисперсних добавок. Алюмосилікатна складова метакаоліну здатна активно взаємодіяти з гіпсом, що міститься в портландцементі. Контрольоване утворення еtringіту на ранніх стадіях тверднення газобетону дає змогу істотно знизити усадкові деформації [6]. Проте введення метакаоліну до складу цементної композиції в кількості 10 мас. % призводить до зниження механічної міцності цементного каменю на третю добу тверднення на 10,7 %, а на 28 добу – на 7,2 %. Тому під час їх введення необхідно підвищувати активність портландцементу. Основні властивості цементу, в тому числі його активність і

швидкість тверднення, визначаються не тільки хімічним і мінералогічним складом клінкеру, наявністю тих чи інших добавок, але і тониною розмелення продукту, його гранулометричним складом, а також формою частинок порошку. Підвищити ефективність портландцементу можна, збільшивши тониною його розмелення, що досягається механоактивацією в'язучого. Так, міцність цементного каменю на основі механоактивованого портландцементу на сьому добу тверднення зростає з 29,7 до 33,8 МПа, на 28 добу – з 54,2 до 58,5 МПа.

У технології виробництва неавтоклавної газобетону для одержання виробів із заданими міцністю та середньою густиною важливою характеристикою є кратність спучування, яка в подальшому визначає характеристики газобетону.

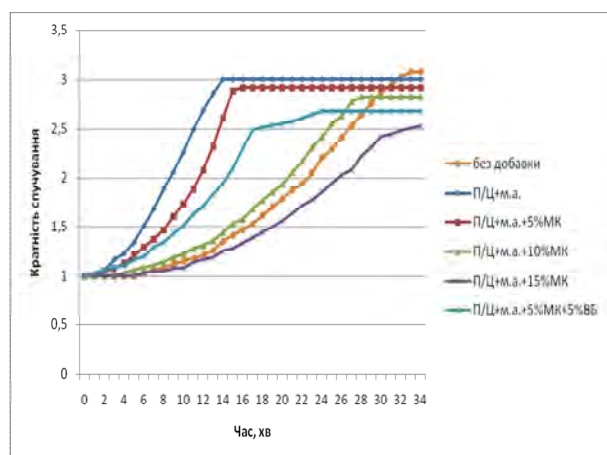


Рис. 2. Кінетика спучування газобетонної маси

В таблиці показано, що введення 5 мас. % метаксаоліну до складу газобетону зумовлює незначне зростання міцності за збереження середньої густини газобетону. Так, на сьому добу тверднення міцність газобетону зростає на 3,7 %, на 28 добу – на 4,6 %. За подальшого збільшення вмісту метаксаоліну спостерігається збільшення густини газобетону.

Дослідженнями кінетики спучування газобетонних сумішей, що містять в своєму складі мінеральні добавки, встановлено (рис. 2), що час наростання газобетонного масиву з використанням звичайного портландцементу становить 32 хв. При введенні 5 мас. % метаксаоліну та механоактивації в'язучого спостерігається зниження часу наростання газобетонного масиву до 14 – 16 хв. Подальше збільшення вмісту метаксаоліну зумовлює зниження величини кратності спучування. На основі експериментальних даних встановлено, що введення метаксаоліну призводить до незначного збільшення водотвердого відношення за забезпечення постійного розпливу конуса циліндра Сутгарда, (РК = 190 мм).

### Вплив мінеральних добавок на властивості газобетону (розплив циліндра Сутгарда 190 мм)

№ з/п	Склад механоактивованого в'язучого, %			Зола, кг	В/Т	Середня густина, кг/м <sup>3</sup>	Міцність за стиску, МПа, через, діб	
	Ц	МК	ВБ				7	28
1	100	-	-	250	0,44	500	0,51	1,02
2	95	5	-	250	0,46	550	0,53	1,07
3	90	10	-	250	0,48	610	0,59	0,97
4	85	15	-	250	0,49	670	0,56	1,40
5	90	5	5	250	0,43	650	0,68	1,48

З [7] відомо, що вапняк може виконувати активну структуроутворювальну роль у процесах гідратації портландцементу, а також є підкладкою для кристалізації гідратних утворень, прискорює гідратацію і забезпечує добре зчеплення між складовими каменю. Тобто вапняк у полімінеральних модельних системах, які за складом відповідають цементам з мінеральними добавками, відіграє роль активатора тверднення, який сприяє повнішому прояву активності іншими компонентами системи. Гексагональні гідроалюмінати кальцію у присутності CaCO<sub>3</sub> заміщаються на стабільніші гідрокарбоалюмінати C<sub>4</sub>A·CO<sub>2</sub>·12H<sub>2</sub>O, структуроутворювальна роль яких з часом зростає.

Проведеними дослідженнями впливу вапнякового борошна на властивості газобетону встановлено, що введення до складу газобетонної суміші 5 мас. % вапнякового борошна зумовлює зростання кратності спучування газобетонного масиву до 2,68 порівняно зі складом, що містить

15 мас. % метаксаоліну, для якого вона становить 2,5 та зростання механічної міцності газобетону. Так, на сьому добу тверднення газобетон на основі модифікованої цементної композиції, характеризується міцністю в 1,33 раза вищою, ніж газобетон на основі звичайного портландцементу. Відповідно на 28 добу міцність газобетону становить 1,48 МПа для газобетону на основі модифікованої цементної композиції і 1,02 МПа – на основі звичайного портландцементу.

Методом рентгенофазового аналізу досліджено фазовий склад продуктів гідратації міжпорових перегородок газобетону, одержаного на основі цементної композиції, що містить 5 мас. % вапнякового борошна та 5 мас. % метаксаоліну.

Згідно з даними рентгенофазового аналізу, під час тверднення газобетону на основі звичайного портландцементу протягом 28 діб тверднення на дифрактограмах (рис. 3) фіксуються лінії основних кристалічних гідратних фаз: гідроксиду кальцію ( $d/n=0,490$ ;  $0,262$  нм) та еtringіту ( $d/n=0,960$ ;  $0,387$  нм). На дифрактограмі також присутні лінії карбонату кальцію ( $d/n=0,302$ ;  $0,192$  нм) та  $\beta$ -SiO<sub>2</sub> ( $d/n=0,425$ ;  $0,334$ ; нм). При введенні до складу газобетону 5 мас. % метаксаоліну та 5 мас. % вапнякового борошна вже на другу добу тверднення фіксуються інтенсивні лінії, що відповідають лініям гідрокальміту Ca<sub>4</sub>Al<sub>2</sub>(OH)<sub>14</sub>·6H<sub>2</sub>O ( $d/n=0,820$ ;  $0,288$ ;  $0,244$  нм). Це мінерал, що має склад подібний до C<sub>4</sub>AH<sub>11</sub>, але належить до групи водних гідроксидів, може містити у кристалічній ґратці значну кількість аніонів CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>: гексагональна сингонія,  $a=5,7$ ,  $c=8,2$  Å;  $Z=1$ .

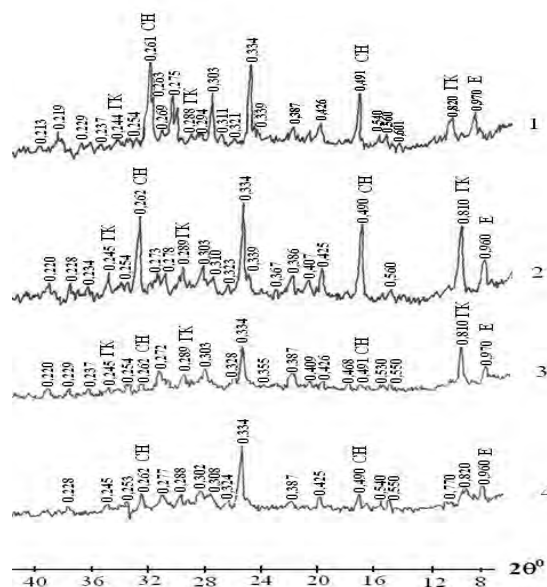


Рис. 3. Дифрактограми газобетону на основі модифікованої цементної композиції, гідратованої: 1–2 доби; 2–7 діб; 3–28 ді; 4 – газобетон на основі портландцементу через 28 діб тверднення

Гексагональні пластинки зі спайністю по (0001);  $n_0 = 1,536$ ;  $n_e = 1,520$ . У подальші терміни тверднення інтенсивність цих ліній зростає, а інтенсивність лінії Ca(OH)<sub>2</sub> ( $d/n=0,490$  нм) дуже слабка, що підтверджує високий ступінь зв'язування портландиту в гідрокальміт, який забезпечує підвищені міцнісні характеристики газобетону.

Незалежно від прийнятої технології, зокрема від умов і режимів тверднення, традиційними недоліками ніздрюватих бетонів залишаються низька опірність розтягуючим напруженням і підвищена крихкість. Неавтоклавні ніздрюваті бетони характеризуються високими деформаціями усадження, що призводить до інтенсивного тріщиноутворення і навіть руйнування виробів. Армування волокнами дуже зменшує або повністю виключає появу і розвиток усадкових тріщин у процесі тверднення і подальшої експлуатації матеріалу.

Дослідженнями впливу поліпропіленової фібри на властивості газобетону встановлено, що її введення істотно не впливає на кратність спучування та густину газобетону (рис. 4). Так, густина газобетону без поліпропіленової фібри становить 700 кг/м<sup>3</sup> при введенні до складу газобетону армуючих волокон в кількості 0,04 мас. %, густина становить 715 кг/м<sup>3</sup>, за вмісту 0,12 мас. % – 730 кг/м<sup>3</sup> відповідно. Введення поліпропіленової фібри дає незначний приріст міцності, яка становить 2,0 МПа для газобетону з вмістом фібри 0,04 мас. % та 2,03 МПа – для газобетону з вмістом фібри 0,12 мас. %, у той час, як міцність газобетону без добавок фібри, – 1,87 МПа.

За допомогою оптичного мікроскопа досліджено поверхню газобетону, що містить в своєму складі поліпропіленову фібру (рис. 5).

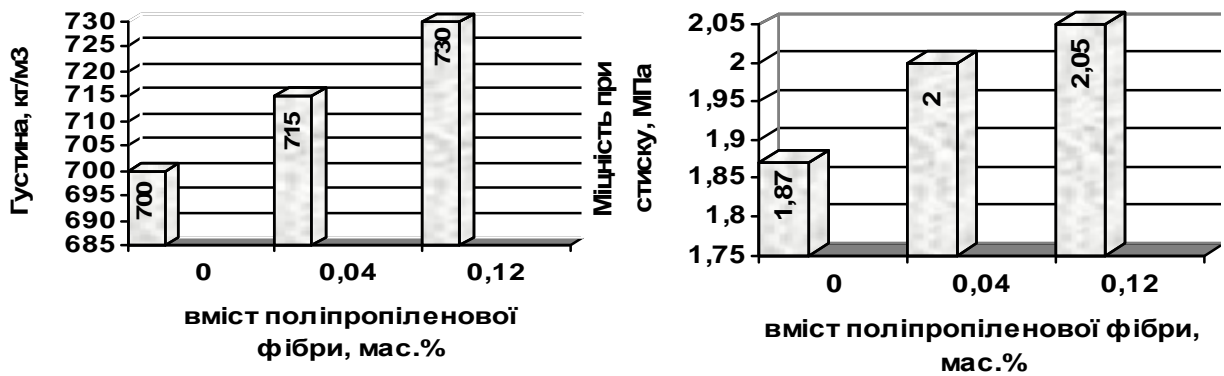


Рис. 4. Вплив поліпропіленої фібри на густина та міцність газобетону

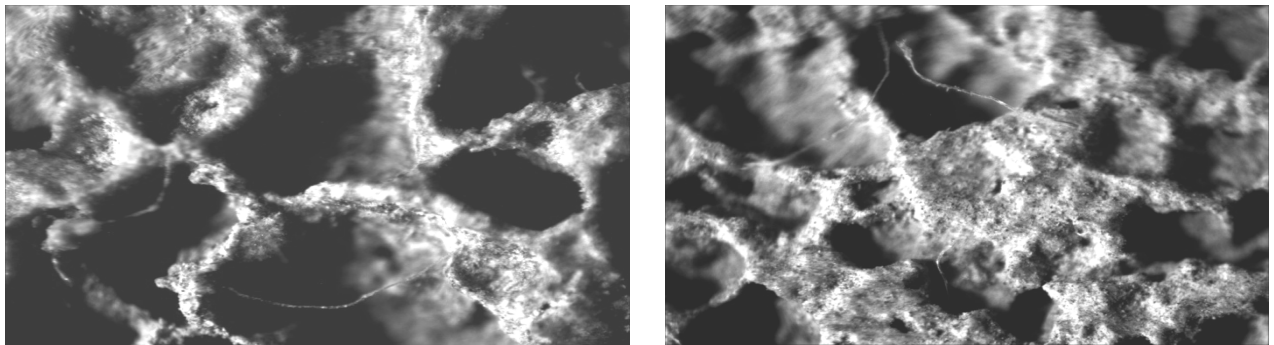


Рис. 5. Мікрофотографії поверхні газобетону

**Висновок.** Проведеними дослідженнями встановлено, що під час використання цементної композиції, що містить 5 мас. % метакаоліну і 5 мас. % вапнякового борошна, та проведення механоактивації, не спостерігається істотного впливу на кінетику спучування газобетонного масиву, при цьому забезпечується зростання марочної міцності газобетону на 31,1 % за його густини  $650 \text{ кг/м}^3$ . Встановлено, що під час використання модифікованих цементних композицій на рентгенограмах фіксуються лінії гідрокаломіту, що забезпечує підвищення міцнісних характеристик газобетону.

1. Сай В.І. Розвиток виробництва ніздрюватобетонних виробів – складова енергетичної незалежності держави / В.І. Сай // Будівельні матеріали та вироб. – 2006. – №2. – С.316–319.
2. Опекунов В.В. Эффективное применение пористых бетонов / В.В. Опекунов // Строит. матер. – 2009. – №12. – С.13–16.
3. Митина Н.А. Получение прочного неавтоклавного газобетона путем регулирования состава и свойств исходных смесей: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Н.А. Митина. – Томск, 2003. – 20 с.
4. Caladron M.A., Gruber K.A. and Burg R.G. High Reactivity metakaoline: A New Generation of Mineral Admixture. *Concrete International*. Now. – Vol. 16., № 11. – Pp. 32–40.
5. Сердюк В.Р. Мінеральні та хімічні добавки в технології газобетонів / В.Р. Сердюк., О.О. Міщенко // Сб. “Строительные материалы, изделия и санитарная техника”. – 2011. – №39. – С.141–146.
6. Неавтоклавный золо-цементный газобетон с химическими добавками. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: URL: <http://www.allbeton.ru/article/24/15.html/>. – назва з екрана.
7. Саницький М.А. Модифіковані композиційні цементні / М.А. Саницький, Х.С. Соболев, Т.Є. Марків. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2010. – 132 с.