

УДК 666.972

**ЭФЕКТИВНІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТАКАОЛІНУ
У ВАЖКИХ БЕТОНАХ РІЗНОГО СКЛАДУ**

**ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТАКАОЛИНА В ТЯЖЕЛЫХ
БЕТОНАХ РАЗЛИЧНОГО СОСТАВА**

**EFFICIENCY OF METAKAOLIN APPLICATION
IN DIFFERENT REGULAR CONCRETE COMPOSITION**

Житковський В.В., к.т.н., доц., Разумовський А.Р., здобувач
(Національний університет водного господарства та природокористування, м.
Рівне)

Житковский В.В., к.т.н., доц., Разумовский А.Р., соискатель
(Национальный университет водного хозяйства и природопользования, г.
Ровно)

Zhytkovsky V.V., PhD., Razumovsky A.R., applicant (National University of
Water Management, Rivne)

**Розглянуто технологічні принципи ефективного застосування
метакаоліну як мінеральної добавки для важкого бетону. Наведено
результати спільного впливу метакаоліну і суперпластифікатора на
властивості бетонних сумішей і міцність бетону.**

**Рассмотрены технологические принципы эффективного применения
метакаолина как минеральной добавки для тяжелого бетона. Приведены
результаты совместного влияния метакаолина и суперпластификатора
на свойства бетонных смесей и прочность бетона.**

**Describes the technique principles of efficient use of metakaolinas a mineral
additive for concrete. The results of the joint effect of metakaolin and
superplasticizer on the properties of concrete mixes and concrete strength are
presented.**

Ключові слова:

Високоміцний бетон, добавки, метакаолін, суперпластифікатор.

Высокопрочный бетон, добавки, метакаолин, суперпластификатор.

High-performance concrete additives, metakaolin, superplasticizer.

Важливою особливістю процесу взаємодії продуктів гідратації цементу з мінеральними добавками є активна їх участь наповнювача в хімічних реакціях. Хімічно активні наповнювачі зміщують спрямованість реакції у бік інтенсивного виділення продуктів гідратації, пов'язуючи останні в нерозчинні сполуки. Так, кремнеземисті та алюмосилікатні наповнювачі, вступаючи у взаємодію з гідроксидом кальцію $\text{Ca}(\text{OH})_2$, утворюють низькоосновні гідросилікати та гідроалюмосилікати. Карбонати кальцію і магнію взаємодіють з аліомінатними клінкерними мінералами. Виявлена також можливість обмінних реакцій між карбонатними наповнювачами та гідросилікатами кальцію [1]. Одним з мінеральних наповнювачів, що володіють високою реакційною здатністю є метакаолін – продукт дегідратації збагачених природних каолінів. Відомо, що метакаолін застосовують переважно як добавку для отримання високоміцних бетонів, яка покращує структуру цементного каменю і дозволяє отримати підвищену міцність водонепроникність та морозостійкість. За ефективністю щодо впливу на бетон метакаолін подібний до мікрокремнезему, який широко використовується у високотехнологічних бетонах, однак більш зручний для дозування.

Не зважаючи на те, що ефективність метакаоліну як мінеральної добавки з високою хімічною активністю є досить вивченою, використання його при виробництві бетону залишається обмеженим. Причиною такої ситуації є недостатня інформованість виробників бетону про основні переваги, котрі дає використання такої, відносно нової добавки як метакаолін. Поряд з цим, метакаолін, внаслідок його структурних особливостей, при введенні у бетонну суміш викликає суттєве підвищення водопотреби [2], тому вимагає обов'язкового комплексного використання з добавками-суперпластифікаторами.

Метою досліджень, було дослідити основні ефекти, які дає використання метакаоліну як добавки до бетону:

- встановити вплив метакаоліну на водопотребу бетонної суміші та можливість її коректування за рахунок суперпластифікаторів, а також встановити оптимальний вміст суперпластифікатора;
- дослідити питання однорідності і розшарування бетонних сумішей з метакаоліном;
- вивчити вплив метакаоліну на міцність бетону та кінетику її набору, встановити оптимальний вміст метакаоліну;
- дослідити вплив типу цементу на ефективність метакаоліну в бетоні.
- отримати базові склади бетону з метакаоліном та встановити можливість зниження витрати цементу.

Метакаолін, що виробляється підприємством ТОВ «Західна каолінова компанія» являє собою дисперсний продукт, отриманий термообробкою збагаченого природного каоліну Дерманківського родовища Рівненської області (Україна). У лабораторії кафедри були визначені основні

характеристики метакаоліну (хімічний склад, будівельно-технологічні властивості), що стало основою для розробки технічних умов ТУ У В.2.7-08.1-31108661-001:2014 «Добавка мінеральна до бетонів та розчинів - метакаолін високоактивний. Технічні умови».

Було проведено дослідження впливу добавки-метакаоліну, виготовленого згідно ТУ У В.2.7-08.1-31108661-001:2014 підприємством ТОВ «Західна каолінова компанія» на властивості бетонних сумішей та бетону.

Для компенсації можливого впливу метакаоліну на водопотребубетонної суміші використовували суперпластифікатор нафталін-формальдегідного типу СП-1 (аналог С-3) (виробництво «Поліпласт»). Виготовлялись бетонні суміші із розрахунку отримання в контрольних точках (без метакаоліну) бетону різних класів (від В15 до В40). Склади наведені у табл.3. Початкова рухомість бетонної суміші задавалась у межах марки Р1 і доводилась за рахунок суперпластифікатора (вміст 1%) до марки Р4 з відповідним коректуванням витрати води. Відомо, що метакаолін як добавка найбільш ефективний при введенні до складу бетонної суміші у кількості від 5 до 15%. Однак висока вартість даної мінеральної добавки, що пов'язана з необхідністю високотемпературної обробки її виготовленні, суттєво обмежує можливість її ефективного використання. З огляду на це максимальний вміст метакаоліну в досліджах обмежувався кількістю 5% від маси цементу.

Таблиця 3

Контрольні склади бетону

№	Клас бетону	Марка цементу	ОК*, см	Витрати компонентів, кг/м ³			
				Цемент	Вода	Пісок	Щебінь
1	В15	ПЦ І-500	1...4	230	180	800	1310
2	В25		1...4	315	180	740	1293
3	В30		1...4	405	180	672	1272
4	В40		1...4	495	203	590	1248

* - початкова рухомість бетонної суміші без добавок

Введення метакаоліну у бетонну суміш зазвичай суттєво підвищує її водопотребу[2]. Одночасне введення суперпластифікатора переважно нівелює негативний вплив метакаоліну. Такий ефект помітний здебільшого в області постійної водопотреби бетонних сумішей, тобто при витратах цементу не більше 430...450 кг/м³ (рис. 1). При добавленні метакаоліну у

суміш, що містить більше 450 кг/м^3 , розріджуючого ефекту суперпластифікатора СП-1 недостатньо, щоб перебороти підвищення водопотреби, що, в свою чергу, впливає на міцність і на ефективність метаксаоліну. Підвищення кількості суперпластифікатора до 1,5% достатньо, щоб компенсувати підвищення В/Ц при високих витратах цементу.

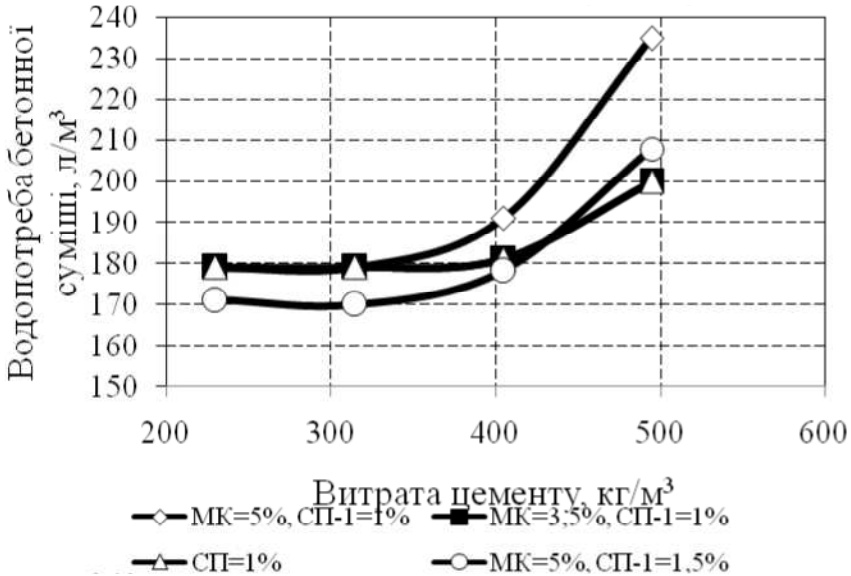


Рис. 1. Вплив метаксаоліну (МК) та суперпластифікатора (СП-1) на водопотребу бетонної суміші.

Примітка: Рухомість бетонної суміші – 17...21 см.

При введенні метаксаоліну у бетонну суміш відзначається підвищення її однорідності та зв'язності, особливо помітний ефект при витраті цементу $200...300 \text{ кг/м}^3$ (рис. 2). В даному випадку водовідділення бетонних сумішей знижується у 2...2,2 рази, розчинівідділення – у 2,0...2,4. З подальшим підвищенням витрати цементу водовідділення і розчинівідділення знижуються в усіх досліджуваних складах бетону, тому ефективність метаксаоліну нижча.

Підвищення однорідності високорухомих бетонних сумішей з метаксаоліном при низьких витратах цементу дозволяє знизити необхідний поріг мінімальної витрати цементу в бетоні особливо важливий при їх транспортуванні бетононасосами. Як відомо [4], мінімальна кількість цементу при використанні бетононасоса не може бути нижча за 300 кг/м^3 . Ця вимога попереджує можливе розшарування бетонної суміші, однак є причиною суттєвих перевитрат для бетонів невисоких класів. Використання

активної мінеральної добавки, такої як метакеолін, знижує розшарування і тому дозволяє транспортувати насосом суміші з витратою 200 кг цементу на 1 м^3 і нижче.

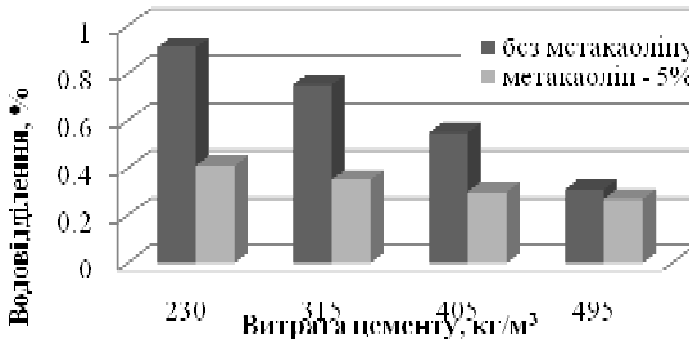


Рис. 2. Вплив метакеоліну на водовідділення бетонних сумішей.

Примітка: Вміст суперпластифікатора СП-1 – 1%.

Підвищення однорідності високорухомих бетонних сумішей з метакеоліном при низьких витратах цементу дозволяє знизити необхідний поріг мінімальної витрати цементу в бетоні особливо важливий при їх транспортуванні бетононасосами. Як відомо [4], мінімальна кількість цементу при використанні бетононасоса не може бути нижча за $300 \text{ кг}/\text{м}^3$. Ця вимога попереджує можливе розшарування бетонної суміші, однак є причиною суттєвих перевитрат для бетонів невисоких класів. Використання активної мінеральної добавки, такої як метакеолін, знижує розшарування і тому дозволяє транспортувати насосом суміші з витратою 200 кг цементу на 1 м^3 і нижче.

Одна з основних переваг метакеоліну як активної мінеральної добавки – це підвищення міцності бетону. Як показують отримані результати, поряд з покращенням властивостей бетонної суміші метакеолін дозволяє підвищити міцність бетону при стиску на 19...32%. Ефект підвищення міцності залежить від кількості метакеоліну, витрати цементу і його типу, а також вмісту суперпластифікатора

У складах бетону з витратою цементу $200...250 \text{ кг}/\text{м}^3$ підвищення міцності за рахунок введення метакеоліну незначне і складає 19...22% при кількості добавки 5%. Досягнуті значення міцності становлять 25...27 МПа. Враховуючи, що такі витрати цементу властиві для бетону класів В15...В20 можна розрахувати ефект зниження витрати цементу за рахунок введення мінеральної добавки. В даному випадку можливе зниження кількості цементу є несуттєвим і становить близько 19...28 $\text{кг}/\text{м}^3$.

Найбільший ефект збільшення міцності спостерігається при витраті цементу $300...400 \text{ кг}/\text{м}^3$. Введення метакеоліну викликає підвищення

міцності у бетонах від 33...44 МПа до 43...60 МПа (приріст 25...30%). Підвищення міцності викликане ростом новоутворень та утворенням більш ефективної дрібнокристалічної їх структури при активному зв'язуванні метаксаоліном гідроксиду кальцію. Для помітного проходження цього процесу необхідна значна кількість цементного клінкеру як джерела Са(ОН)₂, тому із зростанням кількості цементу вплив метаксаоліну більш помітний. Такі склади бетону дозволяють отримати значну економію цементу (45...110 кг/м³) для досягнення проектної міцності.

При подальшому збільшенні витрати цементу (до 500 кг/м³ та вище) ефективність метаксаоліну знижується внаслідок зростання водопотреби бетонної суміші і В/Ц бетону. Підвищення міцності становить всього 2...3 МПа. Позитивний ефект структуроутворення цементного каменю в присутності метаксаоліну, відмічений вище, компенсується підвищенням його пористості. В такому випадку ефективними є способи, котрі знижують водопотребу бетонної суміші: зменшення кількості метаксаоліну чи підвищення вмісту суперпластифікатора. Так зниження вмісту метаксаоліну до 3% не спричиняє суттєве збільшення водопотреби бетонної суміші у складах з витратою цементу близько 500 кг/м³. При вмісті такої кількості метаксаоліну В/Ц практично не зростає і спостерігається підвищення міцності на 8...10% (до 60...63 МПа).

Підвищення вмісту суперпластифікатора (до 1,5%) для компенсації В/Ц суттєво ефективність метаксаоліну. В даному випадку спостерігається зростання міцності на 28 добу – 30...32%, і забезпечується досягнення максимальних значень - близько 70...73 МПа. Ймовірно, що подібна тенденція повинна зберегтись і при подальшому збільшенні кількості метаксаоліну та, відповідно, суперпластифікатора. Також позитивно може впливати використання хімічних добавок з більшим водоредуруючим ефектом.

Таким чином, максимальний, з позиції підвищення міцності, ефект метаксаоліну можливий при умові стабільного водовмісту бетонної суміші (В/Ц=const). При збільшенні витрати води зі введенням метаксаоліну слід підвищувати кількість суперпластифікатора (рис. 1).

В цілому ефективність метаксаоліну підвищується зі збільшенням витрати цементу в бетоні. Суттєвого впливу метаксаоліну на кінетику твердіння бетону помічено не було. Це може бути пов'язано з деяким сповільнюючим ефектом, викликаним введенням добавки СП-1 у підвищеній кількості (1...1,5%).

Зміна типу цементу з I на II (з мінеральними добавками) суттєво позначилась на ефективності метаксаоліну. Так при витраті цементу 315 кг/м³ за рахунок введення 5% метаксаоліну в умовах незмінного В/Ц міцність підвищилась всього на 5...6%, а при витраті цементу 405 кг/м³ – на 20...22%. Це значно нижче ніж спостерігалось в аналогічних складах з бездобавочним цементом. Хоча метаксаолін характеризується значно більшою (до трьох

разів) активністю до зв'язування гідроксиду кальцію ніж доменний шлак [2], присутність значної кількості шлаку (у 3...4 рази більшої ніж введений метакалін) все ж суттєво знижує кількість вапна з яким може взаємодіяти введена у бетон добавка.

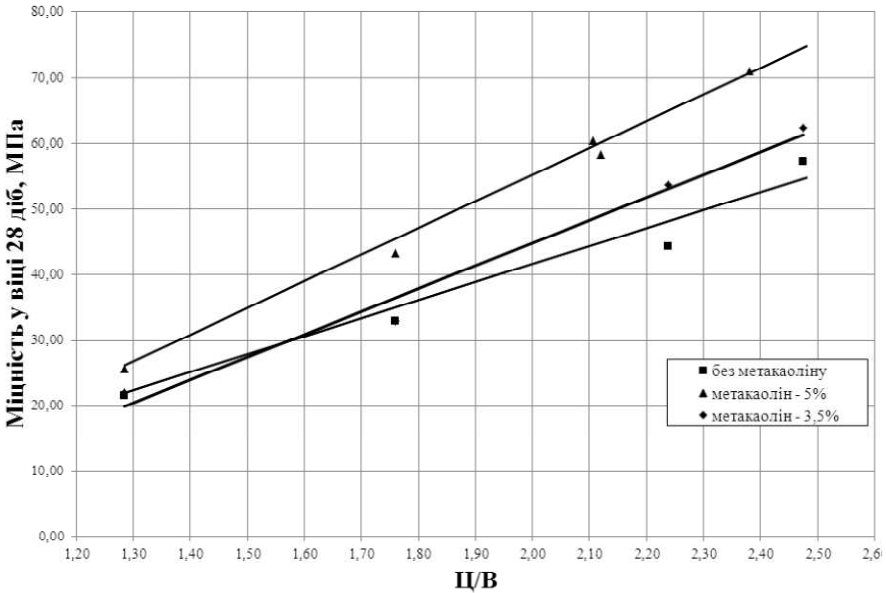


Рис. 3. Вплив метакаліну на міцність бетону при різних Ц/В.

Примітка: Вміст суперпластифікатора СП-1 – 1...1,5% залежно від водо потреби суміші

З огляду на отримані результати щодо ефективності метакаліну у невеликих кількостях та суттєвий вплив присутності інших мінеральних наповнювачів можна вважати, що метакалін при введенні до складу бетону сприяє росту новоутворень цементного каменю ймовірно за рахунок утворення додаткових центрів кристалізації та формування більш однорідної дрібнокристалічної структури.

Побудовані графічні залежності міцності бетону з метакаліном та суперпластифікатором від Ц/В, які були апроксимовані лінійними рівняннями. Це дозволило запроєктувати склади бетону при використанні метакаліну (табл. 2).

Таким чином, метакалін, що виготовляється підприємством ТОВ «Західна каолінова компанія» згідно ТУ У В.2.7-08.1-31108661-001:2014 є ефективною мінеральною добавкою до бетонів і дозволяє при введенні до 5% разом із суперпластифікатором створювати позитивний вплив на властивості

бетонних сумішей (суттєво знижуючи розшарування та водовідділення) з одночасним підвищенням міцності бетону при стиску.

Таблиця 2

Розроблені склади бетону з добавкою метакаоліну (5%) та суперпластифікатора СП-1 (1...1,5%)
(марка бетонної суміші за рухливістю – Р4(15...21 см))

№ з/п	Клас бетону	Вміст суперпластифікатора, %	Витрата компонентів, кг/м ³			
			Цемент	Вода	Пісок	Щебінь
1	B15	1	210	180	823	1345
2	B20	1	238	180	812	1328
3	B25	1	265	180	802	1310
4	B30	1	300	184	753	1318
5	B35	1	342	191	732	1281
6	B40	1	372	192	665	1317
7	B45	1	452	215	600	1242
8	B50	1,5	483	210	595	1232
9	B55	1,5	535	220	570	1180

*Примітка: Склади бетону дійсні при використанні цементу ПЦ-І-500, гранітного щебеню фр. 5...20 мм і кварцового піску з $M_{кр}=1,8...2,0$.

Це дає можливість отримати високоміцні бетони класів B50...B55 при витратах цементу 480...530 кг/м³. Спільне застосування метакаоліну та ефективних супер- і гіперпластифікаторів дозволяє отримати також бетони вищих класів при помірних витратах цементу.

1. Цементные бетоны с минеральными наполнителями/Л.И.Дворкин, В.И.Соломатов, В.Н.Выровой, С.М. Чудновский; К.: Будивельник, 1991.-136 с. 2. Дворкін Л.Й., Лушнікова Н.В., Рунова Р.Ф., Троян В.В. Метакаолін в будівельних розчинах і бетонах: Монографія. - Київ: Вид-во КНУБіА, 2007.-214 с. 3. О механизме влияния тонкомолотых добавок на свойства цементного камня/ Ф.Д. Овчаренко, В.И. Соломатов, В.М. Казанский и др.//Докл./АН СССР.-Т.284.-№2.-1985.-С.52-56. 4. Инструкция 23-02. Инструкция по транспортировке и укладке бетонной смеси в монолитные конструкции с помощью автобетоносмесителей и автобетононасосов (<http://www.gosthelp.ru/text/Instpukciya2302Instrukciy.html>, 19.06.2015).