

## МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ БЕТОНУ НА ОБРОБЛЕНОМУ ЦЕМЕНТНОЮ СУСПЕНЗІЄЮ КАРБОНАТНОМУ ЩЕБЕНІ

**Кровяков С.О.**, к.т.н., доцент,  
**Мішутін А.В.**, д.т.н., професор,  
**Полторапавлов А.О.**, аспірант  
*Одеська державна академія будівництва та архітектури*  
skrovyakov@ukr.net

**Анотація.** Вивчено механічні властивості бетонів на карбонатному (вапняковому) щебені. Досліджувалися дві паралельні серії зразків на основі сумішей рівної рухливості П2. Перша готувалася за традиційною технологією, друга – з попередньою обробкою щебеню цементною суспензією. В обох серіях варіювалося кількість мікрокремнезему і суперпластифікатору С-3. Встановлено, що найбільшу міцність при стиску мають бетони при кількості мікрокремнезему близько  $30 \text{ кг/м}^3$  і добавки С-3 від 0.8 до 0.9%. Попередня обробка пористого щебеню дозволяє підвищити міцність бетону при стиску в середньому на 5 МПа.

**Ключові слова:** карбонатний щебінь, обробка заповнювача, мікрокремнезем, пластифікатор, експериментально-статистичне моделювання.

## МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БЕТОНА НА ОБРАБОТАННОМ ЦЕМЕНТНОЙ СУСПЕНЗИЕЙ КАРБОНАТНОМ ЩЕБНЕ

**Кровяков С.А.**, к.т.н., доцент,  
**Мишутин А.В.**, д.т.н., професор,  
**Полторапавлов А.А.**, аспірант  
*Одесская государственная академия строительства и архитектуры*  
skrovyakov@ukr.net

**Аннотация.** Изучены механические свойства бетонов на карбонатном (известняковом) щебне. Исследовались две параллельные серии образцов на основе смесей равной подвижности П2. Первая готовилась по традиционной технологи, вторая – с предварительной обработкой щебня цементной суспензией. В обеих сериях варьировалось количество микрокремнезема и суперпластификатора С-3. Установлено, что наибольшую прочность при сжатии имеют бетоны при количестве микрокремнезема около  $30 \text{ кг/м}^3$  и добавки С-3 от 0.8 до 0.9%. Предварительная обработка пористого щебня позволяет повысить прочность бетона при сжатии в среднем на 5 МПа.

**Ключевые слова:** карбонатный щебень, обработка заполнителя, микрокремнезем, пластификатор, экспериментально-статистическое моделирование.

## MECHANICAL PROPERTIES OF CONCRETE WITH CALCAREOUS RUBBLE PROCESSED CEMENT SUSPENSION

**Kroviakov S.O.**, Ph.D., Assistant Professor,  
**Mishutin A.V.**, D.Sc., Professor,  
**Poltorapavlov A.O.**, graduate-student  
*Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*  
skrovyakov@ukr.net

**Abstract.** Mechanical properties of concrete on a carbonate gravel were investigated. Carbonate gravel is made of limestone rubble in Odessa region. Two parallel series of samples were investigated. Both series were based on the equal mobility mixtures (P2). The first series was made with traditional technology, the second series was made of gravel processed cement slurry. Suspension processing was performed at mixing directly. In both series of concrete amount of silica fume and superplasticizer S-3 varied.

It was found out that the introduction of 30 kg/m<sup>3</sup> of silica fume compressive strength of concrete is increased by 8-15 MPa and a tensile strength of about 0.5 MPa. By increasing the additive S-3 amount of 0.5 to 0.8-0.9% compressive strength of the concrete increases by 10-15 MPa and a tensile strength by 1-1.5 MPa. Pre-treatment of the cement suspension increases carbonate gravel concrete compressive strength of on average 5 MPa. However, the pre-treatment does not affect the tensile strength of the concrete. Conclusion: modified concrete on calcareous rubble can be recommended for thin-walled constructions of hydraulic and transport structures. Pre-treatment of porous rubble is an effective method to improve the strength of concrete on the local aggregate.

**Keywords:** carbonate gravel, aggregate processing, silica fume, plasticizer, experimental and statistical modeling.

**Вступ.** Бетон є основним матеріалом для транспортних і гідротехнічних споруд. В якості крупного заповнювача для подібних бетонів на сьогодні найчастіше використовується гранітний щебінь. Проте в південних і деяких інших регіонах України ефективнішим можна вважати застосування бетонів на місцевих заповнювачах, зокрема пористих. Наприклад, в Одеській області досить багато покладів вапняків, серед яких є і досить якісні, які можуть бути застосовані у транспортному будівництві. Бетони на подібних заповнювачах мають порівняно низьку вартість при достатній конструкційній міцності.

**Аналіз останніх досліджень.** Карбонатні породи становлять близько 20% обсягу осадових утворень планети і розповсюджені майже у всіх регіонах України. Потужність карбонатних пластів може досягати сотень метрів, а знаходяться вони у відкладеннях різного віку [1]. Частка карбонатних порід (вапняки, мармури, доломіт), що переробляються на щебінь, становить близько 60% [2].

У 50-70ті роки минулого століття бетони на вапнякових заповнювачах застосовувалися досить широко, проте в сучасному транспортному будівництві в Україні їх використання обмежено через багаторічну практику застосування досить однотипних бетонів на гранітному щебені. Розвиток будівельних технологій відкрив перспективи отримання довговічних бетонів на місцевих заповнювачах, що забезпечують необхідну конструктивну міцність при зниженні витрат на підготовку і транспортування складових бетону [3].

Можливість отримання бетонів з високими механічними властивостями на карбонатних заповнювачах показана в багатьох дослідженнях. Міцність композиту на пористому заповнювачі може відчутно перевищувати власну міцність крупного заповнювача. Наприклад, на основі вапняків отримано бетони міцністю до 60 МПа [4]. У роботі [5] при використанні низькоміцних вапняків і витраті цементу від 250 до 450 кг/м<sup>3</sup> були отримані бетони з міцністю від 25 до 45 МПа. При цьому всі матеріали показали водостійкість в межах 0,98-1,0.

Деякі вчені пояснюють позитивний вплив при використанні пористих заповнювачів процесом самовакуумування [6]. Зерна пористих порід відіграють роль своєрідних «насосів», які в початковий період структуроутворення забирають воду з цементного тіста, в результаті чого бетон стає щільнішим. При подальшому твердінні волога, яка акумульована зернами заповнювача, знову поступає до цементного тіста і покращує процес гідратації в'язучого. Завдяки цим процесам бетон на пористому заповнювачі в порівнянні з бетонами на гранітному щебені також менш схильний до седиментаційних процесів. Самовакуумування також підвищує хімічну стійкість бетонів, завдяки чому для конструкцій, підданих агресивного впливу, у роботі [7] рекомендується застосовувати заповнювачі з капілярним

водопоглинанням.

Застосування мікрокремнезему в якості активної мінеральної добавки-наповнювача є одним з найбільш перспективних напрямків у технології високоякісних композитів на основі портландцементів [8]. Цей модифікатор вітчизняного походження покращує структуру за рахунок своєї хімічної активності і ефекту «мікронаповнювача», що сприяє ущільненню і зменшенню кількості мікрodefektів. Це веде до підвищення міцності, зниження проникності та збільшення довговічності бетону. З іншого боку, застосування мікрокремнезему вимагає підвищення В/Ц суміші завдяки його значній дисперсності. Тобто ефективно застосування мікрокремнезему можливо лише в комплексі з суперпластифікатором, за рахунок чого практично повністю нівелюється проблема підвищеної водопотреби даного компонента [9]. Таким чином, актуальною є задача дослідження властивостей модифікованих мікрокремнеземом і суперпластифікатором бетонів на вапняковому наповнювачі.

**Метою** роботи є дослідження впливу складу і використання попередньої обробки цементною суспензією карбонатного щебеню на механічні властивості модифікованого бетону.

**Об'єкти і методи дослідження.** Дослідження властивостей модифікованих бетонів на вапняковому (карбонатному) щебні проводилися із застосуванням методів планування експерименту за оптимальним 2-х факторним 9-ти точковим планом [10]. Варіювалися наступні фактори складу:

$X_1$  – кількість мікрокремнезему, від 0 до 40 кг/м<sup>3</sup>;

$X_2$  – кількість добавки С-3, від 0.5 до 1.0% від маси цементу.

Для всіх складів кількість портландцементу становила 450 кг/м<sup>3</sup>. Всі суміші мали рівну рухомість П2 (ОК=6...8 см). Застосовувався вапняковий щебінь Великодолинського кар'єру (Одеська область) фракції 5...20 мм з насипною щільністю 1180 кг/м<sup>3</sup>, кварцовий пісок з Мкр=2.6 (Вознесенський район Миколаївської області), портландцемент М400 Одеського цементного заводу і мікрокремнезем Нікопольського заводу феросплавів.

Виконувалося дві паралельних серії досліджень. Готувалися бетони однакових складів за різними технологіями змішування суміші. У першій серії (контрольній, індекс «к») змішування проходило за традиційною технологією з послідовним завантаженням у змішувач вапнякового щебеню, який безпосередньо у змішувачі зволожувався водою в обсязі 10% від загальної кількості води у суміші, далі завантажувався пісок, портландцемент, мікрокремнезем (при необхідності) й вода з добавкою С-3. Загальний час перемішування суміші складав 4-5 хвилин.

У другій серії змішування компонентів проводилося з попередньою обробкою пористого вапнякового щебеню цементною суспензією (індекс «о»). Ця операція проводилася з метою покращення властивостей бетону завдяки зміцненню контактної зони крупного заповнювача. Послідовність змішування в другій серії була такою. У змішувач подавалася вся необхідна вода з добавкою С-3 и з 30% від необхідної кількості портландцементу і мікрокремнезему (при необхідності). Після 1-ї хвилини перемішування цементної суспензії у змішувач подавався вапняковий щебінь, який далі оброблявся даною суспензією протягом 1-ї хвилини (тобто продовжувалося перемішування). Далі в змішувач подавався пісок і решта цементу та мікрокремнезему (при необхідності). Суміш перемішувалася до досягнення однорідності. Таким чином, загальний час перемішування суміші складав 5-6 хвилин, що приблизно лише 1-у хвилину довше, ніж приготування суміші традиційним способом. Ця хвилина необхідна для приготування цементної суспензії, проте подальші операції змішування проходять приблизно в тому ж темпі, що і при традиційній технології приготування бетонної суміші з крупним вапняковим заповнювачем. Тобто загальна кількість портландцементу в бетонах обох серій була рівною (як зазначалося вище – 450 кг/м<sup>3</sup>), проте вводилося в'яжуче за різними технологіями.

**Результати досліджень.** Завдяки тому, що всі суміші мали рівну рухомість ОК=6...8 см, їх В/Ц залежало від складу бетону. Встановлено, що технологія змішування (традиційна або з попередньою обробкою пористого вапнякового щебеню цементною суспензією) не впливає

на рівень В/Ц суміші. Тобто в обох серіях експерименту водопотреба однаково залежала від складу бетону. ЕС-модель, що описує вплив варійованих факторів складу на В/Ц суміші для обох серій має вигляд:

$$V/C_k = V/C_0 = 0.458 + 0.024x_1 - 0.010x_1^2 \pm 0x_1x_2 - 0.046x_2 \pm 0x_2^2 \quad (1)$$

Вплив варійованих факторів складу на В/Ц показано на діаграмі у вигляді квадрату, яка побудована по моделі (1) і показана на рис. 1. Аналіз діаграми показує, що по мірі зростання кількості суперпластифікатору В/Ц суміші знижується. При введенні в бетонну суміш мікрокремнезему у кількості 20-25 кг/м<sup>3</sup> її В/Ц підвищується приблизно на 10%. Подальше збільшення кількості мікрокремнезему вже майже не впливає на В/Ц суміші. Тобто при застосуванні даного модифікатору викликає необхідність підвищення В/Ц або кількості добавки С-3 для збереження рухомості суміші.

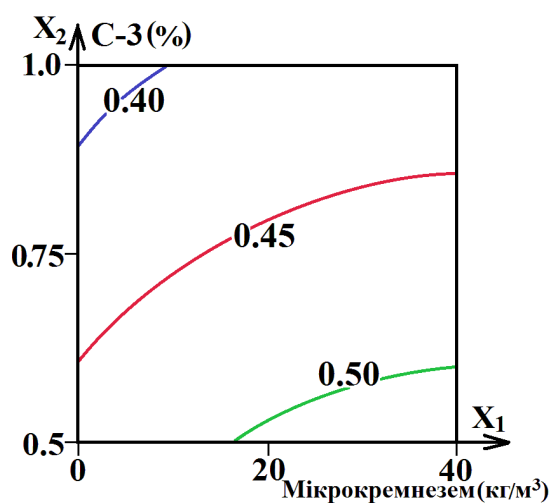


Рис.1. Вплив варійованих факторів складу на В/Ц сумішей рівної рухомості

По ЕС-моделям, аналогічним (1), були побудовані діаграми, що показані на рис. 2 і відображають вплив кількості добавки С-3 і мікрокремнезему на міцність при стиску досліджених бетонів на вапняковому щебні. Для контрольних складів, приготованих за традиційною технологією, діаграма показана на рис.2.а, для складів на обробленому цементною суспензією щебні – на рис.2.б.

Аналіз даних діаграм показує, що для обох серій досліджених бетонів максимальну міцність мають склади при кількості добавки С-3 0.8...0.9% і мікрокремнезему приблизно 30 кг/м<sup>3</sup>. При цьому завдяки застосуванню оптимальної кількості модифікаторів міцність при стиску бетонів зростає на 16-18 МПа в порівнянні зі складами без мікрокремнезему і с мінімальною кількістю суперпластифікатору. Тобто запропонований метод модифікації є ефективним для бетонів на вапняковому щебні.

Також важливим технічним ефектом можна вважати, що міцність бетонів на обробленому цементною суспензією вапняковому щебні була на 4-5 МПа вища за міцність контрольних бетонів аналогічних складів. Тобто за рахунок зміни технології приготування бетону на пористому заповнювачі досягається відчутне збільшення міцності кінцевого матеріалу. Даний ефект пояснюється зміцненням поверхневого шару крупного заповнювача та перехідної зони між заповнювачем і розчинною частиною бетону. Безперечно, масштаб цих ефектів залежить від співвідношення міцності похідних компонентів композиту і безпосередньо від типу пористого заповнювача, а також від складу бетону. Тобто від всієї ієрархічної побудови структури композиту [11].

Також аналізувалася міцність бетонів на розтяг при згині. Встановлено, що на відміну від міцності при стиску, величина цього показника не залежить від технології приготування

бетонної суміші. Це можна пояснити тим, що міцність заповнювача в меншій мірі впливає на здатність композита протидіяти розтягуючим навантаженням, ніж навантаженням стиску. Відповідно операція обробки пористого гравію цементною суспензією, основною позитивною рисою якої є зміцнення гравію і перехідної зони, майже не вплинула на величину міцності на розтягання при згині.

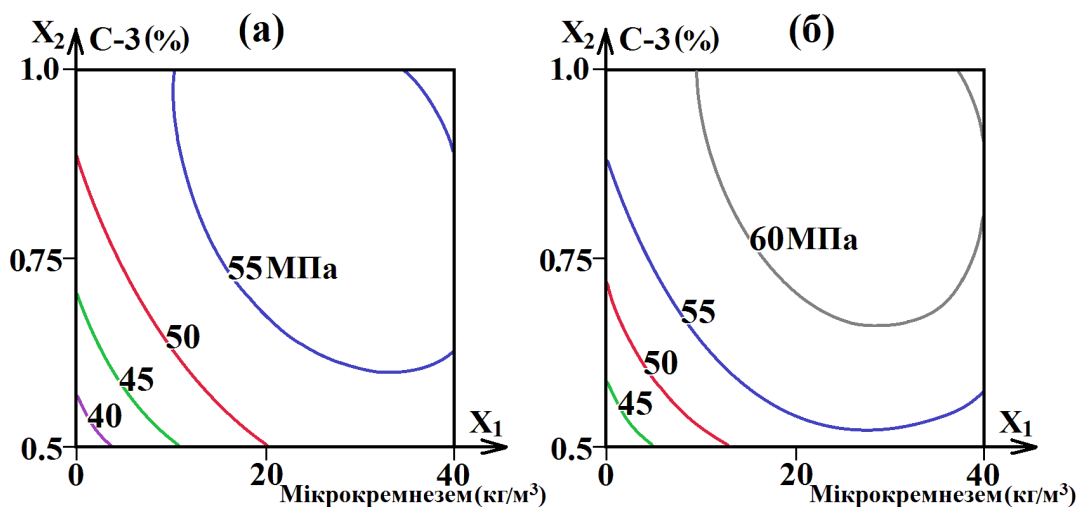


Рис.2. Вплив варійованих факторів на міцність при стиску досліджених бетонів на вапняковому щебені: а – приготованих за традиційною технологією; б – на обробленому цементною суспензією щебні

На рис. 3 показана діаграма у вигляді квадрату, яка побудована по відповідній ЕС-моделі та відображає вплив складу бетону на величину його міцності на розтяг при згині (як зазначалося вище – для обох серій). Аналіз діаграми показує, що варійовані у даному експерименті фактори на величину  $f_{ctk}$  оказують менший вплив, ніж на величину міцності при стиску. За рахунок введення мікрокремнезему міцність на розтяг збільшується на величину 0.2-0.6 МПа, при чому по мірі збільшення кількості добавки С-3 вплив цього фактору зменшується. При підвищенні кількості суперпластифікатору з 0.5 до 1% величина  $f_{ctk}$  досліджених бетонів збільшується приблизно на 1 МПа для складів без мікрокремнезему і приблизно на 1.5 МПа для складів з вмістом 30-40  $\text{кг/м}^3$  мікрокремнезему.

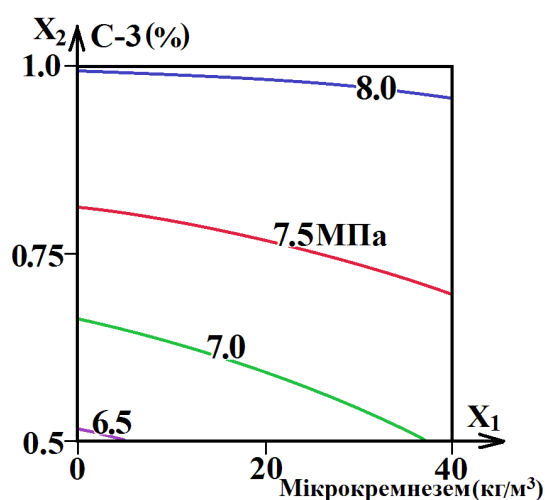


Рис. 3. Вплив варійованих факторів на міцність досліджених бетонів на розтяг при згині

Тобто досліджені бетони на вапняковому щебені характеризуються досить високим рівнем міцності на розтяг, що дозволяє вважати їх перспективним матеріалом для тонкостінних конструкцій, зокрема гідротехнічних і транспортних споруд. Основною технічною задачею, яку необхідно вирішити для успішного застосування подібних бетонів –

це забезпечення їх довговічності. Наші попередні дослідження показують [12], що бетони на вапняковому щебені характеризуються достатньо високою морозостійкістю, яка додатково підвищується за рахунок застосування модифікаторів. Досліджені модифіковані бетони також мають досить високий рівень морозостійкості та водонепроникності, що забезпечує їх довговічність і корозійну стійкість. Проте необхідно враховувати економічну доцільність застосування модифікаторів, тобто порівнювати витрати на модифікатори і економію від застосування місцевого заповнювача. Відповідно більш конкурентоздатними в більшості випадків є вітчизняні модифікатори.

**Висновки.** Механічні властивості модифікованих бетонів на обробленому місцевому вапняковому щебені дозволяють рекомендувати подібні матеріали для тонкостінних конструкцій гідротехнічних і транспортних за умови забезпечення необхідної довговічності. Найбільшу міцність при стиску мають досліджені бетони при кількості мікрокремнезему близько 30 кг/м<sup>3</sup> і добавки С-3 від 0.8 до 0.9%. Також за рахунок модифікації на 1-1.5 МПа підвищується міцність бетонів на вапняковому щебені на розтяг при згині. Попередня обробка пористого щебню цементною суспензією дозволяє підвищити міцність бетону при стиску в середньому на 5 МПа і практично не впливає на міцність на розтяг при згині. Тобто попередня обробка є ефективним технологічним прийомом підвищення якості бетонів на пористих заповнювачах.

### Література

1. Мала гірнича енциклопедія, т. 1 / За редакцією В.С.Білецького. – Донецьк: Донбас, 2004. – 640 с.
2. Зозуля П.В. Карбонатные породы как заполнители и наполнители, в цементах, цементных растворах и бетонах / Зозуля П.В. – Гипроцемент-наука. [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: <http://www.giprocement.ru/about/articles.html/p=25>.
3. Шелихов Н.С. Комплексное использование карбонатного сырья для производства строительных материалов / Н.С. Шелихов, Р.З. Рахимов // Строительные материалы, 2006, №9. – С. 42-44.
4. Маилян Р.Л. Исследование бетона и железобетона на пористых карбонатных заполнителях / Р.Л. Маилян. – Автореф. дисс. на соиск. уч. ст. к.т.н по спец. 05.23.05 – Тбилиси, 1970. – 24 с.
5. Черепов В.Д. Бетон на основе низкопрочных карбонатных пород / В.Д. Черепов, Н.П. Коршунова – Электронный научный журнал «Современные проблемы науки и образования», 2013, №2 [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: <http://www.science-education.ru/108-8676>
6. Симонов М.З. Основы технологии легких бетонов / М.З. Симонов. – М.: Стройиздат, 1973. – 584 с.
7. Хохрин Н.К. Парадигмы долговечности легкого бетона / Н.К. Хохрин. – Самара : СамИИТ, 2000. – 181 с.
8. Shetty M.S. Concrete technology. Theory and practice / M.S. Shetty. – New Delhi: S. Chand & company ltd, 2000. – 624 p.
9. Каприелов С.С. Бетоны нового поколения с высокими эксплуатационными свойствами / С.С. Каприелов, А.В. Шейнфельд // Материалы международной конференции "Долговечность и защита конструкций от коррозии". – М., 1999. – С.191-196.
10. Вознесенский В.А. Численные методы решения строительно-технологических задач на ЭВМ / В.А. Вознесенский, Т.В. Ляшенко, Б.Л. Огарков. – К.: Вища школа, 1989. – 327 с.
11. Суханов В.Г. Структура материала в структуре конструкции / В.Г. Суханов, В.Н. Выровой, О.А. Коробко. – Одесса: Полиграф, 2016. – 244 с.
12. Мішутін А.В. Порівняння властивостей бетонів жорстких дорожніх покриттів на різних типах заповнювача / А.В. Мішутін, С.О. Кровяков, А.О. Полторапавлов // Ресурсоекономічні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Випуск 31. – Рівне: НУВГП, 2015. – С.251-257.

Стаття надійшла 29.08.2016