

## ЗАХИСТ ОБТ ВІД ЗАСОБІВ ВИЯВЛЕННЯ ТА УРАЖЕННЯ

УДК: 691.545

І.І. Ніконець, М.О. Івасюк, І.М. Мартинюк, О.М. Стаднічук

*Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів*

### ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕВАГ БЕЛІТОВОГО ПОРТЛАНДЦЕМЕНТУ ДЛЯ БЕТОНІВ, НЕОБХІДНИХ ДЛЯ СУЧАСНИХ НАЗЕМНИХ І ПІДЗЕМНИХ ВІЙСЬКОВИХ СПОРУД

*Досліджено фізико-механічні властивості чотирьох видів цементу і основних клінкерних мінералів  $C_3S$  і  $C_2S$ : алітового № 1 ( $C_3S$  – 60,82%,  $C_2S$  – 14,73%); нормального № 2 ( $C_3S$  – 40,06%,  $C_2S$  – 32,58%); білітового № 3 ( $C_3S$  – 24,59%,  $C_2S$  – 48,25%) та білітового № 4 ( $C_3S$  – 9,2%,  $C_2S$  – 63,18%). Встановлено, що міцність цементу у першій терміні твердіння визначається вмістом  $C_3S$ , який є клінкерним мінералом, що швидко твердіє. Виявлено, що вплив мінералогічного складу портландцементу на його міцність є визначальним до шестимісячного терміну твердіння. Після шести місяців і до року межа міцності майже не змінюється, а впродовж 10 років цементу, що мають високий вміст  $C_2S$ , продовжують набирати міцність, тоді як цементу з більшим вмістом  $C_3S$  її втрачають.*

**Ключові слова:** клінкерні мінерали, білітовий цемент, фізико-механічні дослідження, міцність цементу.

#### Постановка проблеми

Події останніх років вчать нас адекватно відповідати на виклики, вміти захистити у будь-який час нашу країну, мати надійно укріплені кордони. Для виконання цих задач необхідно будувати прикордонні спорудження, мости і дороги із сучасних матеріалів з високим ступенем надійності та довговічності.

У сучасних умовах забезпечити живучість важливих об'єктів за наявності безпосередньої загрози з боку диверсійно-розвідувальних сил, незаконних збройних формувань та терористичних груп неможливо без інженерного забезпечення, одним із основних завдань якого є фортифікаційне обладнання позицій підрозділів охорони та оборони об'єктів протидиверсійного захисту. Фортифікаційне обладнання підвищує ефективність застосування зброї, захист особового складу сил охорони об'єктів від засобів ураження противника та є неодмінною умовою виконання ними поставлених завдань щодо забезпечення живучості об'єктів, що охороняються.

У зв'язку з широкомасштабним розвитком засобів ураження, особливо тих, що розробляються на нових фізичних принципах, гостро постає проблема надійного захисту та забезпечення живучості особового складу. Саме тому розробка нових фортифікаційних споруд, які можуть забезпечувати захист від усіх засобів ураження, виявлення нових способів їх зведення в умовах обмеженого бюджету

часу залишаються сьогодні головними завданнями фортифікації.

У сучасному будівництві все більшого поширення набувають високоякісні бетони, які характеризуються високою міцністю (80–120 МПа на стиск, 10–30 МПа на розтяг), підвищеними щільністю, водонепроникністю, морозо- та корозійною стійкістю, здатністю до самоущільнення. Їх використовують, в першу чергу, при зведенні унікальних споруд, таких як великопрогонові мости, бурові платформи чи резервуари для зберігання рідин і газів під тиском. Крім того, високоміцні бетони доцільно застосовувати для зведення будівель і конструкцій як монолітних, так і збірних. У військах використовують довготривалі споруди для ведення вогню з кулемета із стандартних залізо-бетонних плит. У зоні проведення Анти-терористичної операції такі довготривалі споруди, як правило, облаштовували на взводних опорних пунктах та блокпостах.

Підвищення міцності бетону у конструкціях сприяє зменшенню розмірів їхнього поперечного перерізу та витрати арматури, що позитивно позначається на масі та собівартості споруд, зменшує навантаження від неї на інші елементи.

Однак підвищений вміст клінкеру у високоміцних бетонах суттєво збільшує паливо- та енергомісткість портландцементу і, відповідно, бетону на його основі. Зменшити витрату цементу можна при підвищенні його активності, однак сьогодні цементна промисловість певною мірою вичерпала традиційні шляхи для цього. З останньої

редакції ДСТУ Б В.2.7-46 навіть виключені марки вище М500. Хоча в ДСТУ Б EN 197-1:2008 передбачений клас 52,5 (аналог марки М600), проте ні в Україні, ні в Європі він масово не випускається [1, 2]. Високі будівельно-технічні властивості сучасного бетону забезпечуються за рахунок суттєвого ускладнення та здороження технології його виготовлення, зокрема шляхом введення високоактивних мінеральних (мікрокремнезем) та хімічних (гіперпластифікатори) добавок, застосуванням високоякісних заповнювачів із заданою гранулометриєю.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Отримання високофункціональних бетонів досягається виконанням багатьох вимог, що впливають із фізичних основ структуроутворення бетону: використання високоміцних цементів та заповнювачів, максимально низьке водоцементне співвідношення, висока максимально допустима витрата цементу, застосування суперпластифікаторів нової генерації і комплексних добавок, що сприяють ущільненню структури бетону, особливо ретельне перемішування та ущільнення бетонної суміші, створення найсприятливіших умов тверднення бетону.

Основним видом цементу, який використовують для виготовлення бетонів, є алітовий портландцемент з високим значенням  $KH=0,90\dots 0,92$  із вмістом головного клінкерного мінералу  $C_3S$  понад 60% (за масою), що призводить до істотної витрати палива та визначає високу енергоємність процесу клінкероутворення (3500–7500 МДж/т). У плані зниження енергоємності та зменшення викидів  $CO_2$ ,  $SO_2$ ,  $NO_x$ , а також підвищення корозійної стійкості цементного каменю істотні переваги перед алітовими мають білітові цементи ( $KH \leq 0,81$ ), але низька гідравлічна активність у початкові терміни тверднення обмежує їх широке використання. До того ж, за даними Й. Штарка, Л. Копеланда та ін. [3–6], енерговитрати під час виробництва білітових цементів є значно меншими. Тому значний практичний інтерес становить розроблення таких малоенергомістких в'язучих сумішей, які зберігають темпи тверднення алітових портландцементів і поєднують позитивні властивості білітових цементів [3–8].

Дослідженнями В.І. Гоца, Л.Й. Дворкіна, П.В. Кривенка, Р.Ф. Рунової, Л.Г. Шпинової та ін. показано, що задачі управління властивостями будівельних розчинів можна вирішувати за рахунок регулювання фізико-хімічних процесів у цементуючій матриці [9–13].

До фізико-механічних методів випробувань в'язучих речовин належать методи визначення питомої та об'ємної маси, пластичності, текучості, термінів тужавіння, рівномірності змін об'єму,

тонини помелу, межі міцності на стиск, розтяг і згин, корозійної стійкості. Ці найважливіші методи розроблені та внесені у відповідні стандарти [1, 2].

При вивченні властивостей клінкерних мінералів  $C_3S$  і  $C_2S$  і цементу на їх основі науковці приділяють основну увагу тепловиділенню, корозійній стійкості та морозостійкості [5–7].

### Формулювання мети статті (постановка завдання)

Для виробництва розчинів і бетонів, що можуть використовуватись для будівництва військових фортифікаційних споруд, нами пропонується білітовий портландцемент, який за попередніми даними має значну водонепроникність і морозостійкість, низьку екзотермію, високу антикорозійну стійкість, зростаючу з віком міцність.

Метою статті є порівняння фізико-механічних властивостей алітового і білітового портландцементів, визначення впливу вмісту клінкерних мінералів на межу міцності в різні терміни твердіння. Роль ранніх стадій твердіння цементів у забезпеченні відповідних властивостей бетонів різного призначення велика, оскільки з найбільшою швидкістю та інтенсивністю відбуваються основні реакції гідратації клінкерних мінералів, формується структура цементного каменю і т.д.

### Виклад основного матеріалу

Портландцементи є багатокомпонентними системами, але долю їх основних характеристик вирішують: трикальцієвий силікат кальцію ( $C_3S$ ), аліт і двокальцієвий силікат кальцію ( $C_2S$ ), біліт. За пропозицією С. Огорокова [5], білітовими вважаються цементы, які мають у своєму складі понад 37,5% біліту.

Для дослідження випробовувались фізико-механічні можливості основних клінкерних матеріалів – трикальцієвого силікату ( $C_3S$ ) і двокальцієвого силікату ( $C_2S$ ) та чотирьох видів цементів з різним вмістом двокальцієвого силікату (табл. 1).

Таблиця 1

Характеристика зразків

Номер зразка	Назва зразка	Вміст клінкерного мінералу, %	
		$C_3S$	$C_2S$
№ 1	алітовий	60,82	14,73
№ 2	нормальний	40,06	32,58
№ 3	білітовий	24,59	48,25
№ 4	білітовий	9,2	63,18

Усі цементы пройшли стандартні випробування [13]. Визначали нормальну густину цементного тіста, терміни тужавіння, питому поверхню, об'ємну й питому масу, межу міцності портландцементів у пластичних взірцях. Дослідження проводили на

зразках-балочках розміром 4×4×16 см, виготовлених з цементно-піщаної суміші складу 1:3 (за масою) і вода-цемент – 0,4, через 28 діб твердіння (одна доба твердіння у формах у вологому повітрі та 27 діб – у воді при температурі +20 °С) [1, 2]. Зразки-балочки спочатку випробовують на вигин, а потім їх половинки – на стиск. Результати випробувань наведено в табл. 2.

Таблиця 2

## Стандартні фізико-механічні випробування цементу

Фізико-механічні властивості		Зразок			
		№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
Нормальна густина цементу, %		27,5	26,3	26,3	24,3
Терміни тужавіння, хв	початок	150	150	170	190
	кінець	250	275	310	445
Питома поверхня, см <sup>2</sup> /г		2950	3100	3500	3600
Питома маса, г/см <sup>3</sup>		3,02	3,25	-	-
Об'ємна маса, кг/л		1,4	1,21	-	-
Межа міцності пластичних взірців, МПа					
стиск	3 доби	15,6	6,5	3,1	2,0
	7 діб	32,0	20,5	10,6	8,1
	28 діб	35,6	25,0	20,0	10,4
згин	3 доби	3,2	0,8	0,5	0,5
	7 діб	4,5	2,2	1,0	1,0
	28 діб	4,5	3,0	2,5	1,8

Як бачимо, зі збільшенням вмісту β-C<sub>2</sub>S у цементі зростання міцності різко гальмується. Причому це гальмування великою мірою проявляється у перші строки твердіння і навіть протягом 28 діб.

У добовому віці міцність цементу № 2 у 2,4 раза нижча від міцності цементу № 1, цементу № 3 – у 5, а цементу № 4 – у 5,5 раза. У 28-добовому віці міцність цементу № 2 менша від міцності цементу № 1 тільки в 1,4 раза, цементу № 3 – в 1,7 і цементу № 4 – у 3,4 раза.

Для клінкерних мінералів визначалась межа міцності на взірцях – кубах розміром 1,4×1,4×1,4 см. Куби формували із цементного тіста нормальної густини. Для трикальцієвого силікату (C<sub>3</sub>S) кількість води в тісті становила 42%, а для β-двокальцієвого (C<sub>2</sub>S) – 29%. Кубики після формування зберігали у вологому середовищі за кімнатної температури (в ексікаторі над водою). Випробування проводили через 1, 7, 28 діб, 3, 6 і 12 місяців. Крім того, порівнювали одержані результати із зразками, що витримувались до 20 років у відповідних умовах, та з літературними даними. На кожний термін випробовували по шість кубів. Найбільші та найменші значення відкидали, і результат приймали як середнє з чотирьох значень. Із залишками з випробуваних кубиків проводили подальші дослідження. Результати випробувань наведені у таблицях 3 і 4.

З табл. 3 видно, що C<sub>3</sub>S найінтенсивніше нарощує міцність у перші терміни твердіння, а далі зростання його міцності стабілізується. Так у добовому віці міцність трикальцієвого силікату складає 14,0 МПа, а до семи діб міцність збільшується у 2,5 раза. У пізніші строки не спостерігається такого різкого нарощування міцності. Міцність збільшується повільно і до одного року сягає 86,0 МПа.

Таблиця 3

## Межа міцності на стиск клінкерних мінералів, які тверділи у вологих умовах (кубики 1,41×1,41×1,41 см з тіста) до одного року

Назва клінкерного мінералу	Межа міцності на стиск, МПа, через					
	1 добу	7 діб	28 діб	3 міс.	6 міс.	1 рік
Трикальцієвий силікат	14,0	36,8	46,1	73,0	79,4	86,0
β-двокальцієвий силікат	-	3,5	14,0	57,0	80,0	94,0
У відсотках до міцності однорічних взірців						
Трикальцієвий силікат	16,3	43,0	54,0	84,8	92,4	100
β-двокальцієвий силікат	-	3,7	14,9	68,2	85,3	100

β-двокальцієвий силікат відомий як повільно-тверднучий мінерал, що і підтверджують результати досліджень: кубики з C<sub>2</sub>S до семидобового віку сягають 3,7% річної міцності, тобто всього лише 3,5 МПа. До 28-ми добового віку міцність їх зростає в чотири рази. Однак вона все ж залишається в три рази меншою порівняно з міцністю C<sub>3</sub>S.

Таблиця 4

Межа міцності на стиск β-C<sub>2</sub>S і C<sub>3</sub>S, твердіючих у вологих умовах до 20 років (куби 1,4×1,4×1,4 см)

Назва клінкерного мінералу	Межа міцності на стиск, МПа		
	3 роки	5 років	10 років
C <sub>3</sub> S	85,6	80,0	66,0
β-C <sub>2</sub> S	92,0	93,0	95,0

До трьох місяців міцність взірців β-двокальцієвого силікату досягає міцності взірців трикальцієвого силікату. А в річному віці міцність взірців з β-C<sub>2</sub>S дорівнює 94,0 МПа, а із C<sub>3</sub>S – лише 86,0 МПа. До десяти років зафіксовано значний спад міцності взірців C<sub>3</sub>S, у той час як взірці C<sub>2</sub>S продовжують набирати міцність (табл. 4).

Для дослідження механічної міцності портландцементів виготовляли куби 2×2×2 см з цементного тіста 1:0 і балочки 4×4×16 см з цементного розчину 1:3.

Умови зберігання і випробування міцності на стиск портландцементів на взірцях-кубах розміром 2×2×2 см відображено в табл. 5. За результатами

досліджень можна зробити висновок, що первинне зростання міцності повністю залежить від вмісту  $C_3S$  у цементі.

Таблиця 5

**Межа міцності на стиск цементів, твердіючих у вологих умовах (кубики 2×2×2 см з тіста)**

Назва цементу	Межа міцності на стиск, МПа, через						
	1 добу	3 доби	7 днів	28 днів	3 міс.	6 міс.	1 рік
№ 1	35,0	60,0	85,0	91,0	97,5	94,0	97,0
№ 2	20,0	40,0	65,0	85,0	90,0	95,0	98,0
№ 3	15,0	30,0	43,6	76,0	81,3	82,0	93,4
№ 4	10,4	10,6	10,8	33,2	71,2	80,0	91,0
У відсотках до міцності на стиск алітового цементу № 1							
№ 1	100	100	100	100	100	100	100
№ 2	57,1	67,0	76,4	93,4	92,3	101	101
№ 3	43,0	50,0	51,2	83,4	85,4	87,3	96,5
№ 4	30,0	17,5	12,7	36,5	73,0	85,0	93,8

Так міцність портландцементу № 1, в якому вміст  $C_3S$  є найбільшим, у перші терміни твердіння складає 35,0 МПа, тоді як міцність зразка № 4 (з найменшим вмістом  $C_3S$ ) – усього лише 10,4 МПа.

До семи днів спостерігається інтенсивне зростання міцності портландцементу № 1. Міцність взірців цього портландцементу підвищується у 2,4 раза порівняно з однодобовими взірцями.

Міцність портландцементу № 2 до семи-добового віку збільшується у 3,2 раза, портландцементу № 3 – у 3 рази, а портландцементу № 4 – практично не змінюється. Незважаючи на абсолютне збільшення міцності цементів № 2, 3, 4 відносна міцність їх відстає. Так міцність портландцементу № 2 у семидобовому віці складає 76,4% від міцності зразка № 1, № 3 – 51,2%, а зразок № 4 – всього лише 12,7%.

До 28-ти добового віку зростання міцності портландцементу № 1 дещо сповільнюється. Взірці портландцементу № 1 збільшують свою міцність в 1,07 раза порівняно із взірцями 7-добового віку.

Міцність 28-ми добових взірців портландцементів № 2, № 3 і № 4 за абсолютною величиною залишається меншою від міцності портландцементу № 1. Однак порівняно із взірцями 7-добового віку міцність збільшилась у 1,3 раза у взірців портландцементу № 2, в 1,7 раза – портландцементу № 3 і в 3 рази – портландцементу № 4.

До трьох місяців очевидна інтенсивність збільшення міцності портландцементів № 2, 3 і 4. Якщо міцність портландцементу № 1 збільшилась у 2,7 раза порівняно з однодобовими взірцями, то міцність портландцементу № 2 зросла в 4,5 раза, цементу № 3 – у 5,4 раза, цементу № 4 – у 6,85 раза. Проте лише у віці шести місяців взірці портландцементів № 2, 3 і 4 починають наздоганяти за міцністю зразок № 1. До року міцність усіх досліджуваних зразків цементу вирівнюється і стає приблизно однаковою.

Балочки розміром 4×4×16 см зберігали і випробовували відповідно до технічних умов. Упродовж перших днів після формування балочки зберігали у формах у ванні з гідравлічним затвором. Після звільнення від форм балочки занурювали до ванни, наповненої водою, де зберігали в горизонтальному положенні до випробувань на згин і на стиск. Для кожного випробування готували три взірці. Після виймання з води, не пізніше ніж через 30 хв, випробовували зразки-балочки на вигин (згин), а отримані при цьому шість половинок одразу випробовували на стиск. Середня швидкість наростання навантаження при випробуванні повинна бути  $2,0 \pm 0,5$  МПа/с. Випробування проводили через 1, 3, 7, 28 днів, 3, 6 і 12 місяців. Межу міцності на згин визначали як середнє арифметичне від випробувань трьох взірців. Середнє значення межі міцності на стиск дослідного портландцементу розраховували як середнє арифметичне чотирьох найбільших значень із шести випробуваних взірців. Результати досліджень наведено в таблиці 6.

Таблиця 6

**Межа міцності на стиск та згин цементів у пластичних взірцях (балочки 4×4×16 см)**

Назва цементу	Межа міцності, через						
	1 добу	3 доби	7 днів	28 днів	3 міс.	6 міс.	1 рік
на стиск, МПа							
№ 1	6,8	17,6	32,0	35,6	38,1	39,8	46,1
№ 2	-	6,5	20,5	25,0	35,0	42,0	45,0
№ 3	-	3,1	10,6	20,0	28,0	37,1	52,1
№ 4	-	2,8	8,14	10,4	22,0	34,6	43,3
на згин, МПа							
№ 1	1,5	4,2	4,5	4,5	5,1	5,6	6,8
№ 2	-	0,8	2,2	3,0	4,5	5,0	6,4
№ 3	-	0,54	1,0	2,5	3,2	4,1	5,6
№ 4	-	0,5	1,0	1,8	3,5	3,5	4,8
У відсотках до міцності на стиск та згин алітового цементу № 1							
на стиск, МПа							
№ 1	100	100	100	100	100	100	100
№ 2	-	37,0	64,0	70,2	91,8	105	97,5
№ 3	-	17,6	33,1	56,1	73,4	93,0	113
№ 4	-	16,0	25,0	29,2	57,7	87,0	94,0
на згин, МПа							
№ 1	100	100	100	100	100	100	100
№ 2	-	19,0	50,0	66,6	90,0	90,0	91,0
№ 3	-	11,9	22,2	55,5	62,7	73,2	82,3
№ 4	-	11,9	22,2	40,0	68,6	62,5	70,6

Аналогічні результати було отримано і при механічних випробуваннях на зразках-кубах розміром 2×2×2 см.

З табл. 6 видно, що міцність на стиск балочок зразка № 1 в віці однієї доби становить 6,8 МПа, а через три доби збільшується у 2,6 раза. Для зразків № 2, № 3 та № 4 міцність на стиск у першу добу є незначною. До семидобового віку міцність на стиск усіх видів портландцементів значно

зростає. Однак міцність зразків № 2, № 3 і № 4 за абсолютною величиною відстає від міцності портландцементу № 1. Якщо міцність на стиск балочок зразку № 1 прийняти за 100%, то міцність на стиск балочок портландцементу № 2 складає 64% від міцності портландцементу № 1, міцність цементу № 3 – 33,1%, а цементу № 4 – 2,5%.

Порівнюючи міцність на стиск балочок усіх видів портландцементів тримісячного віку, можна зробити висновок, що міцність на стиск балочок зразка № 1 збільшилась лише на 2,5 МПа (в порівнянні з даними для 28-ми діб), тоді як для балочок зразків № 2 зросла на 10,0 МПа, № 3 – на 8,0 МПа і № 4 – на 11,6 МПа. До шести місяців міцність на стиск балочок портландцементів № 2, № 3 і № 4 інтенсивно збільшується і за своєю абсолютною величиною наближається до міцності портландцементу № 1. До одного року портландцемент № 1 досягає міцності на стиск 46,1 МПа, зразки № 2 – 45,0 МПа, № 3 – 52,1 МПа, а портландцемент № 4 – 43,3 МПа, тобто міцність балочок усіх видів цементів у річному віці вирівнюється.

Міцність балочок зразків № 2, № 3 і № 4 на згин майже не змінюється до 28-ми добового віку, тоді як міцність балочок на згин портландцементу № 1 збільшується у 3 рази порівняно з однодобовими взірцями. У 28-ми добовому віці міцність на згин портландцементу № 2 збільшилась у 4 рази порівняно з міцністю тридобових взірців, портландцементу № 3 – у 5 разів, портландцементу № 4 – у 3,6 рази. До того часу зростання міцності на згин взірців портландцементу № 1 призупиняється і фіксується на значенні 4,5 МПа.

До трьох місяців міцність на згин зразка № 1 збільшується лише на 13,3% порівняно з 28-ми добовими взірцями, міцність на згин зразків № 2 – на 50%, № 3 – на 30%, № 4 – майже на 100%. Однак абсолютна величина міцності на згин взірців цементів № 2, № 3 і № 4 залишається нижчою порівняно з міцністю взірців цементу № 1.

До шести місяців спостерігаємо деяке вирівнювання показників міцності на згин усіх видів портландцементів. До цього віку міцність на згин взірців портландцементу № 2 складає 90% від міцності на згин взірців портландцементу № 1, портландцементу № 3 – 73,2%, а портландцементу № 4 – 62,5%. До року спостерігаємо ще більше вирівнювання міцностей за рахунок більш інтенсивного збільшення міцностей на згин взірців портландцементів № 2, № 3 і № 4.

### Висновки

Отже, одержані фізико-механічні випробування клінкерних мінералів  $C_3S$  і  $\beta-C_2S$ , чотирьох видів портландцементів (алітового, нормального і двох видів білітового) підтвердили, що мінералогічний склад портландцементу впливає на його міцність

лише до шести місяців. Визначальним для міцності (і на згин, і на стиск) у перші три місяці є вміст  $C_3S$ : чим він більший, тим межа міцності є вищою.

Після шести місяців і до року межа міцності майже не змінюється, а впродовж 10 років цемент, що мають високий вміст  $C_2S$ , продовжують набирати міцність, тоді як цемент з більшим вмістом  $C_3S$  її втрачають.

Бетонні будівельні конструкції можуть тривалий час зберігати свої експлуатаційні якості, проте під дією агресивних факторів оточуючого середовища вони поступово змінюють свої фізико-хімічні та структурно-фазові властивості. Військові об'єкти, зокрема наземні і підземні споруди, вимагають не лише міцності та надійності, а й збереження цих властивостей з часом. Тому використання білітових цементів для їх спорудження є перспективним, але потребує детального дослідження на морозостійкість, сульфатостійкість та водостійкість.

### Список літератури

1. ДСТУ Б В.2.7-46-96 Цементи загальнобудівельного призначення. Технічні умови. – Київ: Мінбуд. 1996. – 12 с.
  2. ДСТУ Б EN 197-1:2008 Додатки для бетонів і будівельних розчинів. – Київ: Мінбуд. 2008. – 14 с.
  3. Ніконець І.І. Цемент для розчинів і бетонів в аграрному будівництві / – Львів: Український бестселер, 2014. – 124 с.
  4. Штарк Й. Цемент и известь / Й. Штарк, Б. Вухт Пер. с нем. А. Тулаганова. Под ред. П. Кривенко. – Київ, 2008. – 480 с.
  5. Copeland L.E., Schulz E. J.P.C.A. Res. Der. Labs., 1962, 4 (1), 2.
  6. Формування і генезис мікроструктури цементного каменю // Під ред. Л.Г. Шпинової. – Львів: Вища школа, 1975.
  7. Lerch W. *Vogue R.N.J. Phys. Chem.* 31. 1927. – P. 1627–1646.
  8. Midgley H.G. *Acta Cryst.* – № 5. – 308. – 1952.
  9. Рунова Р.Ф. *Технологія модифікованих будівельних розчинів / Р.Ф. Рунова, Ю.Л. Носовський.* – К.: КНУБіА, 2007. – 256 с.
  10. Гоц В.І. *Бетони і будівельні розчини.* – К.: ТОВ УВПК “ЕксОб”, 2003. – 468 с.
  11. Дворкін Л.Й. *Високоміцні бетони на цементах низької водопотреби з використанням пиловидних відходів промисловості / Л.Й. Дворкін, О.Л. Дворкін, І.В. Чорна, Ю.В. Гарніцький, В.В. Марчук // Будівельні матеріали, виробництва та санітарна техніка.* – Випуск 43. – 2012. – С. 73–80.
  12. Баженев Ю.М. *Технологія бетона.* – М.: Изд-во АВС, 2003. – 500 с.
  13. Окорочков С.Д. *Розрахунок портландцементної сировинної суміші // Будвидат, 1947.*
- Рецензент:** д.т.н., проф. Х.С. Соболев, кафедра автомобільних шляхів Інституту будівництва та інженерії доквілля Національного університету «Львівська політехніка», Львів.

**Физико-механические исследования преимуществ белитового портландцемента для бетона, необходимого для современных наземных и подземных военных сооружений**

И.И. Никонец, М.А. Ивасюк, И.Н. Мартынюк, Е.Н. Стадничук

Исследованы физико-механические свойства четырех видов цемента и основных клинкерных минералов  $C_3S$  и  $C_2S$ : алитового № 1 ( $C_3S$  – 60,82%,  $C_2S$  – 14,73%); нормального № 2 ( $C_3S$  – 40,06%,  $C_2S$  – 32,58%); белитового № 3 ( $C_3S$  – 24,59%,  $C_2S$  – 48,25%) и белитового № 4 ( $C_3S$  – 9,2%,  $C_2S$  – 63,18%). Установлено, что прочность цемента в первые сроки твердения определяется содержанием  $C_3S$ , который является быстротвердеющим клинкерным минералом. Выявлено, что влияние минералогического состава портландцемента на его прочность является определяющим до шестимесячного срока твердения. После шести месяцев до года предел прочности почти не меняется, а в течение 10 лет цементы, имеющие высокое содержание  $C_2S$ , продолжают набирать прочность, тогда как цементы с большим содержанием  $C_3S$  ее теряют.

**Ключевые слова:** клинкерные минералы, белитовый цемент, физико-механические исследования, прочность цемента.

**Physico-mechanical studies of the advantages belite of portland cement for concrete, necessary for modern surface and underground military installations**

I. Nikonets, M. Ivasjuk, I. Martyniuk, O. Stadnichuk

In connection with the development of powerful weapons, especially those that are developed on new physical principles, the acute problem of reliable protection and ensure the survivability of personnel. The development of the new fortifications that can provide protection from various weapons, identify new methods for their construction on a tight time budget are the main objectives of the fortification at the present stage. Concrete structure building can be a long time to maintain its performance, however, under the influence of aggressive environmental factors, they gradually change their physico-chemical and structural-phase properties. Military facilities, including aboveground and underground structures, require not only durability and reliability but also the preservation of these properties with time.

For the production of mortars and concretes that can be used for the construction of military fortifications, we propose belite Portland cement, which according to preliminary data has significant water resistance and frost resistance, low exothermy, high corrosion resistance, increasing with age of strength.

The purpose of this article is to compare physical and mechanical properties alite and belite of Portland cement, determining the influence of the content of clinker minerals on tensile strength at different stages of hardening. The role of the early stages of hardening of cement the properties of concrete for various purposes is large, because with the greatest speed and intensity are the main hydration reactions of clinker minerals, the structure of cement stone.

Studied the physico-mechanical properties of four types of cement and major clinker minerals  $C_3S$  and  $C_2S$ : alite № 1 ( $C_3S$  – 60.82%  $C_2S$  – 14.73%); normal № 2 ( $C_3S$  – 40.06%,  $C_2S$  – 32.58%); belite №3 ( $C_3S$  – 24.59%,  $C_2S$  – 48.25%) and belite № 4 ( $C_3S$  – 9.2%,  $C_2S$  – 63.18%). It is established that the strength of cement in the first period of hardening is determined by the content  $C_3S$ , which is the clinker mineral that quickly hardens. It is revealed that the influence of the mineralogical composition of Portland cement on strength is decisive to a six-month period of hardening. After six months to a year and tensile strength does not change, and within 10 years, the cements having a high content  $C_2S$  continue to gain strength, whereas for cements with a high content of  $C_3S$  – losing her.

Therefore, the use of belite cement for their construction is promising, however, requires detailed studies on the frost resistance, sulfate resistance and water resistance.

**Keywords:** clinker minerals, belite cement, physical-mechanical study, the strength of cement.

УДК 614.842

Т.Я. Глова

Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів

**ВОГНЕСТІЙКІСТЬ СПЕЦІАЛІЗОВАНОЇ ТАРИ ДЛЯ ЗБЕРІГАННЯ БОЄПРИПАСІВ**

Проведено дослідження дерев'яної тари для зберігання боєприпасів з різними ступенями чорноти стінок ящика. Наведено результати зміни густини теплового потоку, який поглинається стінкою в залежності від відстані розташування факела полум'я пожежі, а також від ступеня чорноти стінок тари. Запропонована методика визначення та дослідження величини теплового потоку полум'я пожежі, який поглинається тарою. Встановлено взаємозв'язок інтенсивності теплового потоку від різниці температур полум'я пожежі та стінками тари в залежності від ступенів чорноти покриття стінок дерев'яної тари.

**Ключові слова:** тепловий потік, ступінь чорноти, температура, боєприпаси, дерев'яна тара.