

8. Borisov, Yu. Ya. Intensifikaciya processov sushki v akusticheskom pole. Primenenie ultrazvuka v khimiko-tehnologicheskikh processakh [Text] / Yu. Ya. Borisov. — Izd-vo AN SSSR, 1960. — 211 p.
9. Borisov, Yu. Ya. Ultrazvuk v tekhnike nastoyashhego i budushhego [Text] / Yu. Ya. Borisov, L. O. Makarova. — Izd-vo AN SSSR, 1960. — 152 p.
10. Sazhin, B. S. Obzornaya informaciya [Text] / B. S. Sazhin, E. A. Chuvpilo. — M.: Ser. XM-1, CINTIKhimneftemash, 1975. — 72 p.
11. Sauvageot, F. Juelgues donnels experimentals sur le compartementan cours de la cryogessication des composes volatils de jue fruits-full [Text] / F. Sauvageot, P. Beley, A. Marchand, D. Simatas // Inst. int. froid. — 1969. — Vol. 9. — P. 133–149.
12. Peskin, R. Proc. Heat Transf. and Fluid [Text] / R. Peskin. — Stanford: Mech. Inst., 1960. — 114 p.
13. Zenz, F. Fluidization and Fluid — Particle Systems [Text] / F. Zenz, D. Othmer. — N. Y., 1960. — 278 p.
14. Sazhin, B. S. Apparaty so vstrechnymi zakruchennymi potokami [Text] / B. S. Sazhin // TOKhT. — 1977. — № 4. — P. 633–636.
15. Gebhart, B. Heat Transfer [Text] / B. Gebhart. — Mc. Graw, N. Y., 1970. — 327 p.
16. Sazhin, B. S. Sovremennye metody sushki [Text] / B. S. Sazhin. — M.: Znanie, 1973. — 64 p.
17. Gamayunov, N. I. Oscilliruyushhij rezhim sushki [Text] / N. I. Gamayunov, L. I. Ilchenko // Khim. prom. — 1979. — № 6. — P. 344–348.

АНАЛИЗ СПОСОБОВ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛОМАСООБМЕНА В ПРОЦЕССЕ СУШКИ И ОСОБЕННОСТИ ОБЕЗВОЖИВАНИЯ ТЕРМОЛАБИЛЬНЫХ ОРГАНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

В статье представлен анализ традиционных способов интенсификации процессов тепломасообмена при сушке материалов. Экспериментально доведена перспективность использования способа совмещенных процессов сушки и диспергирования с помощью механического ротора при интенсификации процесса сушки высоковлажных термолабильных материалов.

Ключевые слова: сушка, интенсификация, термолабильный материал, камера, совмещенный процесс, механический ротор.

Ляшенко Андрій Володимирович, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ, Україна, e-mail: A.Lyashenko@ukr.net.

Ляшенко Андрей Владимирович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт технической теплофизики НАН Украины, Киев, Украина.

Lyashenko Andrew, Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine, e-mail: A.Lyashenko@ukr.net

УДК 666.948 : 666.972.112

DOI: 10.15587/2312-8372.2015.47676

**Пісчанська В. В.,
Алексєєнко І. А.**

ОПТИМІЗАЦІЯ ГРАНУЛОМЕТРИЧНОГО СКЛАДУ ПЕРИКЛАЗОВОГО БЕТОНУ

З використанням симлекс-гратчастого методу планування експерименту досліджено вплив гранулометричного складу бетонних сумішей, які містять в якості заповнювача вторинну сировину — подрібнений брак периклазових виробів і спечений периклаз, на показники властивостей периклазового бетону після термічної обробки. Оптимізовано гранулометричний склад периклазового бетону на гідравлічному в'язучому — суміші периклазового і кальцій-алюмінатного цементу, який забезпечує досягнення комплексу заданих показників властивостей бетону.

Ключові слова: *гранулометричний склад, периклазовий бетон, заповнювач, гідравлічне в'язуче, показники властивостей.*

1. Вступ

Сучасна концепція розвитку вогнетривкої галузі спрямована на комплексне вирішення задач щодо раціонального використання сировинних матеріалів, зниження паливно-енергетичних і трудових витрат за умов забезпечення підвищеного експлуатаційного ресурсу вогнетривів у футеровках агрегатів різного функціонального призначення. Ефективним напрямком реалізації означених задач є впровадження технологій виготовлення неформованих матеріалів, зокрема вогнетривких бетонів, які застосовуються для виготовлення монолітних футеровок, блоків, панелей і виробів складної геометричної конфігурації. Серед широкого спектру вогнетривких бетонів найбільш високою вогнетривкістю та стійкістю до хімічної взаємодії з агресивними компонентами середовища (розплавами металів і шлаків, газів) характеризуються магнезійні бетони, що містять понад 85 % MgO і менше 6 % CaO [1–3]. Висока зносостійкість

периклазових бетонів до комплексної дії руйнуючих факторів обумовила їх використання у футеровках теплових агрегатів чорної та кольорової металургії, хімічної та цементної промисловості, а саме, печей з високим вмістом сірчаних газів у лічному просторі, пристроїв призначених для транспортування розплавів металу, форм для лиття титанвміщуючих металів у вакуумі, високотемпературних фільтрів тощо [1, 2, 4, 5].

Для виготовлення периклазових бетонів використовують заповнювачі (спечений периклаз, брак виробів і лом магнезійних вогнетривів) і в'язуче, яке містить периклазовий цемент і хімічні зв'язки та за хіміко-мінеральним складом поділяється на гідратаційні, сульфатно-хлоридні, силікатні, фосфатні та органічні [1–3]. Проблематика застосування бетонів на гідравлічних в'язучих (дисперсійна система «периклазовий цемент — вода») пов'язана з утворенням гідроксиду магнію (бруськиту), що супроводжується розпушенням структури композиційного матеріалу та погіршенням механічної міцності бетону в процесі твердіння і в умовах термічного

нагрівання [1, 6–9]. Для зниження гідравлічної активності периклазового цементу використовують різні види активних до гідратації добавок або комбіноване в'язуче, яке складається з декількох видів цементів, що крім ефекту пасивації зерен цементу забезпечує підвищення механічної міцності бетону при твердінні, а при термічному нагріванні і температурах експлуатації не призводить до зниження вогнетривкості бетону і погіршення його високотемпературних властивостей [10, 11].

Основним завданням щодо створення низькопористих і механічно міцних композиційних матеріалів є отримання щільної упаковки мінеральних складових бетонних мас, що для конкретного способу формування бетону і призначення забезпечується вибором раціонального гранулометричного та речовинного складу бетонних сумішей, який сприяє досягненню необхідних властивостей бетону в умовах твердіння і при високих температурах нагрівання. З точки зору подальшого розвитку технології виготовлення периклазових бетонів на гідравлічних в'язучих та розширення галузей їх застосування, оптимізація гранулометричного складу бетону та співвідношення заповнювача і в'язучого є важливою складовою проектування бетонів з комплексом заданих показників властивостей.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

У фундаментальних роботах Л. Б. Хорошавіна [1, 2], які є основою технології виготовлення магнезійних бетонів, відзначено, що зерновий склад бетонних сумішей практично не залежить від виду заповнювача і цементу і визначається максимальним розміром зерен заповнювача. Так, для звичайних бетонів, що містять 15–35 % цементу з розміром часток менше 0,06 мм і заповнювач з максимальним розміром зерен 10 мм або 5 мм, раціональний зерновий склад бетонних сумішей відповідає вмісту заповнювача фракції (фр.) 10–3 мм і 5–1 мм – 45 % і 55 %, фр. 3–0 мм і 1–0 мм – 25 % і 20 % при кількості цементної складової 30 % і 25 % відповідно. При цьому автор не викладає рекомендацій щодо розподілу вузьких фракцій заповнювача в межах широкого діапазону граничних розмірів зерен заповнювача та не конкретизує метод формування бетону (пресування, трамбування, лиття, вібраційне формування), який для рекомендованих складів є найбільш доцільним. Слід зазначити, що спосіб формування бетонних мас обумовлює введення у суху суміш певної кількості хімічних зв'язок у вигляді водних розчинів рідкого скла, сірчанокислого магнію, металофосфатних зв'язок, лігносульфонатів технічних, з яких найбільш оптимальною з точки зору досягнення зниження гідравлічної активності периклазового цементу, необхідного ущільнення та зміцнення композиту після сушки, збереження сталості об'єму, високої термічної стійкості та механічної міцності при нагріванні є поліфосфат натрію [1, 2, 12]. Так, введення водного розчину поліфосфату натрію у склад бетонної суміші, що містить 10 % гідравлічного в'язучого – глиноземистого цементу, дозволило отримати за методом лиття периклазові бетонні блоки, які характеризувалися високою хімічною стійкістю до дії розплавів кольорових металів, термічною стійкістю (25–30 теплотмін), значеннями граничної міцності при стиску після термообробки при 120 °С і 1300 °С –

15,7 Н/мм² і 20,3 Н/мм² відповідно [5]. Відомості щодо використання в якості гідравлічного в'язучого магнезійних бетонів цементів різної природи надто обмежені, що вірогідно пов'язано з характером фізико-хімічних процесів взаємодії цементів та утворенням при високих температурах (понад 1300 °С) легкоплавких сполук в системі MgO-CaO-Al₂O₃. За результатами досліджень авторів [10] комбінація гідравлічних в'язучих (тонкодисперсний спечений периклаз і кальцій-алюмінатний цемент) за рахунок відмінності кінетики гідратації позитивно впливає на зниження реакційної здатності периклазу до утворення бруситу та структурне зміцнення бетону при твердінні. Але у разі надлишку кальцій-алюмінатного цементу, внаслідок значного підвищення лужності середовища, гідравлічна активність периклазу зростає і зростає кількість новоутвореного бруситу, що супроводжується зниженням механічної міцності бетону [10]. Таким чином, введення у склад периклазового бетону обмеженої кількості кальцій-алюмінатного цементу за умов оптимального гранулометричного складу заповнювача та співвідношення заповнювача і в'язучого може сприяти формуванню в об'ємі конгломерату міцних прошарків в'язучого ефективною товщини, що забезпечить в умовах твердіння і спікання матеріалу формування міцного та щільного композиту.

Для вибору раціонального гранулометричного складу вогнетривких бетонів користуються аналітичними залежностями Фуллера, Андреасена і Болема, які дозволяють визначити співвідношення заповнювача і тонкодисперсного компоненту, вміст вузьких фракцій заповнювача у складі бетонних сумішей та отримати гранично щільну укладку мінеральних часток бетону [13]. Також відомо аналітичне рівняння, використання якого запропоновано для вибору раціонального складу вогнетривких мас для виготовлення безвипалювальних периклазових виробів за методом напіссухого пресування [14]:

$$X_i = \left[\alpha + (1 - \alpha) \cdot \left(\frac{d_i}{D_{\max}} \right)^n \right] \cdot 100, \quad \% \quad (1)$$

де X_i – вміст фракції з розміром зерен менше d_i , %; D_{\max} – максимальний розмір зерна, мм; α – коефіцієнт, що залежить від типу маси і кількості тонко дисперсної складової; n – показник ступеню, що характеризує розподіл вузьких фракцій у складі крупнозернистої суміші і враховує співвідношення крупнозернистої та тонкодисперсної складової у суміші.

Теоретичний і практичний досвід отримання щільних упаковок бетонних мас свідчить про ефективність використання зерен заповнювача сферичної форми [13, 15], але для периклазових бетонів заповнювач у вигляді обструганих зерен сприяє підвищенню термічної стійкості, що є необхідною вимогою до експлуатаційних властивостей бетонів. До ефективних методів оптимізації гранулометричного складу вогнетривких бетонів відносяться методи математичного планування, зокрема симплекс-метод, який дозволяє отримати математичні моделі – рівняння регресії різного ступеню, що описують складну багатofакторну залежність в системі «склад – властивість» та надають кількісну оцінку основних ефектів та ефектів взаємодії факторів [16, 17]. Для визначення раціональних зернових складів композиційних матеріалів,

які забезпечують максимально можливе ущільнення пошків, визначають насипну щільність сухих бетонних сумішей та ступінь їх ущільнення при вібрації, що, для вібраційного способу формування бетонів корелюється з результатами визначення показників властивостей бетонів [18, 19].

Таким чином, визначення закономірностей впливу гранулометричного складу сумішей периклазових бетонів на гідралічному в'язучому на змінення властивостей композитів та вибір області оптимальних зернових складів бетонних сумішей має науковий і практичний інтерес для проектування бетонів з ефективною структурою і комплексом заданих фізико-технічних показників властивостей.

3. Об'єкт, ціль та задачі дослідження

Об'єкт дослідження — периклазовий бетон, що містить в якості заповнювача спеченої периклазу і вторинну сировину — подрібнений брак периклазових виробів та композиційне гідралічне в'язуче у вигляді суміші цементів різної природи.

Мета роботи — оптимізувати гранулометричний склад бетонних сумішей, який забезпечує отримання низькопористого механічно міцного бетону після сушки і високотемпературного випалу.

Для досягнення означеної мети вирішувалися наступні задачі:

- обґрунтувати область варіювання факторного простору шляхом визначення насипної щільності сухих бетонних сумішей з певним співвідношенням вузьких у складі зернистого заповнювача в умовах вібрації;
- з використанням симплекс-градчастого методу планування експерименту дослідити характер змінення показників властивостей бетону та оптимізувати гранулометричний склад композиційних сумішей, що забезпечує збалансовані характеристики механічної міцності і відкритої пористості бетону після сушки і випалу.

4. Характеристика сировинних матеріалів і методів визначення насипної щільності та показників властивостей бетону

Для проведення досліджень використовували спечений периклаз з вмістом MgO 96,7 % (виробництво КНР), подрібнений брак периклазових виробів марки П-96 (ПАТ «Запоріжвогнетрив»), кальцій-алюмінатний цемент «Gorkal-70» з вмістом CaO 28,7 % (Польща).

Дослідні бетонні суміші склалися із зернистої складової (заповнювача) — подрібненого браку периклазових виробів фр. 6–2 мм і периклазу фр. 2–0,063 мм, тонко дисперсної складової (гідралічного в'язучого) — периклазового і кальцій-алюмінатного цементу. Периклазовий цемент (залишок на ситі № 063 — 2,5 %) представляв собою продукт помелу периклазу фр. < 0,5 мм у трубному млині ПАТ «Запоріжвогнетрив». Вміст кальцій-алюмінатного цементу у складі дослідних сумішей складав 6 %. Розрахунок гранулометричних складів бетонних сумішей здійснювали за рівнянням (1).

Для визначення насипної щільності композиційних сумішей застосовували воронку висотою 75 мм, верхнім і нижнім діаметрами 100 мм і 25 мм, яку закріплювали на висоті 100 мм над поверхнею циліндру об'ємом 145 см³. У воронку засипали матеріал, відкривали отвір і заповнювали циліндр протягом 30 секунд при частоті

вібрації 50 Гц [18, 19]. Насипну щільність бетонної суміші розраховували за формулою:

$$\gamma_{\text{нас}} = \frac{m_1 - m_2}{V}, \text{ г/см}^3, \quad (2)$$

де m_1 — маса циліндра з матеріалом, г; m_2 — маса циліндра, г; V — об'єм циліндра, см³.

Для проведення досліджень на симплексі в якості факторів обрано X_1 — вміст браку виробів фр. 6–2 мм, X_2 — вміст периклазу фр. 2–0,063 мм, X_3 — вміст в'язучого; за параметри прийнято показники властивостей термооброблених експериментальних зразків бетону: уявна щільність, відкрита пористість і границя міцності при стиску.

Із дослідних сумішей, які не вміщували хімічних добавок — регуляторів реологічних властивостей бетонних мас, у лабораторній мішалці готували маси з вологістю 8 % за наступним режимом: сухе перемішування заповнювачів — 2 хв. і після додавання тонкодисперсної складової — 4 хв., зволоження дистильованою водою і перемішування маси 4 хв. З отриманих мас формували зразки-куби з розміром ребра 40 мм за методом вібраційного формування в розбірних металевих формах при частоті 50 Гц. Експериментальні зразки після твердіння на повітрі протягом двох діб, сушили при 110 °С протягом 24 год. та випалювали при 1600 °С з витримкою 5 год. відповідно. Показники властивостей бетонних зразків: відкрита пористість (П) і уявну щільність (ρ), границю міцності при стиску (σ) визначали згідно вимог стандартів України.

5. Результати досліджень впливу гранулометричного складу бетонних сумішей на показники властивостей периклазового бетону

5.1. Вибір області варіювання гранулометричного складу бетонних сумішей. На підставі аналізу рекомендацій авторів [1, 2] щодо вмісту тонкодисперсного компонента у складі звичайних периклазових бетонів обрано значення показників ступені рівняння (1) $\alpha = 0,2$ та $n = 0,54–0,75$ та розраховано гранулометричні складові бетонних сумішей, що містять заповнювач з максимальним розміром зерна 6 мм, які відповідають вмісту зерен фр. 6–1 мм — 49,6–59,2 %, фр. 1–0,063 мм — 23,1–18,3 %, фр. < 0,063 мм — 26,8–24,0 % з певним розподілом вузьких фракцій: 6–5 мм, 5–4 мм, 4–3 мм, 3–2 мм, 2–1 мм, 1–0,5 мм і 0,5–0,063 мм (табл. 1).

Таблиця 1

Гранулометричний склад бетонних сумішей та їх насипна щільність

Найменування матеріалу	Вміст зерен фракцій, %, при l		
	0,54	0,66	0,75
Зерниста складової (заповнювач) фр. 6–0,063 мм	73,2	76,0	77,5
Брак периклазових виробів фр. 6–2 мм, в тому числі:	35,8	41,2	45,0
— фр. 6–5 мм	7,5	9,1	10,2
— фр. 5–4 мм	8,2	9,7	10,8
— фр. 4–3 мм	9,2	10,6	11,5
— фр. 3–2 мм	10,9	11,8	12,5

Закінчення табл. 1

Найменування матеріалу	Вміст зерен фракцій, %, при n		
	0,54	0,66	0,75
Периклаз спечений фракції 2–0,063 мм, в тому числі:	37,4	34,8	32,5
— фр. 2–1 мм	13,8	14,0	14,2
— фр. 1–0,5 мм	9,5	9,2	8,5
— фр. 0,5–0,063 мм	14,1	11,6	9,8
Тонкодисперсна складова (в'яжуче) в тому числі:	26,8	24,0	22,5
— периклаз фр. менше 0,063 мм	20,8	18	16,5
— цемент «Богкал-70»	6	6	6
Насипна щільність суміші, г/см ³	2,41	2,51	2,53

Як видно з отриманих результатів зростання вмісту у суміші зернистого заповнювача фр. 6–2 мм з 35,8 % до 45 % при одночасному зменшенні кількості периклазу фр. 2–0,063 мм і тонко дисперсної складової з 26,8 % до 22,5 % супроводжується підвищенням насипної щільності бетонних сумішей на 0,12 г/см³. Насипна щільність бетонних сумішей зернових складів, що відповідають $n = 0,66$ і $n = 0,75$ практично не відрізняються.

5.2. Визначення впливу гранулометричного складу бетонних мас на показники властивостей термооброблених бетонних зразків на симплексі. Для проведення досліджень з використанням симплекс-гранчастого методу і побудови матриці планування експерименту (табл. 2) в якості базових зернових та речовинних складів бетонних сумішей (склад № 1–№ 3) обрано склади, що відповідають розподілу вузьких фракцій, наведених в табл. 1.

Матриця планування експерименту

Номер складу	Фактори					
	Кодовані значення			Натуральні значення, %		
	X_1	X_2	X_3	X_1	X_2	X_3
1	1	0	0	35,8	37,4	26,8
2	0	1	0	41,2	34,8	24,0
3	0	0	1	45,0	32,5	22,5
4	1/2	1/2	0	38,5	36,1	25,4
5	1/2	0	1/2	40,4	34,9	24,7
6	0	1/2	1/2	43,1	33,7	23,3
7	1/3	1/3	1/3	40,7	34,9	24,4

За результатами проведеного активного експерименту та результатів математичної обробки даних отримано рівняння регресії в системі «склад — властивість» (табл. 3) та побудовано їх графічні інтерпретації (рис. 1, 2).

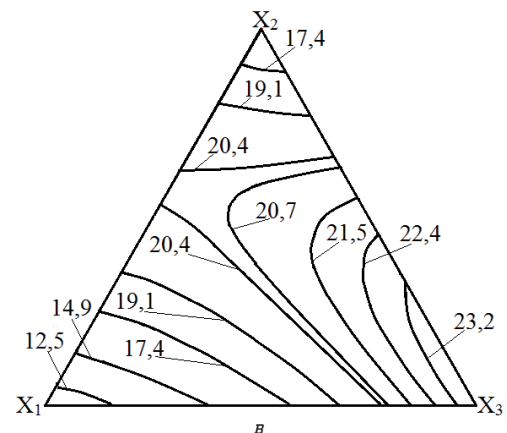
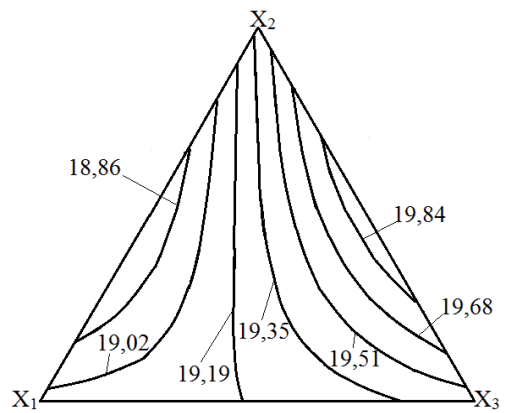
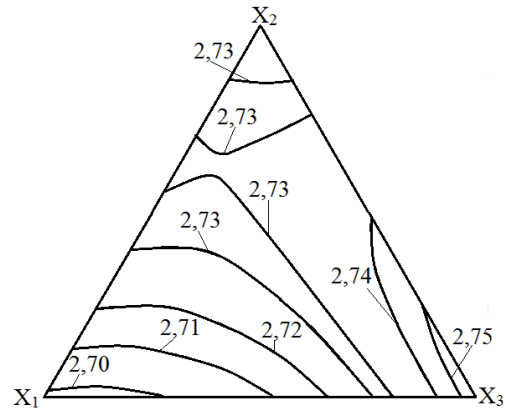


Рис. 1. Ізолінії показників властивостей бетону після сушки при 110 °С: а — уявна щільність; б — відкрита пористість; в — границя міцності при стиску; X_1 — брак виробів фр. 6–2 мм; X_2 — периклаз фр. 2–0,063 мм; X_3 — в'яжуче

Таблиця 3

Поліноміальні моделі в системі «склад — властивість»

Показники властивостей	Рівняння регресії
ρ , г/см ³	$\rho_{110} = 2,7X_1 + 2,72X_2 + 2,75X_3 + 0,08X_1X_2 - 0,06X_1X_3 + 0,02X_2X_3$ * $\rho_{1600} = 2,79X_1 + 2,81X_2 + 2,75X_3 + 0,3X_1X_2 - 0,2X_1X_3 + 0,08X_2X_3$
Π , %	$\Pi_{110} = 19,085X_1 + 19,40X_2 + 19,445X_3 - 2,05X_1X_2 - 0,26X_1X_3 + 2,11X_2X_3$ $\Pi_{1600} = 19,30X_1 + 17,40X_2 + 20,10X_3 - 5,40X_1X_2 - 7,6X_1X_3 - 0,6X_2X_3$
σ , Н/мм ²	$\sigma_{110} = 10,75X_1 + 15,50X_2 + 24,00X_3 + 29,50X_1X_2 - 3,50X_1X_3 + 9,20X_2X_3$ $\sigma_{1600} = 36,50X_1 + 41,75X_2 + 30,60X_3 + 36,30X_1X_2 + 35,40X_1X_3 - 8,70X_2X_3$

Примітка: * чисельник — 110 °С; знаменник — 1600 °С.

Аналіз графічних інтерпретацій змінення властивостей бетону після сушки при 110 °С (рис. 1) показав, що незалежно від зернового і речовинного складу бетонних сумішей уявна щільність зразків коливається у вузькому інтервалі значень — 2,70–2,75 г/см³ (рис. 1, а). При цьому більш високі значення щільності (2,74 г/см³ і 2,75 г/см³) відповідають області складів, що містять: брак виробів фр. 6–2 мм — 43,2–44,6 % і фр. 2–0,063 мм — 33,1–32,7 % та 22,7–23,2 % в'язучого. При цьому відкрита пористість бетону (рис. 1, б) і механічна міцність (рис. 1, в) досягають максимальних значень в межах 19,84–19,35 % і 21,5–23,2 Н/мм² відповідно. Це пояснюється суттєвим впливом вмісту заповнювача крупної фракції — браку виробів, що забезпечує зростання механічної міцності бетону. Але недостатня кількість тонкодисперсної складової — в'язучого обумовлює підвищення відкритої пористості бетону. Мінімальні значення пористості — 18,86–19,02 % (рис. 1, б) забезпечуються у разі гранулометричного складу вихідних сумішей, що містять заповнювач фр. 6–2 мм — 36,6–40,2 % і фр. 2–0,063 мм — 37,3–35,3 % та 26,7–24,5 % в'язучого.

Значно змінюються характер залежностей властивостей бетонних зразків після випалу при температурі 1600 °С, що обумовлено процесами спікання маси та її усадки. Загальна тенденція змінення властивостей бетону визначається впливом вмісту тонкодисперсного компоненту — цементу (X_3), який в результаті розподілу між крупними і середніми зернами заповнювача під

дією високотемпературного спікання утворює прошарки, міцність яких визначає структурну міцність і властивості конгломерату (рис. 2).

Аналіз взаємозв'язку показників властивостей бетону після випалу відповідає основним закономірностям спечених композитів: більш висока уявна щільність і низька відкрита пористість композиту забезпечують досягнення максимальної механічної міцності. Так, варіювання складів сумішей в межах вмісту заповнювача фр. 6–2 мм — 41,3–36,7 % і фр. 2–0,063 мм — 34,7–38,8 % та в'язучого — 24,0–26,3 % забезпечувало отримання бетону зі щільністю 2,86–2,83 г/см³ (рис. 2, а) і відкритою пористістю 17,13–17,46 % (рис. 2, б). При цьому максимальна механічна міцність бетону — 46,9–45,2 Н/мм² (рис. 2, в) відповідала наступному зерновому складу вихідних сумішей: брак виробів фр. 6–2 мм — 40,4–37,3 %, периклаз фр. 2–0,063 мм — 35,4–36,7 %, в'язуче — 24,3–26 %. Підвищення вмісту заповнювача при одночасному зменшенні кількості в'язучого до 22,7–23,2 % супроводжується зниженням уявної щільності і механічної міцності до 2,7–2,79 г/см³ і 36,8–31,6 Н/мм² відповідно, та більш високими значеннями відкритої пористості — 18,12–19,77 %, що свідчить про недостатню кількість тонкодисперсного компоненту для щільної укладки бетонної маси при формуванні бетону і створенні щільних та міцних прошарків у міжзерненому просторі матеріалу після випалу.

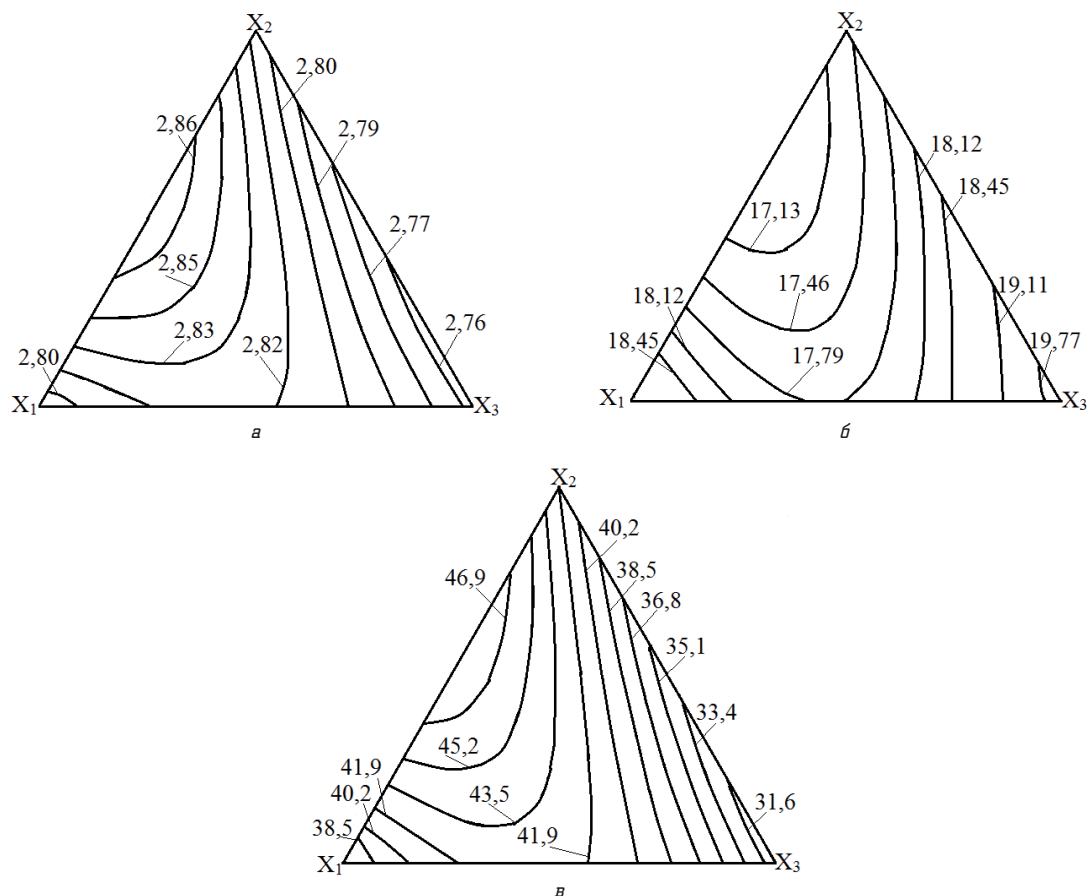


Рис. 2. Ізолінії показників властивостей бетону після випалу при 1600 °С: а — уявна щільність; б — відкрита пористість; в — границя міцності при стиску; X_1 — брак виробів фр. 6–2 мм; X_2 — периклаз фр. 2–0,063 мм; X_3 — в'язуче

6. Обговорення результатів досліджень впливу гранулометричного складу бетонних сумішей на змінення насипної щільності та фізико-технічних властивостей периклазового бетону

Узагальнені дані щодо областей гранулометричних складів сумішей, які забезпечують необхідне поєднання властивостей бетонів після термообробки (табл. 4) вказують на відмінності діапазонів значень факторів для показників властивостей бетону після сушки і після високотемпературного випалу.

Таблиця 4

Властивості бетонних зразків після сушки і випалу

Діапазон вмісту складових бетонних сумішей, %			Показники властивостей бетону					
			після сушки при 110 °С			після випалу при 1600 °С		
X_1	X_2	X_3	ρ , г/см ³	Π , %	σ , Н/мм ²	ρ , г/см ³	Π , %	σ , Н/мм ²
43,2–44,6	33,1–32,7	22,7–23,2	2,74–2,75	19,84–19,35	21,5–23,2	—	—	—
38,7–42,6	36,0–33,5	25,3–23,4	2,72–2,73	18,86	20,4–20,7	—	—	—
41,3–36,7	34,7–38,8	24,0–26,3	—	—	—	2,86–2,83	17,13–17,46	46,9–43,5
40,4–37,3	35,2–36,7	24,4–26,0	—	—	—	2,86–2,85	17,13–17,46	46,9–45,2

З точки зору проектування оптимальних структур композиту, яким відповідає комплекс найбільш бажаних показників властивостей бетону, пріоритетність вибору оптимального гранулометричного складу сумішей визначається функціональним призначенням вогнетривких бетонів, тобто властивостями периклазового бетону після високотемпературного випалу.

Так, область зернових і речовинних складів бетонних сумішей, що відповідає вмісту подрібненого браку виробів фр. 6–2 мм в межах 40,4–38,7 % і периклазу фр. 2–0,063 мм – 35,2–36,0 % при вмісті в'язучого 25–26 % забезпечує отримання периклазового бетону з задовільними показниками властивостей бетону після сушки і комплексом бажаних властивостей композиту після випалу. При цьому співвідношення вузьких фракцій заповнювача складало: для подрібненого браку виробів 6–5 мм : 5–4 мм : 4–3 мм : 3–2 мм = 1 : 0,92 : 1,10 : 1,15; для зернистого периклазу – 2–1 мм : 1–0,5 мм : 0,5–0,063 мм = 1 : 0,64 : 1,44, і забезпечувало отримання бетону після сушки і випалу наступними показниками властивостей: уявна щільність – 2,72–2,73 г/см³ та 2,86–2,85 г/см³, відкрита пористість – 18,86 % та 17,13–17,46 %, границя міцності при стиску – 20,4–20,7 Н/мм² та 46,9–45,2 Н/мм² відповідно.

Слід зазначити, що показник насипної щільності бетонних сумішей (табл. 1), який використовувався при виборі діапазону варіювання гранулометричного складу сумішей і прогнозування щільності упаковки бетонних мас при вібрації корелюється лише з властивостями бетону після сушки (табл. 2, склади № 1–№ 3). При випалі бетону, в наслідок складних процесів спікання і фазоутворення, усадки і формування структури композиту, тенденція змінення властивостей бетону в залежності від гранулометричного складу вихідних

сумішей не відповідає в повній мірі характеру змінення їх насипної щільності. Але значний приріст насипної щільності бетонної суміші, що відповідає $n = 0,66$ у порівнянні з композицією для $n = 0,54$ (табл. 1) та результати дослідження властивостей бетонів на симплексі вказують на доцільність вибору області варіювання факторів в межах вказаних складів композицій.

7. Висновки

На підставі проведених досліджень встановлена певна обмеженість щодо використання показника насипної щільності бетонних сумішей в якості критерію оцінки ступеню ущільнення периклазових бетонних мас вібраційного формування, тенденція змінення якого в залежності від гранулометричного складу дослідних сумішей не відбиває в повній мірі характер змінення властивостей термообробленого бетону. Більш доцільно використовувати показник насипної щільності бетонних сумішей для попереднього вибору області варіювання факторного простору щодо реалізації методів математичного планування експерименту.

З використанням симплекс-гатчастого методу отримано рівняння регресії в системі «склад-властивість» та досліджено вплив гранулометричного складу композиційних сумішей периклазового бетону, що містить заповнювач – подрібнений брак периклазових виробів і периклаз та в'язуче у вигляді суміші цементів різної природи. Встановлено оптимальний гранулометричний склад композиційних сумішей, що відповідає певному розподілу вузьких фракцій заповнювача у крупнозернистій складовій та забезпечує досягнення достатньо високих показників механічної міцності бетону після сушки і комплекс необхідних властивостей периклазового бетону після високотемпературного випалу. Отримані результати свідчать про те, що для віброформованих периклазових бетонів на гідравлічному в'язучому, варіювання співвідношення вузьких фракцій заповнювача та вмісту в'язучого є фактором спрямованого регулювання процесами формування оптимальної структури бетону, яка характеризується рівномірним розподілом часток заповнювача різного розміру в об'ємі конгломерату та раціональною товщиною прошарків міжзерненого простору зцементованих гідратами мінеральних складових цементів та новоутвореннями фаз – продуктами високотемпературного синтезу.

Література

1. Хорошавин, Л. Б. Магнезиальные бетоны [Текст] / Л. Б. Хорошавин. – М.: Металлургия, 1990. – 168 с.
2. Хорошавин, Л. Б. Магнезиальные огнеупоры [Текст]: справ. изд. / Л. Б. Хорошавин, В. А. Перепелицын, В. А. Кононов. – М.: Интермет Инжиниринг, 2001. – 576 с.
3. Сизиков, А. М. Пути повышения качества магнезиальных бетонов [Текст] / А. М. Сизиков, Е. В. Шаповалов. – Омск: СибАДИ, 2009. – 92 с.
4. Кашеев, И. Д. Огнеупоры для промышленных агрегатов и топков [Текст]. К. 2. Служба огнеупоров: справ. изд. в 2 к. / И. Д. Кашеев и др. – М.: Интермет Инжиниринг, 2002. – 656 с.
5. Спрыгин, А. И. Магнезиальные бетонные блоки для агрегатов цветной металлургии [Текст] / А. И. Спрыгин, Л. Б. Хорошавин // Огнеупоры. – 1985. – № 5. – С. 47–49.
6. Kim, H. Surface modification of MgO micro-crystals by cycles of hydration-dehydration [Text] / H. Kim, J. Kang, M. Y. Song, S. H. Park, D. G. Park, H. Kweon, S. S. Nam // Bull. Korean Chem. Soc. – 1999. – № 20(7). – P. 786–790.

7. Birchal, V. S. S. The effect of magnesite calcination conditions on magnesia hydration [Text] / V. S. S. Birchal, S. D. F. Rocha, V. S. T. Ciminelli // Minerals Engineering. — 2000. — Vol. 13, № 14–15. — P. 1629–1633. doi:10.1016/s0892-6875(00)00146-1
8. Ahari, K. G. Hydration of refractory oxides in castable bond systems — I: alumina, magnesia and alumina-magnesia mixtures [Text] / K. G. Ahari, J. H. Sharp, W. E. Lee // Journal of the European Ceramic Society. — 2002. — Vol. 22, № 4. — P. 495–503. doi:10.1016/s0955-2219(01)00299-0
9. Salomao, R. A novel approach for magnesia hydration assement in refractory castable [Text] / R. Salomao, L. R. M. Bittencourt, V. C. Pandolfelli // Ceramics International. — 2007. — Vol. 33, № 5. — P. 803–810. doi:10.1016/j.ceramint.2006.01.004
10. Саломео, Р. Влияние гидравлических вяжущих на гидратацию спеченного магнезита в огнеупорных бетонах [Текст] / Р. Саломео, В. К. Пандолфелли, Л. Р. Биттенкурт // Огнеупоры и техническая керамика. — 2011. — № 4–5. — С. 59–63.
11. Altun, A. Thermomechanical properties of the MgO based self-flowing castables [Text] / A. Altun // 48th International Colloquium of Refractories, Aachen, 28 and 29 September, 2005. — P. 49–52.
12. Будников, П. П. Огнеупорные бетоны на фосфатных связках [Текст] / П. П. Будников, Л. Б. Хорошавин. — М.: Металлургия, 1971. — 192 с.
13. Пивинский, Ю. Е. Неформованные огнеупоры [Текст]. Т. 1. Общие вопросы технологии: справоч. изд. в 2 т. / Ю. Е. Пивинский. — М.: Теплоэнергетик, 2005. — 448 с.
14. Пьяных, Е. Г. Влияние зернового состава масс и давления прессования на свойства магнезиальных образцов [Текст] / Е. Г. Пьяных, Г. И. Антонов, В. И. Гончаров, И. М. Квасман, Ю. Л. Каменецкий // Огнеупоры. — 1973. — № 10. — С. 46–53.
15. Ballani, F. Modelling the microstructure of concrete with spherical grains [Text] / F. Ballani, D. J. Daley, D. Stoyan // Computational Materials Science. — 2006. — Vol. 35, № 4. — P. 399–407. doi: 10.1016/j.commatsci.2005.03.005
16. Гуренко, И. В. Оптимизация гранулометрического состава бетона специального назначения [Текст] / И. В. Гуренко, Г. Н. Шабанова, А. Н. Корогодская, В. В. Дейнека и др. // Вісник НТУ «ХПІ». Хімія, хімічна технологія та екологія. — 2005. — № 51. — С. 183–189.
17. Бражник, Д. А. Оптимизация гранулометрического состава низкоцементных периклазосодержащих неформованных масс [Текст] / Д. А. Бражник, Г. Д. Семченко, А. А. Бондаренко, А. М. Самань // Сборник научных трудов ОАО «УкрНИИО им. А. С. Бережного». — Харьков: Каравелла, 2005. — № 2. — С. 86–87.
18. Вернигора, Н. К. Анализ фракционного состава огнеупорных бетонов на шамотном заполнителе [Текст] / Н. К. Вернигора, С. М. Логвинков, Г. Н. Шабанова, А. Н. Корогодская // Сборник научных трудов ОАО «УкрНИИО им. А. С. Бережного». — Харьков: Каравелла, 2006. — № 106. — С. 71–77.
19. Онасенко, Ю. А. Вплив конфігурації зерен і зернового складу заповнювача на властивості бетону [Текст] / Ю. А. Онасенко, В. В. Пісчанська, Л. Д. Пилипчатін // Східно-Європейський журнал передових технологій. — 2012. — № 4/6(58). — С. 18–23. doi:10.15587/1729-4061.2012.5587

ОПТИМИЗАЦИЯ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА ПЕРИКЛАЗОВОГО БЕТОНА

С использованием симплекс-решетчатого метода планирования эксперимента исследовано влияние гранулометрического состава бетонных смесей, которые содержат в качестве заполнителя вторичное сырье — дробленный брак периклазовых изделий и спеченный периклаз, на показатели свойств периклазового бетона после термической обработки. Оптимизирован гранулометрический состав бетона на гидравлическом вяжущем — смеси периклазового и кальций-алюминатного цемента, обеспечивающий достижение комплекса заданных показателей свойств.

Ключевые слова: гранулометрический состав, периклазовый бетон, заполнитель, гидравлическое вяжущее, показатели свойств.

Пісчанська Вікторія Вікторівна, кандидат технічних наук, доцент, кафедра металургійного палива та вознетривів, Національна металургійна академія України, Дніпропетровськ, Україна, e-mail: v_peschanska@mail.ru.

Алексеевко Інна Анатоліївна, асистент, кафедра металургійного палива та вознетривів, Національна металургійна академія України, Дніпропетровськ, Україна, e-mail: inna.harsika@yandex.ru.

Песчанская Виктория Викторовна, кандидат технических наук, доцент, кафедра металлургического топлива и огнеупоров, Национальная металлургическая академия Украины, Днепропетровск, Украина.

Алексеевко Инна Анатольевна, ассистент, кафедра металлургического топлива и огнеупоров, Национальная металлургическая академия Украины, Днепропетровск, Украина.

Peschanskaya Victoria, National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnepropetrovsk, Ukraine, e-mail: v_peschanska@mail.ru. Aliksieienko Inna, National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnepropetrovsk, Ukraine, e-mail: inna.harsika@yandex.ru

УДК 666.293.522

DOI: 10.15587/2312-8372.2015.47704

**Рижова О. П.,
Хохлов М. А.,
Кислична Р. І.**

РОЗРОБКА БІЛИХ ТИТАНОВИХ ЕМАЛЕВИХ ПОКРИТТІВ ЗІ ЗНИЖЕНОЮ ТЕМПЕРАТУРОЮ ВИПАЛУ

Досліджено вплив модифікуючих додатків Li_2O і VaO на властивості фрит та оптичні характеристики білих малофтористих титанових емалевих покриттів. Встановлено оптимальні концентрації оксидів літію та барію у складі дослідних емалей. Отримано гладкі, щільні, білі склопокриття з гарним блиском та необхідними фізико-хімічними властивостями, які можуть бути рекомендовані для нанесення їх на сталеві вироби господарчо-побутового призначення.

Ключові слова: біле покриття, малофториста емаль, білизна, ступінь жовтизни, оксид барію, оксид літію.

1. Вступ

Більшість підприємств Європейського союзу вже тривалий час використовують фрити зі зниженою тем-

пературою випалу, але розробки в цьому напрямку продовжуються [1]. Крім того, вітчизняними та зарубіжними дослідниками [1–5] проводяться роботи з синтезу та впровадженню у виробництво безфтористих та малофто-