

Барабаш І. Оптимізація складів високоміцного бетону на механоактивованому в'язучому з добавкою мікрокремнезему / І. Барабаш, Л. Ксьоншкевич // Вісник ТНТУ — Тернопіль : ТНТУ, 2014. — Том 76. — № 4. — С. 148-154. — (Машинобудування, автоматизація виробництва та процеси механічної обробки).

УДК 666.974.6

І. Барабаш, докт. техн. наук; Л. Ксьоншкевич, канд. техн. наук

Одеська державна академія будівництва та архітектури

ОПТИМІЗАЦІЯ СКЛАДІВ ВИСОКОМІЦНОГО БЕТОНУ НА МЕХАНОАКТИВОВАНОМУ В'ЯЖУЧОМУ З ДОБАВКОЮ МІКРОКРЕМНЕЗЕМУ

Резюме. Стаття присвячена питанням отримання високоміцних бетонів шляхом механоактивації рядового портландцементу з органо-мінеральною добавкою, а також оптимізації складів бетону з урахуванням ресурсозбереження. Проведений експеримент дозволив встановити вплив незалежних факторів (x_1 – вміст мікрокремнезему в в'язучому – 5 ± 5 %; x_2 – витрата в'язучого в бетоні – 450 ± 100 кг/м³; x_3 – питома поверхня (S_{sp}) портландцементу – 400 ± 100 м²/кг) на фізико-механічні властивості бетону (міцність при стиску, K_p). На базі отриманих математичних моделей, що відображають вплив незалежних факторів на фізико-механічні властивості високоміцного бетону проведена оптимізація складових високоміцних бетонів.

Ключові слова: механоактивація, модифікація, органо-мінеральна добавка, портландцемент, мікрокремнезем, оптимізація складів

I. Barabash, L. Ksenschkevich

OPTIMIZATION OF HIGH-PERFORMANCE CONCRETE MIXES USING A MECHANOACTIVATED BINDER ADDED WITH MICROSILICA

Summary. The paper examines the problems associated with production of high-performance concretes by using a general purpose blended Portland cement which is to be mechanoactivated and modified with an organomineral additive, and with optimization of concrete mixes taking into account cost-effective use of resources.

The experiment conducted in accordance with a tri-factorial D-optimum design enabled to establish an influence of independent factors (x_1 – content of microsilica in the binder - 5 ± 5 %; x_2 – binder consumption in concrete - 450 ± 100 kg/m³; x_3 – specific area (S_{sp}) of Portland cement - 400 ± 100 m²/kg) on physical and mechanical properties of concrete (compression strength, K_p). It was established that the use of the mechanoactivated general purpose blended Portland cement with an organomineral additive (microsilica+C-3) makes it possible to obtain high-performance concretes which compression strength on the 28th day reaches 120 MPa. Optimization of concrete mixes was achieved on the basis of obtained mathematical models that reflect the influence of independent factors on physical and mechanical properties of a high-performance concrete. Three alternatives to select the optimum composition of a high-performance concrete with the use of two-dimensional diagrams were considered. The alternatives differed in the binder consumption of 350, 450 and 550 kg/m³. At the appropriate fixed levels of x_2 factor, the diagrams were constructed as squares, which reflect the influence of the microsilica amount (x_1) and specific area of the binder (x_3) on the compression strength level of concretes added with a mechanoactivated binder on the 28th day, as well as on the softening coefficient. As a common limitation criterion for all three alternatives, the concrete softening coefficient not less than 0.85 ($K_s \geq 0.85$) was found. The compression strength of concrete – 80, 90 and 100 MPa was assumed as the second limitation criterion.

Solution of the optimization problem enabled to select the optimum compositions of high-performance concretes that can be used depending on the needed strength- levels for a particular task and taking into account the economic efficiency and current prices of energy, equipment and raw materials.

Key words: mechanoactivation, modification, organomineral additive, Portland cement, microsilica, optimization of stores.

Постановка проблеми. Необхідність отримання високомарочних бетонів на базі рядових цементів змушує шукати нові технологічні прийоми і, в тому числі,

механоактивацію в'язучого з використанням органо-мінеральних добавок. Введення в портландцемент реакційно-здатного мікрокремнезему спільно з високоефективним хімічним модифікатором забезпечує спрямоване ступтуроутворення твердіючого цементного каменю, підвищення його щільності й міцності [1,2].

Значно посилює ефект від спільного введення в портландцемент мікрокремнезему й органічного модифікатора механоактивації в'язучого в турбулентних потоках [3,4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботах П.І. Боженова [5], Ю.М. Бутта [6], О.В. Волженського, Ю.С.Бурова [7], Р.Ф. Рунової [8] та ін. встановлено, що використання активних мінеральних добавок дає реальну можливість отримання бетонів із заданими фізико-механічними характеристиками при значній економії портландцементу. Серед активних мінеральних добавок значна роль у формуванні структури цементного каменю відводиться мікрокремнезему. У роботах В.Г. Батракова, С.С. Капрієлова А.В. Шейнфельда, М.Ф. Жигульова, С.Т. Бorigіна [9,10] та ін. встановлено, що мікрокремнезем дає можливість регулювати процеси ступтуроутворення та призводить до підвищення міцності при стиску цементного каменю й бетону на його основі. Посилюють роль мікрокремнезему в формуванні структури цементного каменю поверхнево-активні речовини. У роботах К.Ю. Миненко [11], С.С. Капрієлова, А.В. Шейнфельда, Ю.Р. Кривобородова [1] В.І. Калашнікова, В.С. Дем'янової [12] встановлено, що одночасне введення мікрокремнезему та поверхнево-активних речовин дозволяє різко підвищити міцність бетонів. Найкращим резервом підвищення міцності бетонів є вдосконалення способів приготування бетонної суміші, в тому числі з застосуванням механоактивації в'язучих. У роботах І.В. Барабаша, В.М. Вирового, В.І. Соломатова [4,13–15], С.І. Федоркіна [3], Г. Хайніке [16], Н.М. Руденко [17] та ін. підтверджена позитивна роль механоактивації мінеральних в'язучих на якість бетону, в тому числі й на підвищення його міцності. – підвищення ефективності використання рядового портландцементу у високоміцних бетонах за рахунок його механоактивації й модифікації органо-мінеральною добавкою.

Постановка завдання. Вивчити вплив механоактивації в'язучого (портландцемент + мікрокремнезем + С-3) на механічні характеристики бетону та оптимізувати склади високоміцного бетону з урахуванням ресурсозбереження.

Результати дослідження. Проведені дослідження [18,19] показують, що ступтурна модифікація поверхні зерен цементу і мікрокремнезему призводить до зміни характеристик міцності цементного каменю та бетону на його основі.

Для виявлення впливу незалежних факторів на фізико-механічні властивості бетону був проведений експеримент за 15-ти точковим трифакторним планом.

В експерименті варіювалися такі фактори:

x_1 – вміст мікрокремнезему (МК) у портландцементі (по масі) – $5 \pm 5\%$;

x_2 – витрата в'язучого у бетоні – 450 ± 100 кг/м³;

x_3 – питома поверхня (Спит) портландцементу – 400 ± 100 м²/кг.

Кількість суперпластифікатора С-3 для всіх рядків математичного плану дорівнювала 1% від маси в'язучого. В якості заповнювача використовувався кварцовий пісок з $M_{кр} = 2,2$ та гранітний щебінь фракції 5...20 мм. Осадження конуса бетонної суміші дорівнювала 3 см.

Приготування бетонних сумішей відбувалося як за роздільною технологією (РТ) з попередньою активацією в'язучого, так і за традиційною (ТТ). Особливість приготування бетонної суміші за роздільною технологією полягає в тому, що суспензія в'язучого, попередньо отримана спільним швидкісним змішуванням у трибоактиваторі послідовно введених в нього води замішування, добавки С-3, портландцементу і мікрокремнезему, згодом поєднувалася з віддозованою кількістю кварцового піску і гранітного щебеню в ординарному бетонозмішувачі. Активація суспензії відбувалася протягом 3-х хвилин при швидкості обертання робочого ротора змішувача 2800 об/хв. Для контролю готувалися бетонні суміші аналогічного складу, в'язуче яких механоактивації не піддавалося.

Формування зразків – кубів з ребром 10см проводились на лабораторній віброплощадці з терміном вібрації 120 с. Тверднення зразків відбувалося в нормальних умовах при температурі 18–20⁰С і відносній вологості повітря не менше 95%. Вплив досліджуваних факторів (x_1, x_2, x_3) на міцність при стиску бетону в 28-добовому віці відображено в математичних моделях (1.1–1.2).

$$R_{ст}^a 28 = 92,3 + 10,4x_1 + 6,1x_1^2 + 12,1x_2 + 3x_2x_3 + 8,1x_3 - 13,4x_3^2 \quad (1.1)$$

$$R_{ст}^к 28 = 69,4 + 6,8x_1 + 4,9x_1^2 + 1,4x_1x_2 + 8,5x_2 + 2,1x_2x_3 + 6,3x_3 - 12,3x_3^2 \quad (1.2)$$

У результаті проведеного експерименту виявлена можливість підвищення міцності бетону на механоактивованому в'язучому в марочному віці, а також інтенсивнішого її набору, особливо в ранні терміни твердіння.

Експериментальні дані із впливу незалежних факторів (в 28-добовому віці) на механічні властивості високоміцного бетону наведені в табл.1.

Таблиця 1

План експерименту та фізико-механічні характеристики бетону

Table 1

The plan of experiment and physical-mechanical properties of concrete

№ з/П	Рівні варіювання			МК, %	Витрата в'язучого, кг/м ³	S _{шт.} , м ² /кг	Відгуки			
	x ₁	x ₂	x ₃				R _{ст,г} ^к , МПа	R _{ст,вод,г} ^к , МПа	R _{ст,г} ^а , МПа	R _{ст,вод,г} ^а , МПа
1	-	-	-	0	350	300	43,6	41,8	59,7	56,4
2	+	-	-	10	350	300	52,3	43,3	73,2	60,6
3	-	+	-	0	550	300	53,9	49,5	75,5	64,4
4	+	+	-	10	550	300	69,5	61,4	97,3	85,9
5	-	-	+	0	350	500	52,7	44,8	68,5	58,2
6	+	-	+	10	350	500	64,3	51,3	90	71,8
7	-	+	+	0	550	500	72,8	69,3	98,3	90,1
8	+	+	+	10	550	500	88,4	71,3	123,8	99,8
9	-	0	0	0	450	400	64,9	55,9	84,4	72,7
10	+	0	0	10	450	400	81,4	67,5	105,8	94,5
11	0	-	0	5	350	400	61,6	57,6	83,2	77,8
12	0	+	0	5	550	400	75,2	66,1	101	89,2
13	0	0	-	5	450	300	53,9	50,4	72,8	68,0
14	0	0	+	5	450	500	58,1	50,5	78,4	68,2
15	0	0	0	5	450	400	73,4	63,5	99,1	89,8

Примітка: R_{ст,г}^а, МПа – міцність при стиску бетону на механоактивованому в'язучому; R_{ст,г}^к, МПа – міцність при стиску бетону (контроль); R_{ст,вод,г}^а, МПа – міцність при стиску бетону в водонасиченому стані на механоактивованому в'язучому; R_{ст,вод,г}^к, МПа – міцність при стиску бетону в водонасиченому стані (контроль).

На базі отриманих математичних моделей, що відображають вплив незалежних факторів на фізико-механічні властивості високоміцного бетону, виконано оптимізацію складу бетонних сумішей. Розглядалися три варіанти вибору оптимального складу високоміцного бетону по 2-мірних діаграмах. Варіанти відрізнялися витратою в'язучого: 350, 450 і 550 кг/м³, що відповідає рівням фактора x_2 у діапазоні від -1 до +1.

При відповідних зафіксованих рівнях фактора x_2 були побудовані діаграми у вигляді квадратів, що відображають вплив кількості мікрокремнезему (x_1) і питомої поверхні в'язучого (x_3) на рівень міцності при стиску бетонів на механоактивованому в'язучому у 28-денному віці, а також на значення водопоглинання й коефіцієнта розм'якшення (рис.1).

Загальним для усіх трьох варіантів критерієм обмеження був прийнятий коефіцієнт розм'якшення бетону не нижче 0,85 ($K_p \geq 0,85$). В якості другого критерію обмеження була прийнята міцність при стиску бетону – 80, 90 і 100 МПа.

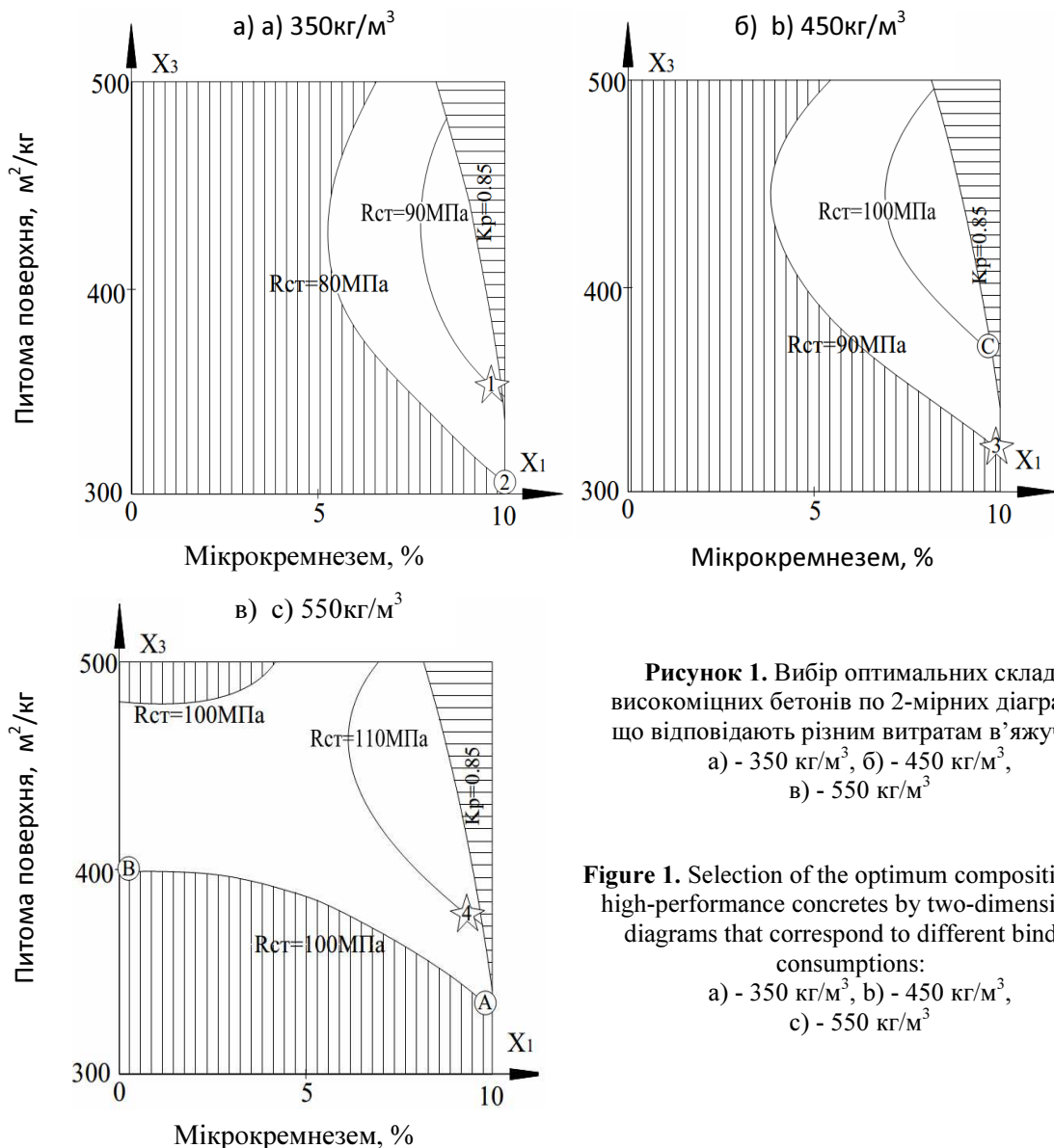


Рисунок 1. Вибір оптимальних складів високоміцних бетонів по 2-мірних діаграмах, що відповідають різним витратам в'язучого: а) - 350 кг/м³, б) - 450 кг/м³, в) - 550 кг/м³

Figure 1. Selection of the optimum compositions of high-performance concretes by two-dimensional diagrams that correspond to different binder consumptions: а) - 350 кг/м³, б) - 450 кг/м³, в) - 550 кг/м³

При витраті в'язучого 350 кг/м^3 (рис.1а) було вибрано два оптимальні склади: **1** – відповідає матеріалу з міцністю 90 МПа при $K_p \geq 0,85$. Досягається при питомій поверхні портландцементу $350 \text{ м}^2/\text{кг}$ при введенні $9,5\%$ мікрокремнезему;

2 – відповідає матеріалу міцністю 80 МПа при $K_p \geq 0,85$. У цьому разі питома поверхня портландцементу складає $310 \text{ м}^2/\text{кг}$, кількість мікрокремнезему – 10% . Бетон його складу має нижчу міцність, проте він є більш раціональним за рахунок економії енергії на помел в'язучого.

При витраті в'язучого 450 кг/м^3 (рис.1б) також було вибрано два оптимальні склади:

I-й: ПЦ= $427,5 \text{ кг/м}^3$; МК= $22,5 \text{ кг/м}^3$; Пісок= 700 кг/м^3 ; Щебінь= 1100 кг/м^3 ; Вода= 116 кг/м^3 ; С-3= $4,5 \text{ кг/м}^3$.

II-й: ПЦ= 405 кг/м^3 ; МК= 45 кг/м^3 ; Пісок= 700 кг/м^3 ; Щебінь= 1100 кг/м^3 ; Вода= 125 кг/м^3 ; С-3= $4,5 \text{ кг/м}^3$;

3 – відповідає бетону міцністю 90 МПа при $K_p \geq 0,85$. Досягається він при низькій питомій поверхні портландцементу $330 \text{ м}^2/\text{кг}$ і при введенні в нього 10% мікрокремнезему. Може бути рекомендований з точки зору використання портландцементу з відносно низькою питомою поверхнею.

С – відповідає бетону міцністю 100 МПа при $K_p \geq 0,85$.

При витраті в'язучого 550 кг/м^3 (рис.1в) було вибрано три оптимальні склади: **А** – відповідає бетону міцністю 100 МПа при $K_p \geq 0,85$.

В – відповідає бетону міцністю 100 МПа при $K_p \geq 0,85$.

4 – відповідає бетону з підвищеною до 110 МПа міцністю при $K_p \geq 0,85$.

Вирішення оптимізаційної задачі дозволило підібрати оптимальні складові високоміцних бетонів, які можуть бути використані залежно від потрібних для конкретного завдання рівнів міцності й економічної доцільності з урахуванням поточних цін на енергоносії, устаткування та сировину.

Висновки. Експериментально встановлено, що механоактивація рядового портландцементу у присутності мікрокремнезему і суперпластифікатора С-3 дозволяє отримувати важкі бетони класів С35/45...С90/105 з витратою в'язучого від 450 до 550 кг/м^3 . За результатами досліджень оптимізовано складові високоміцного бетону класу С70/85...С90/105.

Метою подальших досліджень є вивчення довговічності отриманих високоміцних бетонів на механоактивованому в'язучому за критеріями морозостійкості, тріщиностійкості тощо.

Conclusions. It was established experimentally that mechanoactivation of a general purpose blended Portland cement added with microsilica and C-3 superplasticizer allows to obtain heavy concretes of C35/45...C90/105 classes with binder consumption from 450 to 550 kg/m^3 . The results of the study made it possible to optimize compositions of C70/85...C90/105 high-performance concrete.

The aim of further research is to study durability of obtained high-performance concretes added with a mechanoactivated binder according to frost resistance, crack resistance, etc. criteria.

Список використаної літератури

1. Каприелов, С.С. Влияние структуры цементного камня с добавками микрокремнезема и суперпластификатора на свойства бетона [Текст] / С.С. Каприелов, А.В. Шейнфельд, Ю.Р. Кривобородов // Бетон и железобетон, 1992. – №7. – С.4–7.

2. Оценка ультрадисперсных отходов металлургических производств как добавок в бетон [Текст] / В.Г. Батраков, С.С. Каприелов, Ф.М. Иванов, А.В. Шейнфельд // Бетон и железобетон. – 1990. – №12. – С.15–17.

3. Федоркин, С.И. Механоактивация вторичного сырья в производстве строительных материалов [Текст] / С.И. Федоркин. – Симферополь: Таврия, 1997. – 180 с.

4. Барабаш, І.В. Механохімічна активація мінеральних в'язучих речовин: навчальний посібник [Текст] / І.В. Барабаш. – Одеса: Астропрінт, 2002. – 100 с.
5. Баженов, Ю.М. Технология бетона [Текст] / Ю.М. Баженов. – М.: Изд-во АВС, 2003. – 500 с.
6. Технология вяжущих веществ [Текст] / Ю.М. Бутт, С.Д. О कोरोков, М.М. Сычев, В.В. Тимашев. – М.: Высшая школа, 1965. – 143 с.
7. Волженский, А.В. Минеральные вяжущие вещества (технология и свойства): учебник для вузов [Текст] / А.В. Волженский, Ю.С. Буров, В.С. Колокольников. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1979. – 476 с.
8. Формирование структуры высокопрочных бетонов [Текст] / Р.Ф. Рунова, И.И. Руденко, В.В. Троян, В.В. Товстониц, С.П. Щербина, Л.Д. Пашина // Будівельні матеріали, вироби та санітарна техніка. – 2008. – №29. – С.91–97.
9. Батраков, В.Г. Эффективность применения ультрадисперсных отходов ферросплавного производства [Текст] / В.Г. Батраков, С.С. Каприелов, А.В. Шейнфельд // Бетон и железобетон. – 1989. – №8. – С.24–25.
10. Высокопрочные бетоны повышенной морозостойкости с органоминеральным модификатором [Текст] / С.С. Каприелов, А.В. Шейнфельд, Е.С. Силина, Н.Ф. Жигулев, С.Т. Борыгин // Транспортное строительство. – 2000. – №11. – С.24–27.
11. Миненко, Е.Ю. Усадка и усадочная трещиностойкость высокопрочных бетонов с органоминеральными модификаторами: дисс. канд. техн. наук: 05.23.05 [Текст] / Е.Ю. Миненко. – Пенза – 2004. – 157 с.
12. Демьянова, В.С. Об использовании дисперсных наполнителей в цементных системах [Текст] / В.С. Демьянова, В.И. Калашников, А.А. Борисов // Жил. стр-во. – 1999. – №1.
13. Барабаш, И.В. Интенсивная раздельная технология бетонов на наполненном известковом вяжущем [Текст] / И.В. Барабаш, В.И. Соломатов // Строительные материалы. – 1992. – №1. – С.4–5.
14. Барабаш, И.В. Механизмы организации структуры механоактивированных грубодисперсных систем [Текст] / И.В. Барабаш, В.Н. Выровой // Вісник ДДАБА. – 2000. – 2(22). – С.12–15.
15. Соломатов, В.И. Пути активации наполнителей композиционных материалов [Текст] / В.И. Соломатов, Л.И. Дворкин, С.М. Чудновский // Изв. вузов. – 1987. – №1. – С.60–63.
16. Трибохимия: пер с нем. [Текст] / Г. Хайнике. – М.: Мир, 1987. – 584 с.
17. Руденко, Н.Н. Тяжелые бетоны с высокими эксплуатационными свойствами [Текст] / Н.Н. Руденко. – Днепропетровск, 1999. – 260 с.
18. Влияние микрокремнезема на кинетику структурообразования механоактивированных цементных суспензий [Текст] / И.В. Барабаш, Л.Н. Ксёншкевич, А.А. Тертычный, А.О. Косюга, В.В. Пряхина // Вісник ОДАБА. – 2010. – №38. – С.31–34.
19. Ксёншкевич, Л.Н. Физико-химические и физико-механические методы исследования цементного камня с добавкой микрокремнезема [Текст] / Л.Н. Ксёншкевич, И.В. Барабаш // Вісник ОДАБА. – 2010. – №40. – С.161–167.

Отримано 12.06.2014