

**ЕФЕКТИВНИЙ МАЛОКЛІНКЕРНИЙ ПІНОБЕТОН  
З ВИКОРИСТАННЯМ ТОНКОМЕЛЕНИХ В'ЯЖУЧИХ**

**ЭФФЕКТИВНЫЙ МАЛОКЛИНКЕРНЫЙ ПЕНОБЕТОН  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТОНКОМОЛОТЫХ ВЯЖУЩИХ**

**EFFECTIVE LOW-BRICK FOAM CONCRETE  
WITH USE FINE GROUND BINDERS**

**Бордюженко О. М., к.т.н., доцент**

(Національний університет водного господарства та природокористування,  
м. Рівне)

**Бордюженко О. М., к.т.н., доцент**

(Национальный университет водного хозяйства и природопользования,  
г. Ровно)

**Bordyuzhenko O. M., candidate of tech. sc.** (National University of Water Management and Nature Resources Use, Rivne)

Розглянута та експериментально обґрунтована доцільність виготовлення пінобетонів неавтоклавного твердіння з використанням тонкомелених в'яжучих. Визначено оптимальні склади таких пінобетонів та технологічні параметри їх отримання.

Рассмотрена и экспериментально обоснована целесообразность изготовления пенобетонов неавтоклавного твердения с использованием тонкомолотых вяжущих. Определены оптимальные составы таких пенобетонов и технологические параметры их получения.

**Examined experimentally and the expediency of non-autoclave foam concrete curing using fine ground binders is considered and experimentally proved. The optimum composition of foam concrete and technological parameters of their receiving are defined.**

**Ключові слова:**

Неавтоклавний пінобетон, тонкомелене в'яжуче, добавки-пластифікатори.

Неавтоклавный пенобетон, тонкомолотое вяжущее, добавки-пластификаторы.

Non-autoclave foam concrete, fine ground binders, plasticizers.

**Сучасний етап** розвитку технології ніздрюватих бетонів неавтоклавного твердіння характеризується прагненням дослідників створювати високоміцні пінобетони з використанням місцевої сировини, підвищувати продуктивність виробництва шляхом застосування швидкотверднучих в'яжучих, розробляти принципово нові способи одержання пінобетонної маси, оптимізувати структуру пінобетону, шукати можливі варіанти застосування монолітного пінобетону для спорудження каркасно-монолітних будинків і реконструкції існуючих будівель.

Основною технологічною задачею при виробництві неавтоклавних пінобетонів є забезпечення необхідної середньої густини пінобетону при максимально можливій міцності. Засобами вирішення такої задачі можуть бути механоактивація компонентів суміші, застосування різних добавок та осobilivих технологічних прийомів, використання спеціальних в'яжучих.

**Одним з раціональних** способів одержання таких пінобетонів можна вважати технологію з використанням в'яжучих низької водопотреби (BHB) [1], головною осobilivістю якої є те, що при використанні в якості основи стандартного портландцементу шляхом введення на стадії виготовлення (помелу) різних мінеральних та органічних добавок, в тому числі відходів, можна надавати BHB необхідних властивостей.

Раніше питання використання подібних в'яжучих розглядалось переважно в контексті виготовлення неавтоклавних газобетонів. Зокрема, застосування в'яжучих низької водопотреби а також тонкомелених багатокомпонентних в'яжучих (TMB) в технології неавтоклавного газобетону, як вказують автори [2], створює передумови для економії цементу. Порівняльний аналіз результатів досліджень дозволяє стверджувати, що фізико-механічні показники газобетону бетону на BHB і TMB практично не поступаються властивостям матеріалу на основі портландцементу [3].

Використання даного способу для пінобетонів, що готується за традиційною двохстадійною схемою, розглянуто в [4, 5]. Однак автори пропонують піддавати попередній механічній активації лише сам цемент, тим самим впроваджуючи технологію виробництва нізвавтоклавного пінобетону традиційним методом з використанням цементу низької водопотреби.

**Таким чином, питання розробки** спеціальних в'яжучих і технології виробництва неавтоклавних пінобетонів на їх основі є актуальним у плані пошуку шляхів підвищення якості і технологічності виробництва зазначеного матеріалу.

Метою наших досліджень було встановлення можливості одержання неавтоклавного пінобетону з використанням тонкомелених в'яжучих (аналогів BHB).

Використання TMB створює передумови для забезпечення високої гомогенності пінобетонної суміші, а також підвищення активності компонентів в'яжучого внаслідок механоактивації.

**В дослідженнях використовували** портландцемент М500 II типу Здолбунівського цементного заводу; пісок кварцовий  $M_k=1,60$ ; доменний гранульований шлак Криворізького металургійного комбінату; піноутворювач ПО-6К (ПАР – представник алкілароматичних сульфокислот), гіперпластифікатор поліакрилатного типу Dynamon SP3. Останній компонент є відомим нині пластифікатором, що з успіхом використовуються в якості високоефективої водоредукуючої добавки для бетонних сумішей. Нами раніше також показано [6], що поліакрилатні гіперпластифікатори спільно з активними мінеральними добавками, зокрема шлаками та золами дозволяють одержувати конструктивно-теплоізоляційні пінобетони з покращеними характеристиками.

З метою порівняння поряд з добавкою Dynamon SP3 була вивчена дія інших поширених пластифікаторів щодо можливості їх використання в пінобетонних сумішах. Серед них такі відомі пластифікатори як С-3, ЛСТ, релаксол, К-5 (комплексний пластифікатор – прискорювач твердиння), Melment F10 (універсальний суперпластифікатор "SKW Polymers"), Sikament 400/30 (суперпластифікатор компанії Sika), гіперпластифікатори Melflux 2651F і 1641F.

Для визначення з ряду добавок-пластифікаторів найефективнішої, було проведено ряд прямих дослідів. Результати наведені в табл. 1. Склад пінобетонної суміші підбирається з розрахунку одержання пінобетону марки Д500. Концентрація розчину піноутворювача – 2%. Кратність піни – 15...16. Водопотребу суміші контролювали за розпливом її на приладі Суттарда (розплив близько 160 мм). Приготування піни для оцінки показників її стабільності та коефіцієнта стійкості проводилось окремо міксером в лабораторних умовах. Приготування пінобетонної суміші проводили за роздільною двохстадійною схемою.

**Аналіз даних табл.1** показує, що з використанням досліджуваних матеріалів більшість пластифікаторів негативно впливають не лише на якість пінобетону, а й на процес його приготування:

- Пластифікатори К-5, Релаксол, Melment затруднюють процес утворення піни з розчину піноутворювача, а при додаванні їх у приготовлену піну, структура останньої досить швидко руйнується.
- Пластифікатор Sika не руйнує структури піни, але не забезпечує стійкості пінобетонної суміші, в результаті вона руйнується за короткий проміжок часу.
- Пластифікатори С-3, ЛСТ дозволяють зменшити водоцементне відношення, забезпечити стійкість пінобетонної суміші (частково), але при цьому вироби мають не рівномірну рихлу крупнопористу структуру і невисоку міцність.

Таблиця 1

Оцінка впливу ряду пластифікуючих добавок на якісні характеристики пінобетону

Вид пластифікатора	Вміст добавки, % від Ц	Стабільність піни, хв	Коефіцієнт стійкості пін в розчині (макс. значення)	Стійкість пінобетонної суміші*	Макро-структура пінобетону	В/Ц	Міцність при стиску у віці 28 діб, МПа	
Без добавки	—	45...50	0,9	Стійка	Дрібнопориста, не чітка	0,62...0,66	0,4...0,8	
ЛСТ	0,4...1,2	10...20	0,65	— // —	Рихла, крупнопориста	0,56...0,6	0,5...1,0	
C-3	0,3...1,0	25...30	0,8	Частково	— // —	0,50...0,53	0...0,8	
K-5	0,5...1,5			Піна руйнується				
Релаксол	0,5...1,0			— // —				
Melment	0,2...1,0			— // —				
Sika	0,5...1,5	15...25	0,7	Нестійка	—	—	—	
Melflux 1641	0,1...1,0	45...50	0,92	Стійка в межах до 0,6%	Дрібно-та середньопориста, чітко виражена	0,46...0,53	1,7...2,2	
Melflux 2651	0,1...1,0	45...50	0,95	— // —	— // —	0,45...0,50	1,8...2,5	
Dynamon SP3	0,1...1,0	40...60	0,95	Стійка в межах до 1%	Дрібнопориста, чітко виражена	0,40...0,48	2,0...2,7	

\* Стійкість пінобетонної суміші оцінювалась здатністю її зберігати свій початковий об'єм у формі до моменту початку тужавлення цементу.

Серед усіх досліджених пластифікуючих добавок найкраще показали себе гіперпластифікатори типу Melflux а також Dynamon SP3. Їх застосування дозволяє отримувати достатньо стабільну піну (до 60 хв.) а коефіцієнт стійкості в розчині досягає 0,95. Як відомо [7], одержувану технічну піну можна вважати задовільною, якщо значення її коефіцієнта стійкості (C) знаходиться в межах від 0,8 до 0,85, а якісної при  $C = 0,95$ . Отже, використання зазначених добавок навіть дещо покращує коефіцієнт стійкості у порівнянні із звичайною піною.

Варто також відзначити, що із використанням добавок Melflux та Dynamon стає можливим досягнення достатньо стійкої структури

пінобетонної суміші, а також значного зменшення водоцементного відношення, що як наслідок приводить до ущільнення міжпорових перегородок і підвищення міцності пінобетону в цілому. Гіперпластифікатор Dynamon SP3 незначно переважає за ступенем впливу модифікацію Melflux 2651F.

На другому етапі досліджень готували пінобетонні суміші на основі ТМВ з використанням пластифікатора Dynamon SP3.

Тонкомелене в'яжуче виготовляли шляхом спільного помелу портландцементу, шлаку та кварцового піску в кульовому млині, де в якості мелючих тіл було використано цильпебс. Тривалість помелу 3 год,

Тонкомелене в'яжуче виготовляли у співвідношенні 2:1:1 за масою – відповідно портландцемент, шлак та пісок. Залишок на ситі №008 після помелу для отриманого в'яжучого становило 2,1%.

Склад пінобетонної суміші підбирається з розрахунку одержання пінобетону марки D800. Концентрація розчину піноутворювача – 2%. Кратність піни – 15...16. Водопотребу суміші контролювали за розливом її на приладі Суттарда (розлив близько 160 мм). Приготування пінобетонної суміші проводили за роздільною двохстадійною схемою з використанням турбулентного лабораторного міксера.

Для пінобетонної суміші визначали водов'яжуче та водотверде відношення, яке забезпечує необхідну рухомість. З отриманих сумішей виготовляли зразки-куби з ребром 100 мм, які тверднули у повітряно-сухих 28 діб. Основні експериментальні результати досліджень пінобетонів на основі ТМВ в порівнянні зі складами на звичайному портландцементі наведені в табл. 2.

Таблиця 2  
Експериментальні результати досліджень пінобетонів на основі ТМВ

№ п/п	Витрати компонентів, кг/м <sup>3</sup>				Водопотреба суміші (загальна), л	Міцність при стиску у віці 28 діб, МПа	В/Вж <sup>1</sup>
	цемент	шлак	пісок	ТМВ			
1	400	–	340	–	210	1,69	0,53
2	400	200	140	–	225	2,53	0,56
3	350	175	222,5	–	214	2,26	0,61
4	300	150	305	–	207	1,87	0,69
5	–	–	470	300	190	2,28	0,63
6	–	–	360	400	198	2,93	0,50
7	–	–	250	500	208	3,22	0,42

Примітки: 1. Під водо-в'яжучим відношенням розуміється в т.1-4 водо-цементне відношення, в т.5-7 – відношення води до ТМВ. 2. Витрати пластифікатора в усіх точках складали 0,75% від витрати в'яжучого. 3. В т.2-4 шлак вводився в меленому вигляді (помел аналогічний до помелу компонентів ТМВ).

Вихід пінобетонної суміші в цілому відповідав запланованому обсягу, що забезпечувало коливання густини пінобетону в межах 5...7% від заданого значення (800 кг/м<sup>3</sup>).

**Аналізуючи наведені дані**, можна відзначити, що використання ТМВ для приготування пінобетону є доцільним, що обґрунтovується достатньо високими значеннями міцності і візуально якісною пористою структурою. Звертає на себе увагу, що міцність пінобетону в т.7 (3,22 МПа, фактична витрата цементу 250 кг/м<sup>3</sup>) суттєво більша ніж міцність зразків в т.1-2 при витраті цементу 400 кг/м<sup>3</sup>. Також спостерігається чітка кореляція між зміною водо-в'яжучого відношення і міцністю при стиску (т.5-7). Зростання вмісту ТМВ, тобто більш дисперсної частини пінобетонної суміші приводить в результаті до зменшення водо-в'яжучого відношення, що безумовно пояснюється впливом пластифікатора.

З метою подальшого уточнення впливу витрати ТМВ на міцність пінобетону нами проведено планований експеримент згідно двофакторного плану експерименту другого порядку (типу B<sub>2</sub>).

В якості факторів планування виступали: витрата ТМВ ( $X_1 = 500 \pm 200$  кг/м<sup>3</sup>); і витрата добавки-пластифікатора, % від ТМВ, ( $X_3 = 0,375 \pm 0,375\%$ ). Розрахунок складу пінобетону а також технологія та особливості приготування пінобетонної суміші відповідали попереднім дослідженням. Нижче наведена математична модель міцності пінобетону при стиску у віці 28 сут, МПа при використанні ТМВ:

$$R_{cm} = 3,03 + 0,90 \cdot x_1 + 0,49 \cdot x_2 - 0,30 \cdot x_1^2 + 0,02 \cdot x_2^2 + 0,24 \cdot x_1 x_2.$$

Графічні залежності, побудовані по зазначенім моделями представлени на рис. 1.

Аналіз математичної моделі та графічних залежностей (рис. 1) дозволяє зробити висновок про можливості істотного підвищення міцності пінобетону за рахунок введення в пінобетонну суміш ТМВ і гіперпластифікатора Dupamon SP3. Вплив обох факторів є позитивним, причому вплив витрати ТМВ майже в 2 рази перевищує вплив витрати пластифікатора. Характерним є наявність достатньо великого коефіцієнта взаємодії факторів, що свідчить про посилення впливу ТМВ при зростанні витрати пластифікатора. Максимальне значення міцності при знаходженні факторів на верхніх рівнях сягає майже 4,5 МПа, що з великим запасом перевериває мінімальний рівень міцності передбачений стандартом [8] для пінобетону марки D800.

Слід зазначити, що порова структура зразків з більшою міцністю а, отже, і з більшими витратами ТМВ відрізнялася високою однорідністю, більшою геометричною упорядкованістю, що має безпосередній вплив на структурну міцність.

Покращені показники пінобетонів на основі ТМВ можна пояснити поліпшенням їх структурних характеристик. Відомо, що цементний камінь і бетони з використанням як ВНВ так і ТМВ мають відносно низьку пористість, у них практично відсутні великі капілярні пори. Дані закономірності підтверджена також нами при розгляді пористої структури отриманих зразків пінобетону.

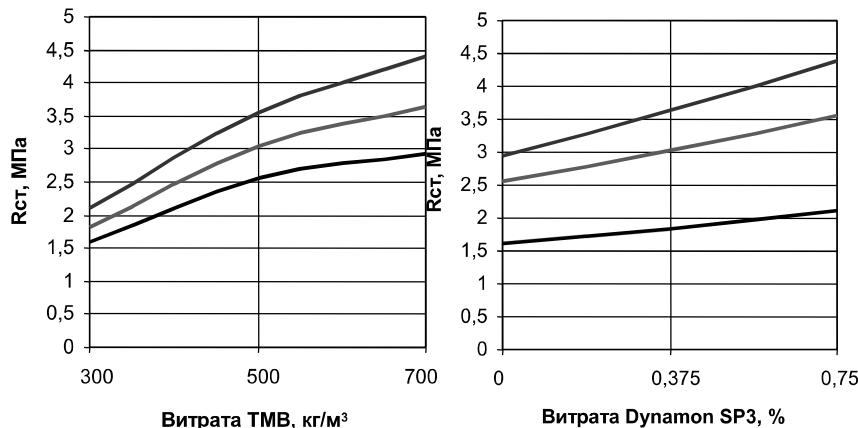


Рис. 1 – Залежність міцності пінобетону від вмісту ТМВ та витрати суперпластифікатора Dynamon SP3

Варто також відзначити, що в результаті механоактивації компонентів ТМВ, виникає можливість проявлення або суттєвого підвищення їх гідролічної активності.

**Економічна доцільність** використання шлаковмісних ТМВ у виробництві неавтоклавного пінобетону не викликає сумнівів. Виготовлення в'яжучого включає лише одну додаткову операцію – тонкий помол, максимальна енергоємність якого не перевищує 50кВт·год/т в'яжучого і може суттєво зменшитись при використанні сучасних типів млинів - вібраційних, валкових, струменевих. Якщо розглянути результати ізопарметричного аналізу міцності залежно від факторів впливу (рис. 2), то можна зробити висновок, що досягнення мінімальних значень міцності, передбачених стандартом, можливо вже при витратах ТМВ близько 400 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ). Враховуючи, що фактичний вміст портландцементу в ТМВ в цьому випадку складатиме 200  $\text{kg}/\text{m}^3$  (а якщо мова йде про клінкер – то й того менше), то можна говорити про суттєву економію найбільш вартісного компоненту пінобетону, а отримане в'яжуче назвати малоклінкерним.

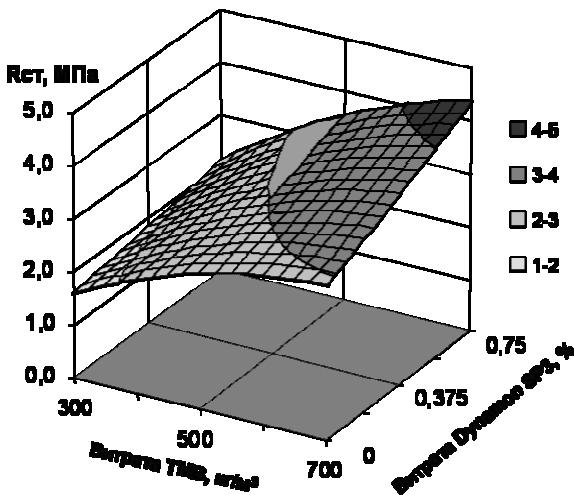


Рис. 2. Ізопараметричний аналіз міцності при стиску

**Підсумовуючи результати досліджень** можна відзначити, що використання малоклінкерних шлакомісних тонкомелених в'яжучих дозволяє одержувати неавтоклавний пінобетон із середньою густинорою 800 кг/м<sup>3</sup> при міцності до 4,5 МПа. Подальше дослідження передбачено спрямувати на детальніше вивчення впливу факторів складу та технології приготування ТМВ на властивості пінобетону а також розширення сировинної бази для їх одержання.

1. Дворкін Л.Й. та ін. Золовмісні цементи низької водопотреби // Ресурсоекономічні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Збірник наукових праць. – Рівне, 2012. Вип. 23.- С. 42-48. 2. Крохін А.М. Физико-технические свойства и технология ячеистобетонных изделий на основе ВНВ и ТМВ // Бетон и железобетон. - 1993. - №12. - С.7-8. 3. К проблеме снижения энергоёмкости ВНВ (Лесовик В.С., Бурякова Ю.А.) // Наука и образование как фактор оптимизации среди жизнедеятельности: Материалы Международной научно-практической конференции-семинара. - Волгоград: ВГАСУ, 2004. - С.65-68. 4. Черных В.Т., Удодов С.А., Шестакова Е.В. Проблемы производства и эксплуатации неавтоклавного пенобетона "Ячеистые бетоны в строительстве. - СПб.: ООО «Строй-Бетон», 2008. - С. 198-203. 5. Юдович Б.Э., Зубсхин С.А. Субмікроクリсталлический пенобетон: новое в основах технологии " Цемент и его применение, 2009, №1. - С. 81-85. 6. Дворкин Л.И., Бордюженко О.М. Эффективные неавтоклавные шлакосодержащие пенобетоны / Технологии бетонов. – 2010, №5-6, С. 68-71. 7. Большаков В.И., Мартыненко В.А. Необходимые свойства пенообразователей для производства пенобетона // Вопросы химии и химической технологии, №1, 2001. – С.25-30. 8. ДСТУ Б В.2.7-137:2008. Будівельні матеріали. Блоки з нідрюватого бетону стінові дрібні. Технічні умови. – К.: Мінрегіонбуд України, 2008. – 15 с.