

**ДОСЛІДЖЕННЯ МОДИФІКОВАНОГО В'ЯЖУЧОГО ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ
ГАЗОБЕТОНУ**

¹**Зібров І.Ф.**, аспірант,
ivanzibrov44@gmail.com, ORCID: 0000-0002-9384-985X

¹**Радкевич А.В.**, д.т.н., професор,
a.v.radkevich@ust.edu.ua, ORCID: 0000-0001-6325-8517
¹*Український державний університет науки і технологій*
вул. ак. Лазаряна, 2, м. Дніпро, 49010, Україна

Анотація. Для покращення енергозберігаючих властивостей основним напрямом у технології сучасних стінових матеріалів є зниження середньої густини задля досягнення кращих теплотехнічних показників при одночасному підвищенні характеристик міцності, тобто створення ефективних стінових матеріалів. Одним із таких матеріалів є газобетон, який успішно застосовується у всьому світі. Одним із способів підвищення фізико-механічних властивостей в'язучого як головної складової газобетону та розширення сировинної бази може бути використання відходів усіляких виробництв, а також вторинне використання пошкоджених будівельних матеріалів із зруйнованих будівель та споруд у результаті бойових дій (рециклінг), що є актуальним. Метою даних досліджень є одержання газобетону на модифікованому в'язучому з використанням рециклінгу зруйнованих будівельних матеріалів. На даному етапі проводиться дослідження модифікованого в'язучого. В результаті досліджень встановлено оптимальне співвідношення складових модифікованого в'язучого (портландцементу, метакаоліну, цегельного бою). Отримані математичні моделі, що описують залежність міцності в'язучого при згині та стиску від його складу. Результати рентгенофазового та диференціально-термічного аналізу показують, що введення до складу в'язучого на основі портландцементу добавок метакаоліну та цегельного бою, після 28 діб нормального твердіння, не викликають нових фазово-мінералогічних утворень порівняно із зразками без добавки, а лише впливають на кількісний мінералогічний склад. Спостерігаються інтенсивніше виражені гидросилікатні фази і зменшення кристалізаційного гідроксиду кальцію. На мікрофотографіях структури отриманого в'язучого чітко проглядається монолітна структура цементного каменю, видно дисперговані лугом зерна цементу, піску та кластери із гидросилікатів кальцію.

Ключові слова: газобетон, модифіковане в'язуче, пуцоланова добавка, метакаолін, бій цегли.

Вступ. Для покращення енергозберігаючих властивостей основним напрямом у технології сучасних стінових матеріалів є зниження щільності задля досягнення кращих теплотехнічних показників при одночасному підвищенні характеристик міцності, тобто створення ефективних стінових матеріалів.

Одним із таких матеріалів є газобетон, який успішно застосовується у всьому світі. Одним із способів підвищення фізико-механічних властивостей в'язучого як головної складової газобетону та розширення сировинної бази може бути використання відходів усіляких виробництв [1, 2], а також вторинне використання пошкоджених будівельних матеріалів із зруйнованих будівель та споруд у результаті бойових дій (рециклінг).

Аналіз останніх досліджень. Бій цегли – затребуваний техногенний матеріал, що отримується внаслідок демонтажу стін та фундаментів будівель, огорож, димових труб, некондиційної цегли, а також із зруйнованих будівель та споруд у результаті бойових дій.

Завдяки своєму мінералогічному складу бій цегли знаходить широке застосування у будівельній індустрії. Ряд будівельних компаній для зниження собівартості будівництва

застосовують цегельний бій як наповнювач в низькомарочних бетонах. Також цей матеріал використовується при підготовці під фундаменти малоповерхових будівель, у дорожньому будівництві при відсіпанні другорядних і тимчасових доріг. Молотий цегельний бій можна розглядати як аналог природних тонкомолотих мінеральних речовин, що використовуються як пуцоланові добавки в цементних в'язучих.

У низці робіт [3–7] вченими відзначається ефективність використання добавки у вигляді керамічного або керамзитового пилю, мелених відходів виробництва керамічної цегли та керамічних виробів для підвищення водостійкості та морозостійкості матеріалів, а також для отримання композиційних шлаколузних в'язучих з добавками меленого бою цегли. Введення в шлаколузні в'язучі до 30% бою цеглини дозволяє підвищити міцність до 30–32%, підвищує ступінь гідратації, призводить до утворення більш однорідної щільної структури, знижує рівень висолоутворення.

В даний час проводяться дослідження з використання високоактивних пуцоланових компонентів, при введенні яких у малих кількостях прискорюються процеси гідратації та твердіння цементного в'язучого та покращується здатність опиратися навантаженням стиску цементного каменю [8]. Одним з таких компонентів є високодисперсний мікрокремнезем. Мікрокремнезем є побічним продуктом металургійного виробництва при виплавці феросиліцію. Має високу питому поверхню, близько 20 м² на 1 г речовини [9].

До пуцоланів відносяться всі природні та штучні силікатні матеріали, для яких основною характеристикою є вміст *реакційноздатного кремнезему*. Останній, реагуючи з гідроксидом кальцію (продуктом гідратації портландцементного клінкеру), утворює гідросилікати кальцію, що визначають швидкість наростання міцності штучного каменю [10].

Приблизна схема реакції:



Крім того, у більшості випадків пуцолани містять *реакційний оксид алюмінію*, який може утворювати з розчиненим гідроксидом кальцію гідроалюмінат кальцію. Таким чином, для всіх пуцоланових добавок характерна більш-менш висока потреба в гідроксиді кальцію для гідравлічного твердіння [10]. В табл. 1 надано пуцоланова активність деяких мінеральних добавок [11].

Таблиця 1 – Пуцоланова активність деяких мінеральних добавок [11]

Назва добавки	Пуцоланова активність, мг Ca(OH) ₂ на 1 г добавки
Обпалений боксит	534
Мікрокремнезем	427
Доменний шлак	300
Зола-винесення	875
Метакаолін	1000

Наведені в таблиці дані, свідчать про більш високу активність метакаоліну, оскільки в його складі міститься більший відсоток активного Al₂O₃, який здатний створювати сполуки з більшою кількістю молекул CaO, ніж активний SiO₂ [12].

Метою досліджень є одержання газобетону на модифікованому в'язучому з використанням рециклінгу зруйнованих будівельних матеріалів. На даному етапі проводиться дослідження модифікованого в'язучого.

Методи дослідження. Використані стандартні методи визначення властивостей в'язучого та газобетону, математичні методи планування експерименту та обробки результатів. Визначення фазово-мінералогічного складу новоутворень здійснювалось методами рентгеноструктурного та диференційно-термічного аналізів.

Сировинні матеріали. У дослідженнях використовували наступні сировинні матеріали: *портландцемент* ПЦ І-500Р-Н (СЕМ І 42,5 R), що відповідає ДСТУ Б EN 197-1:2015, виробництво Україна ПрАТ «Івано-Франківськцемент (Івано-Франківська обл. Тисменицький р-н, с. Ямниця); *пісок* стандартний для випробувань цементів ДСТУ Б В.2.7-189:2009; вода ДСТУ Б В.2.7-273:2011(ГОСТ 23732-79, MOD).

В якості *вторинної сировини (рециклінгу)* у дослідках було використано бій силікатної цегли із зруйнованих будівель та споруд утворених внаслідок бойових дій. Вторинний матеріал – бій цегли складається із зруйнованої цегли і розчину кладки. Зруйнована цегла має більш менш однорідних склад. Матеріал подрібнюється та розмелюється.

В якості активної мінеральної добавки використовувався *високоактивний метакаолін* ТУ У 14.2-36363275-001:2009 виробництво Виробничої компанії «МЕТА D» (Україна). Характеристика представлена в табл. 2.

Високоактивний метакаолін (ВМК) – це штучно виготовлена пуцоланова добавка, що володіє найбільш високою активністю серед активних мінеральних добавок, що є на ринку. Високоактивний метакаолін має найвищий вміст оксидів кремнію та алюмінію серед інших пуцоланових добавок.

Пуцоланова активність метакаоліну становить понад 1000 мг вапна на 1г метакаоліну. Для порівняння, пуцоланічна активність мікрокремнезему зазвичай становить 300-400 мг вапна на 1г мікрокремнезему.

Рекомендована норма витрати метакаоліну 5-15% до цементу (заміна відповідної частки цементу на метакаолін). Як правило, дозування становить 8-10% маси цементу [13].

Таблиця 2 – Характеристика метакаоліну

Найменування показника	Значення
Масова частка оксиду алюмінію Al_2O_3 , %	35,5-43,8
Масова частка оксиду кремнію Si_2O_2 , %	53,42
Масова частка оксиду заліза Fe_2O_3 , %	0,75
Масова частка оксиду титану TiO_2 , %	0,58
Масова частка оксиду кальцію CaO , %	0,45
Коефіцієнт відбиття, %	77,5
Розчинність у воді, %	0,13
Абразивність, мг	79,4
Дисперсний склад менш 2 мкм, %	55,8
Масова частка залишку на сітці 0063, %	1,32
Насипна маса, kg/m^3	304,0 (до ущільнення)/447,0 (після ущільнення)
Питома поверхня m^2/g	15
Масова частка вологи, %	не більше 1%
Зовнішній вигляд	Порошок від білого до кремового кольору
Розсіпчастість, %	100
Особливі властивості	Не токсично, радіоційна активність-18 мкр/год.

Результати досліджень. На даному етапі було проведено дослідження модифікованого в'язучого, яке складається із цементу, метакаоліну, цегляного бою. Визначення міцності на згин і стиск зразків-балочок розміром $40 \times 40 \times 160$ мм проводили за стандартною методикою. Зразки готували із розчину 1:3 (модифіковане в'язуче : стандартний пісок для випробувань).

З метою встановлення найбільш раціонального співвідношення компонентів та скорочення кількості експериментів оптимізацію складу в модифікованому в'язучому проводили за допомогою симплекс-градчастого планування експерименту яке призначене для визначення екстремуму багатокомпонентних систем «склад – властивості». В якості вихідних компонентів були прийняті наступний вміст компонентів в'язучого: x_1 – портландцемент; x_2 – бій цегли; x_3 – високоактивний метакаолін. В якості вихідних

параметрів прийнято міцності при згині та стиску зразків у віці 28 добового тверднення в нормальних умовах.

В результаті проведеного експерименту були отримані математичні моделі, що описують залежність міцності на розтяг при згині та міцності на стиск від його складу:

$$f_{cm} = 50,5 \cdot x_1 + 46,5 \cdot x_2 + 47,8 \cdot x_3 - 0,8 \cdot x_1 \cdot x_2 + 8,6 \cdot x_1 \cdot x_3 + 9 \cdot x_2 \cdot x_3 + 5,58 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3$$

$$f_{c.t.} = 6,1 \cdot x_1 + 5,2 \cdot x_2 + 5,4 \cdot x_3 + 0,2 \cdot x_1 \cdot x_2 + 3,4 \cdot x_1 \cdot x_3 + 2,34 \cdot x_2 \cdot x_3 - 6,3 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3$$

Аналіз отриманих результатів показав, що зі збільшенням вмісту бою цегли від 10 до 30% спостерігається зниження міцності при стиску, що пояснюється збільшенням водопотреби і, отже, призводить до зниження показників міцності. При збільшенні вмісту метаксаоліну до 11-13% міцність при стиску підвищується. Але при подальшому збільшенні вмісту метаксаоліну знижується міцність, що також пояснюється збільшенням водопотреби.

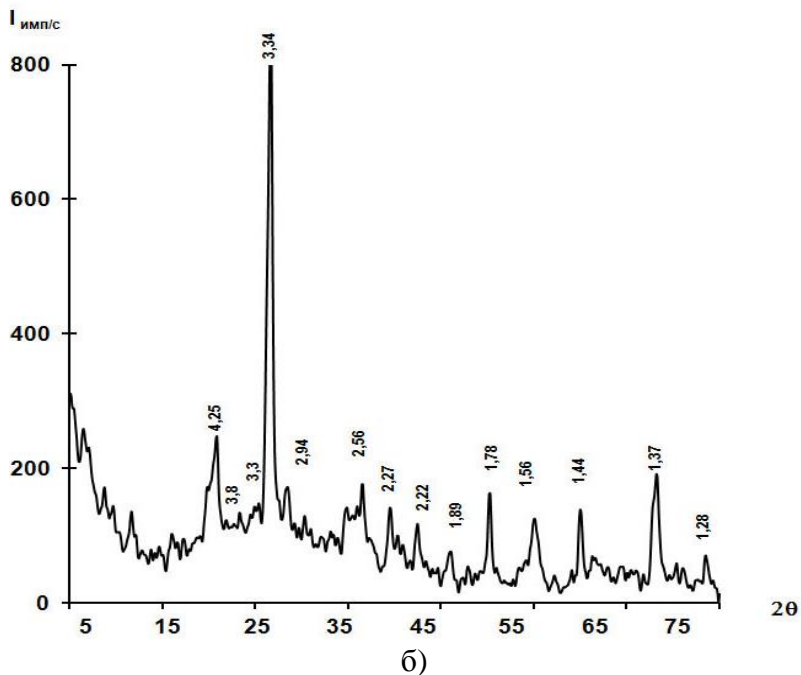
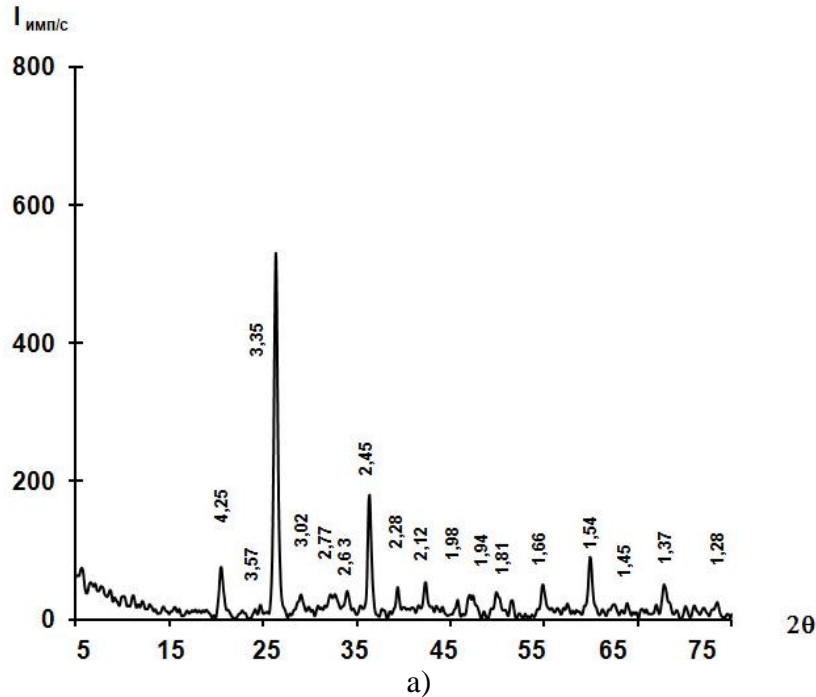
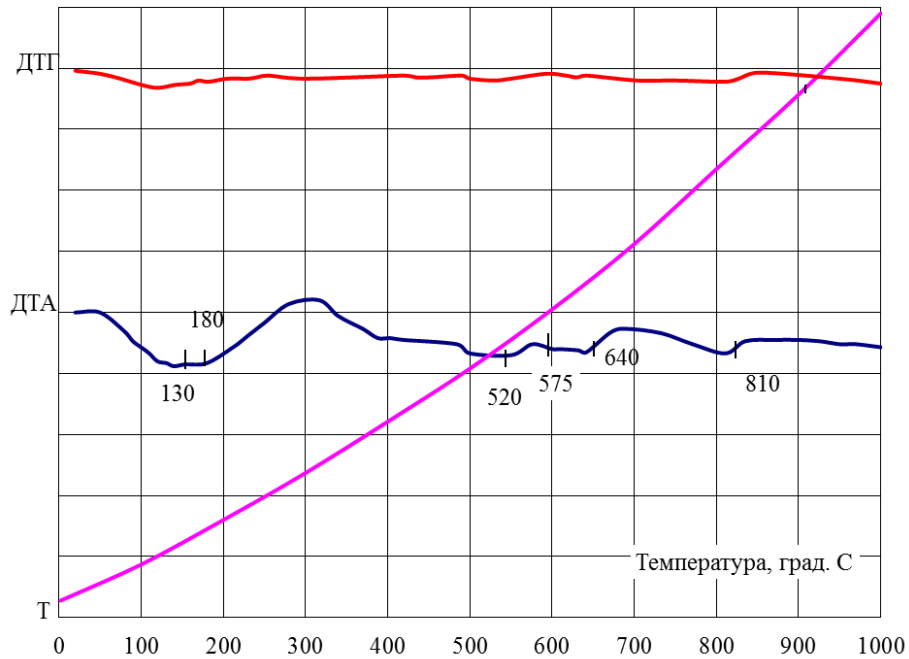
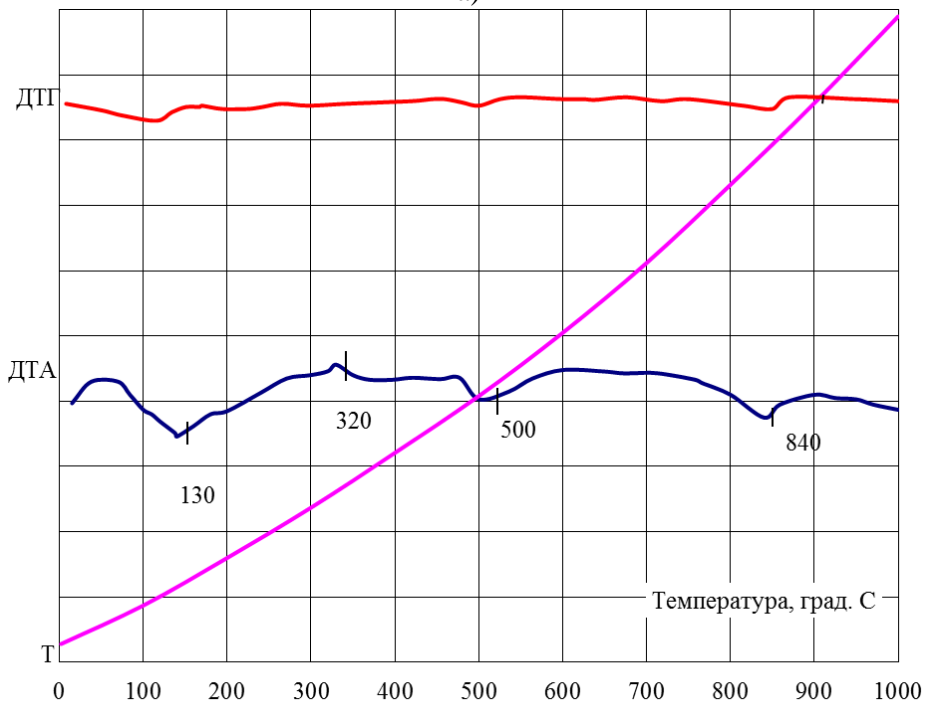


Рис. 1. Рентгенограма розчину на основі:
а – портландцементу; б – модифікованого в'язучого

Результати рентгенофазового та диференціально-термічного аналізу розчину (рис. 1, 2) показують, що введення до складу в'язучого на основі портландцементу добавок метаксаоліну та цегельного бою, після 28 діб нормального твердіння, не викликають нових фазово-мінералогічних утворень порівняно із зразками без добавки, а лише впливають на кількісний мінералогічний склад. Спостерігаються інтенсивніше виражені гидросилікатні фази і зменшення кристалізаційного гідроксиду кальцію. Втрата маси зразків з добавками (9,8%) більша ніж у бездодаткових (7,8%), що свідчить про більш високий рівень гідратації (рис. 2).



а)



б)

Рис. 2. Диференціально-термічний аналіз розчину на основі:
а – портландцементу; б – модифікованого в'язучого

Дослідження мікроструктури в'язучого проводили за допомогою електронного растрового мікроскопа РЕМ-106І.

На мікрофотографіях розчину на основі модифікованого в'язучого (рис. 3) видно гель із гідросилікатів кальцію на поверхні диспергованих зерен цементу, розмір яких 3-5 мкм, 1-3 мкм. Добре помітні кластери із гідросилікатів кальцію, розміром 6 мкм. Також видно волокна гідросульфоалюмінату кальцію.

На рис. 4 представлені мікрофотографії структури модифікованого в'язучого без кремнеземистого компонента. На першій мікрофотографії (рис. 4, а) представлений скол поверхні в'язучого. Є аморфна фаза. На другій мікрофотографії (рис. 4, б) видно дуже дрібні зерна цементу розміром 1-3 мкм, а також кластери, що складаються з гідросилікатів кальцію розміром 0,5-3 мкм. На третьому знімку (рис. 4, в) також видно кластери з гідросилікатів кальцію розміром 0,5-3 мкм та дрібні зерна цементу розміром 3-5 мкм.

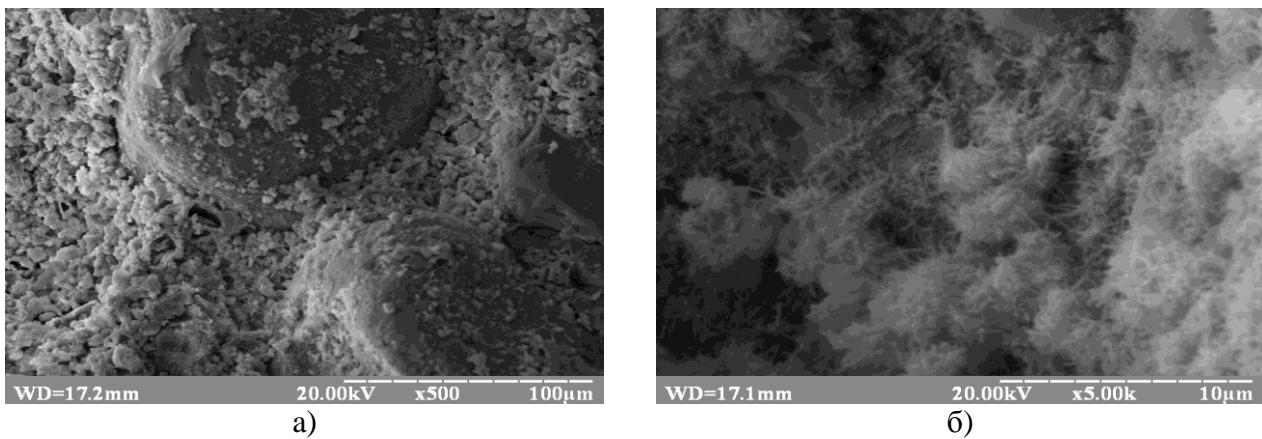


Рис. 3. Мікроструктура розчину на основі модифікованого в'язучого:
а – збільшення 500 (100 мкм); б – збільшення 5000 (10 мкм)

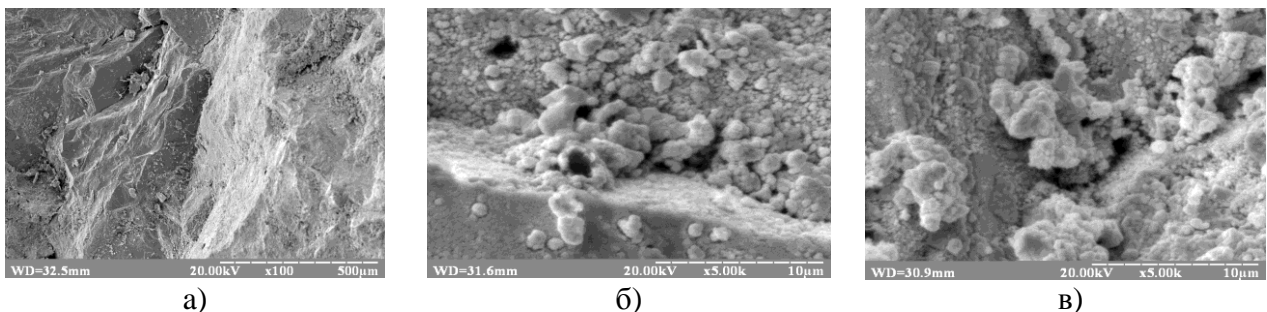


Рис. 4. Мікроструктура модифікованого в'язучого (без кремнеземистого компонента):
а – збільшення 100 (500 мкм); б, в – збільшення 5000 (10 мкм)

Висновки. В результаті досліджень встановлено оптимальне співвідношення складових модифікованого в'язучого (портландцементу, метакаоліну, цегельного бою), отримані математичні моделі, що описують залежність міцності на розтяг при згині та міцності на стиск від його складу.

Результати рентгенофазового та диференціально-термічного аналізу показують, що введення до складу в'язучого на основі портландцементу добавок метакаоліну та цегельного бою, після 28 днів нормального твердіння, не викликають нових фазово-мінералогічних утворень порівняно із зразками без добавки, а лише впливають на кількісний мінералогічний склад. Спостерігаються інтенсивніше виражені гідросилікатні фази і зменшення кристалізаційного гідроксиду кальцію.

На мікрофотографіях структури комплексного в'язучого чітко проглядається монолітна структура цементного каменю, видно дисперговані лугом зерна цементу, піску та кластери із гідросилікатів кальцію.

Література

1. Шабанова Г.Н., Рыщенко М.И., Федоренко Е.Ю., Лисачук Г.В. Техногенные материалы и промышленные отходы как источник сырья для производства строительных материалов. Экология и химическая промышленность. 2013. № 4. С. 10-16.
2. Круць Т.М. Принципи стратегії сталого розвитку в цементній промисловості / Т.М. Круць, І.М. Гев'юк, М.А. Саницький, Т.П. Кропивницька. Будівельні матеріали та вироб. 2015. № 3-4. С. 16-19.
3. Müller A., Recycling of masonry rubble – Status and new utilization methods (Part 1). Fachtagung Recycling. 2003, pp. 17–25.
4. Müller A., Recycling of masonry rubble – Status and new utilization methods (Part 2). Fachtagung Recycling. 2003, pp. 42–46.
5. Robayo R.A., Mulford A., Munera J., Gutiérrez R.M.de. Alternative cements based on alkali-activated red clay brick waste. Construction and Building Materials. 2016. Vol. 128, pp. 163–169.
6. Sassoni E., Pahlavan P., Franzoni E., Bignozzi M.C. Valorization of brick waste by alkali-activation: A study on the possible use for masonry repointing. Ceramics International. 2016. Vol. 42, pp. 14685–14694.
7. Abdelghani Naceri, Makhloufi Chikouche Hamina. Use of waste brick as a partial replacement of cement in mortar. Waste Management. 2009. Vol. 20 (8), pp. 2378–2384.
8. Nerka V., Šlíková Z., Tesáreka P., Plachý T., Frankeová D., Petráová V. Comprehensive study on mechanical properties of lime-based pastes with additions of metakaolin and brick dust. Cement and Concrete Research. 2014. Vol. 64, pp. 17–29.
9. Laukaitis A., Keriene J., Kligys M., Mikulskis D., Lekunaite L. Influence of amorphous nanodispersive SiO₂ additive on structure formation and properties of autoclaved aerated concrete. Materials Science (Med iagotyra). 2010. No. 16 (3), pp. 257–263.
10. Штарк Йохен, Вихт Берид. Цемент и известь /пер. с нем. А. Тулаганова. Под ред. П. Кривенко. Киев, 2008. 480 с.
11. Дворкін Л.Й. Метакаолін в будівельних розчинах і бетонах: Монографія. Л.Й. Дворкін, Н.В. Лушнікова, Р.Ф. Рунова, В.В. Троян. К: Видавництво КНУБіА, 2007. 216 с.
12. Kostuch J.A., Walters G.V., Jones T.K. High performance concrete incorporating metakaolin airview. Concrete 2000 Conference, University of Dundee. 1993.
13. Виробнича компанія «META D». URL: <https://meta-d.com.ua/>

References

- [1] G.N. Shabanova, M.I. Rishchenko, Ye.Yu. Fedorenko, G.V. Lisachuk, "Tekhnogennie materialy i promishlennye otkhodi kak istochnik sirya dlya proizvodstva stroitelnykh materialov", *Ekologiya i khimicheskaya promishlennost*, no. 4, pp. 10-16, 2013.
- [2] T.M. Kruts, I.M. Heviuk, M.A. Sanytskyi, T.P. Kropyvnytska, "Pryntsypy stratehii staloho rozvytku v tsementnii promyslovosti", *Budivelni materialy ta vyroby*, no. 3-4, pp. 16-19, 2015.
- [3] A. Müller, *Recycling of masonry rubble – Status and new utilization methods (Part 1)*. Fachtagung Recycling, pp. 17–25, 2003.
- [4] A. Müller, *Recycling of masonry rubble – Status and new utilization methods (Part 2)*, Fachtagung Recycling, pp. 42–46, 2003.
- [5] R.A. Robayo, A. Mulford, J. Munera, R.M.de. Gutiérrez, "Alternative cements based on alkali-activated red clay brick waste", *Construction and Building Materials*, vol. 128, pp. 163–169, 2016.
- [6] E. Sassoni, P. Pahlavan, E. Franzoni, M.C. Bignozzi, "Valorization of brick waste by alkali-activation: A study on the possible use for masonry repointing", *Ceramics International*, vol. 42, pp. 14685–14694, 2016.

- [7] Abdelghani Naceri, Makhloufi Chikouche Hamina, "Use of waste brick as a partial replacement of cement in mortar, *Waste Management*, vol. 20 (8), pp. 2378–2384, 2009.
- [8] V. Nerka, Z. Sliková, P. Tesáreka, T. Plachý, D. Frankeová, V. Petráová, "Comprehensive study on mechanical properties of lime-based pastes with additions of metakaolin and brick dust, *Cement and Concrete Research*, vol. 64, pp. 17–29, 2014.
- [9] A. Laukaitis, J. Keriene, M. Kligys, D. Mikulskis, L. Lekunaite, "Influence of amorphous nanodispersive SiO₂ additive on structure formation and properties of autoclaved aerated concrete", *Materials Science (Med iagotyra)*, no. 16 (3), pp. 257–263, 2010.
- [10] Shtark Yokhen, Vikht Berid. *Tsement i izvest / per. s nem. A. Tulaganova*. Pod red. P. Krivenko. Kiev, 2008.
- [11] L.I. Dvorkin, N.V. Lushnikova, R.F. Runova, V.V. Troian, *Metakaolin v budivelnykh rozchynakh i betonakh*: Monohrafiia. K: Vydavnytstvo KNUBiA, 2007.
- [12] J.A. Kostuch, G.V. Walters, T.K. Jones, "High performance concrete incorporating metakaolin airview", *Concrete 2000 Conference*, University of Dundee. 1993.
- [13] Vyrobnycha kompaniia «META D». [Online]. Available: <https://meta-d.com.ua/> Accessed on: December 19, 2024.

STUDY OF MODIFIED BINDER FOR PRODUCTION OF AERATED CONCRETE

¹Zibrov I.F., postgraduate student,
ivanzibrov44@gmail.com, ORCID: 0000-0002-9384-985X

¹Radkevich A.V., Dr., Professor,
a.v.radkevich@ust.edu.ua, ORCID: 0000-0001-6325-8517
¹Ukrainian State University of Science and Technologie, Dnipro
2 Lazaryana St., Dnipro, 49010, Ukraine

Abstract. In the case of energy saving, the main direction in the technology of modern wall materials is to reduce the density in order to achieve better thermal performance while simultaneously increasing the strength characteristics, i.e. creation of effective wall materials. One of these materials is aerated concrete, which is successfully used all over the world. One of the ways to increase the physical and mechanical properties of the binder as the main component of aerated concrete and to expand the raw material base can be the use of waste from all kinds of production, as well as the secondary use of damaged building materials from destroyed buildings and structures as a result of hostilities (recycling). The purpose of the research is to obtain aerated concrete on a modified binder using recycling of destroyed building materials. At this stage, a modified binder is being studied. As a result of the research, the optimal ratio of the components of the modified binder (Portland cement, metakaolin, brick mortar) was determined. Mathematical models describing the dependence of the bending and compression strength of the binder on its composition were obtained. The results of X-ray phase and differential thermal analysis show that the introduction of methacoaline and brick mortar additives into the binder based on Portland cement, after 28 days of normal hardening, do not cause new phase and mineralogical formations compared to samples without additives, but only affect the quantitative mineralogical storage. More intensively expressed hydro-silicate phases and a decrease in crystallization calcium hydroxide are observed. The micrographs of the structure of the obtained binder clearly show the monolithic structure of the cement stone, the alkali-dispersed cement grains, sand and calcium hydro-silicate clusters are visible.

Keywords: aerated concrete, modified binder, pozzolanic additive, methacoaline, brick battle.

Стаття надійшла до редакції 10.01.2024