

УДК 666.3.032:666.724

*О.С. Хоменко <sup>а</sup>, Б.М. Даценко <sup>б</sup>, Г.В. Фоменко <sup>а</sup>***ВИЗНАЧЕННЯ ПІДХОДІВ ЩОДО РОЗРОБЛЕННЯ СКЛАДІВ КЕРАМІЧНИХ МАС  
ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ЛИЦЬОВОЇ ЦЕГЛИ**<sup>а</sup> ДВНЗ Український державний хіміко-технологічний університет, м. Дніпро, Україна<sup>б</sup> Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна

Розглянуто принципи проектування композиційної суміші для одержання керамічної лицьової цегли на основі глинистих матеріалів. Наведено комплекс досліджень, що дозволяють встановити раціональні технологічні параметри формування та випалу керамічних виробів задля досягнення високих показників експлуатаційних властивостей. Композиційні шихти одержано на основі глин Дружківського та Залютинського родовищ, а також глинистих відходів збагачення циркон-ільменітового піску Вільногірського ГМК. Встановлено, що на базі даних матеріалів, шляхом формування методом жорсткої екструзії та застосування випалу при температурах 1020–1040°C, можливо одержати керамічну цеглу марки не нижче М225.

**Ключові слова:** глина, лицьова цегла, композиційна суміш, шихта, пластичність, екструзія, випал, спікання, усадка, водопоглинання, механічна міцність.

**DOI:** 10.32434/0321-4095-2022-145-6-98-107**Вступ**

На даний час цегельна промисловість інтенсивно розвивається у всіх країнах світу. Це відбувається тому, що керамічна цегла має цілий комплекс характеристик, який не здатний замінити будь-який інший матеріал [1,2]: екологічна безпека, довговічність, міцність, а у випадку лицьової чи клінкерної цегли, ще й естетична привабливість.

Враховуючи високу енерго- і ресурсоемкість виробництва, роботи науковців будівельної сфери в останні роки спрямовані на пошук нових сировинних матеріалів, можливості утилізації відходів численних техногенних виробництв, урізноманітнення асортименту шляхом різних способів декорування, вивчення взаємозв'язку мікроструктури та властивостей продукції з огляду на оптимізацію технологічного процесу.

Комплексні дослідження нових сировинних матеріалів, їх поведінки у композиційних сумішах під час формовки, сушіння та випалу є актуальними та перспективними.

Пошук і дослідження нових сировинних матеріалів для будівельної галузі ведеться по-

стійно, що обумовлене швидким вичерпанням діючих родовищ якісних тугоплавких і легкоплавких глин. Поряд із традиційними глинистими матеріалами, у цегельному виробництві є можливість використовувати різноманітні вторинні продукти та промислові відходи. Це дозволяє скоротити витрати якісної глинистої сировини, а в багатьох випадках також зменшити енерговитрати на виробництво і покращити якість продукції.

Для заощадження високоякісних глин у виробництві будівельної кераміки використано суміші лігніту та кременистого піску [3]. Вказані добавки пропонується вводити до складу базової високопластичної глини до 13%, що дозволяє одержати вироби з маркою М125 – М150. Такий варіант композицій більш доцільний для виготовлення рядової керамічної цегли, попит на яку, у порівнянні з більш якісною клінкерною та лицьовою цеглою, сьогодні суттєво знижений.

Пропонується [4] використання глинистого кар'єрного шламу, що утворюється після промивання заповнювачів на дробарних установках. Після випалу при 1050°C можливо отримати бу-

© О.С. Хоменко, Б.М. Даценко, Г.В. Фоменко, 2022



This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

*O.S. Khomenko, B.M. Datsenko, G.V. Fomenko*

дівельні вироби з міцністю на стискання 20–36 МПа. Проте, високі показники міцності втрачають пріоритет у порівнянні з практичним застосуванням даної розробки, оскільки у багатотоннажних виробництвах її реалізувати складно.

Традиційним для інтенсифікації спікання керамічної маси є склобій [5]. На основі потрійної суміші висококремнистих глин, чорного піску та склобою отримано зразки будівельної кераміки у відновних умовах при температурі дещо вище за 800°C. Проте, такі композиції вимагають підвищеного вмісту тонкодисперсного склобою, що значно здорожує продукцію. До того ж, задля низькотемпературного спікання необхідна значна кількість склобою у масі, що після випалу призводить до збільшення крихкості виробів.

Показано можливість введення до складу керамічної маси відходів стічних вод до 15% [6], що може сприяти покращенню екологічної ситуації у регіоні. Проте, з точки зору практичної доцільності є численні питання щодо реалізації такого способу в промислових масштабах.

На основі легкоплавкої глини та феропилу з маловуглецевих ферохромових шлаків виготовлено зразки керамічної цегли марок від M100 до M150 [7]. Температури випалу виробів склали 950–1100°C. Високі показники фізико-хімічних властивостей досягнуто за рахунок наявності у фазовому складі анортиту та кристобаліту. Однак кристобалітова фаза небезпечна зміною об'єму зерен з часом, що може стати причиною виникнення внутрішніх напруг у черепку та різкого зниження міцності [8].

Здійснюються дослідження з розробки декоративно-захисних покриттів для клінкерної та лицьової цегли з використанням кварцових відходів збагачення каолінів. Особлива увага приділяється погодженню температурних коефіцієнтів лінійного розширення керамічної основи та глазурних покриттів [9]. Встановлено, що при утворенні глазури відбувається фазове розшарування скла, що передує процесу кристалізації. Ліквацийна структура помітно знижується за температури 700 і 950°C. Температурний інтервал ліквідації залежить від умов термічного оброблення глазури.

Розроблено ангобні покриття для будівельної кераміки із застосування комплексної глиновміщуючої сировини – лужних каолінів [10], які дозволяють частково замінити глину, польовий шпат та кварцовий пісок у складах керамічних мас, одночасно інтенсифікуючи їх спікання. Для надання чорного та сірого кольорів гла-

зурним та ангобним покриттям розробляються пігменти [11,12], до складу яких також можуть бути введені відходи крупнотонажних виробництв, зокрема доменні та мартенівські шлаки.

Таким чином, у будівельному секторі виробництва відбувається постійний пошук сировинних матеріалів, які дозволять: по-перше, знизити вміст високоякісних дефіцитних глин; по-друге, інтенсифікувати спікання керамічних мас з метою зниження енерговитрат на випал; і по-третє, утилізувати відходи інших крупнотонажних виробництв, покращуючи екологічний стан довкілля. Але, будь-які альтернативні сировинні матеріали, які б не вводились до складу керамічної маси, не можуть повністю замінити глинисту основу, тому дослідження глинистої сировини та розробка принципів проектування складів мас для виробництва керамічної цегли методом екструзії є актуальним і необхідним.

В даній роботі як об'єкт досліджень обрано керамічну масу для виготовлення лицьової цегли методом жорсткої екструзії.

Метою роботи є відпрацювання підходів щодо розробки складів керамічних мас для виробництва керамічної цегли методом жорсткої екструзії, включаючи всі виробничі етапи від дослідження сировинних матеріалів до встановлення технологічних параметрів випалу.

Було поставлено наступні задачі:

- дослідити глинисту сировину різних родовищ;
- скласти композиційні суміші для отдержання зразків будівельної кераміки;
- визначити характеристики дослідних зразків, встановити основні параметри технологічного процесу та надати рекомендації щодо застосування мас у виробничих умовах.

#### **Методика експерименту**

Хімічний склад глинистих матеріалів визначали за допомогою рентгенівської флуоресцентної спектроскопії на приладі Rigaku ZSX Primus II (США).

Для ідентифікації та кількісного визначення кристалічних фаз у глинистій сировині використовували рентгенофазовий аналіз за допомогою рентгенівського дифрактометра PANalytical MPYREAN (Великобританія).

Диференційно-термічний аналіз здійснювали за допомогою термічного аналізатора NETZSCH STA 409 EP (Німеччина).

Гранулометричний склад глин визначали за допомогою седиментографа FRITSCH «Analysette microtec» (Німеччина).

Характеристики дослідних сировинних ма-

теріалів, керамічних мас та випалених зразків цегли (число пластичності, усадка, межа міцності при вигині, втрата ваги за відношенням до сухого виробу, водопоглинання, уявна питома вага, наявність висолів, наявність відколів (рекарбонізація), соляний наліт) визначали стандартними способами.

#### **Результати досліджень властивостей добавок і керамічних зразків**

Для досліджень було обрано глинисті матеріали Дружківського (Донецька область) та Залютинського (Харківська область) родовищ, а також глинисті відходи збагачення циркону Вільногірського ГМЗК (Дніпропетровська область). Вибір глинистих матеріалів було зроблено з огляду на доступність сировини у центрально-східному регіоні країни та можливість її транспортування до виробництва галузі. Глини Залютинського родовища комплексно досліджуються вперше і відкривають широкі можливості їх застосування у інших технологіях. Хімічний склад дослідних проб глинистої сировини наведено в табл. 1, мінералогічний – у табл. 2.

За вмістом  $Al_2O_3$  вся глиниста сировина відноситься до напівкислих матеріалів, а за кількістю  $Fe_2O_3 + TiO_2$  – до глин із середнім та високим вмістом забарвлюючих оксидів. Також

глинисті матеріали містять підвищену кількість  $K_2O$ , що у поєднанні з забарвлюючими оксидами вказує на легкоплавкість сировини. Втрати при прожарюванні (впп) найбільші у глини 1 (8,37%), найменші – у глини 3 (4,79%).

Дослідні глинисті матеріали відносяться до полімінеральної глинистої сировини. Так, дружківська глина 1 і 2 є переважно каолініт-гідрослюдистими, а глина №1 містить ще до 10% монтморилоніту.

Глина 3 є гідрослюдиною (іліт/мусковіт до 17,2%) з підвищеним вмістом (до 67,3%) кварцового піску; наявні також домішки польовошпатових мінералів до 13,3%. Найбільш різноманітний мінералогічний склад містить глина 4 – сумарно до 56,5% глинистих мінералів (каолініт, іліт, монтморилоніт), 31,4% вільного кварцу і численну кількість домішок – польовошпатових мінералів, анатазу, кальциту, доломіту гематиту. Відходи збагачення циркон-ільменітовий пісків (глина 5) є каолініт-ілітовою сировиною із вмістом вільного кварцу до 40,6% та польовошпатових мінералів альбіту та мікрокліну сумарно до 9,2%.

Результати диференційно-термічного аналізу глинистих матеріалів наведені на рис. 1. З наведених даних видно, що каолініт-ілітові гли-

Таблиця 1

**Хімічний склад дослідних глинистих матеріалів, мас.%**

Проба глини	Назва матеріалу (родовище)	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	впп
1	Глина 1 (Дружківське)	58,5	25,9	1,60	1,42	0,45	0,70	0,49	2,33	–	8,37
2	Глина 2 (Дружківське)	71,2	17,2	1,42	1,35	0,23	0,41	0,47	2,00	0,01	5,41
3	Глина 1 (Залютинське)	75,0	11,3	4,47	0,42	0,47	0,51	0,70	1,95	0,07	4,79
4	Глина 2 (Залютинське)	59,5	18,1	6,86	0,91	1,43	2,32	0,56	3,15	0,05	6,49
5	Відходи збагачення цирконільменітових пісків Вільногірського ГМК	59,5	23,9	3,08	1,82	0,75	0,83	0,42	0,90	0,12	8,27

Таблиця 2

**Мінералогічний склад дослідної сировини, мас.%**

Проба глини	Каолініт	Іліт/мусковіт	Кварц	Хлорит/монтморилоніт	Мікроклін	Анагаз	Альбіт/плагіоклаз	Біотит	Кальцит	Доломіт	Гематит
1	28,7	24,4	23,1	10,2	7,9	3,2	2,6	–	–	–	–
2	18,8	17,4	56,7	–	4,8	2,2	–	–	–	–	–
3	–	17,2	67,3	–	6,8	–	6,5	2,3	–	–	–
4	7,9	30,9	31,4	17,7	1,1	0,8	4,9	–	1,6	1,4	2,21
5	38,1	7,9	40,6	–	5,1	4,26	4,04	–	–	–	–

ни 1, 2 і 5 мають переважно два термічні ефекти: ендоефект з максимумами при 556, 536 та 551<sup>0</sup>С, відповідно, пов'язаний із видаленням хімічно зв'язаної води із структури глинистих мінералів; і екзоэффект при 969, 968 та 926<sup>0</sup>С, відповідно, що свідчить про кристалізацію первинного муліту у спеченому матеріалі. Цікавим є той факт, що, ймовірно, ступінь кристалізації каолінітових часток є вищим у глини 5, оскільки кристалізація первинного муліту починається при більш низькій температурі (у порівнянні з першими двома глинами). Мулітизація також сприяє наявності польовошпатових домішок в даній сировині.

Глина містить слабо виражені ефекти, характерні глинистим мінералам – дегідратація ілітової складової відбувається при 514<sup>0</sup>С, а ознаки кристалізації первинного муліту спостерігаються при 913<sup>0</sup>С. Оскільки іліт є метастабільною сировиною, то екзоэффект, пов'язаний із кристалізацією муліту, зсунутий у бік менших температур, що свідчить про вищу реакційну здатність даної сировини при термічному обробленні.

Глина 4 має два ендоефекти, пов'язані з дегідратацією глинистих мінералів при 533<sup>0</sup>С (каолініту, іліту) і 730<sup>0</sup>С (монтморилоніту), при цьому екзоэффект, що свідчив би про мулітизацію проби, відсутній.

Більшість глинистої сировини містить органічні домішки, про що свідчать розмиті екзотермічні ефекти при різних температурах у межах 300–400<sup>0</sup>С.

Розподіл гранулометричного складу глинистої сировини наведено на рис. 2. Найбільше

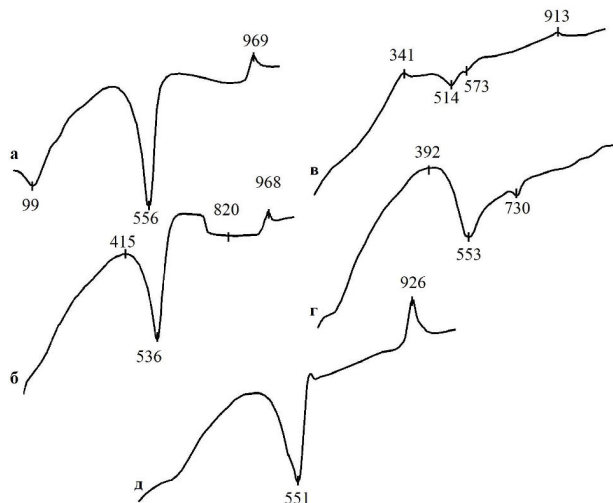


Рис. 1. Термограми дослідних глинистих матеріалів: а – глина 1, б – глина 2, в – глина 3, г – глина 4, д – глина 5

крупнодисперсної фракції (більше 63 мкм) наявне у глині 3, а найбільше тонкодисперсної фракції (менше 2 мкм) міститься у глині 1.

Для дослідження фізико-керамічних властивостей глинистої сировини були виготовлені зразки із застосуванням методу формування жорсткої екструзії (stiff extrusion).

Сушіння здійснювали за типом Paarl (через пластичність сумішей стало необхідним визначення традиційних параметрів сушіння). Випал, у тому числі поступовий, здійснювали при температурі 1040<sup>0</sup>С для дослідження необхідних фізичних властивостей, механічної міцності та водопоглинання. Тепловий градієнт при попередньому нагріванні становив 300<sup>0</sup>С/год, а витримка при максимальній температурі тривала 60 хв.

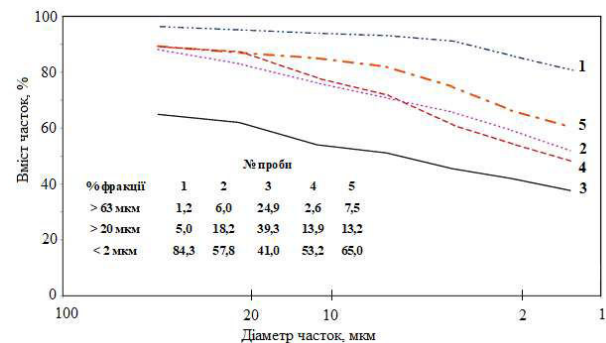


Рис. 2. Криві розподілу гранулометричного складу глинистих матеріалів

За наведеними результатами (табл. 3) високодисперсна глиниста сировина 1, змішаної мінералогічної природи має високу пластичність (число пластичності 22). Для формування виробів методом екструзії ця глина потребує великої кількості води: щільні екструдовані вироби можна отримати при робочій вологості 27,1%. Візуально відмічена наявність яскраво вираженого розшарування під час екструзії. Міцність сухих зразків при стисканні становить 22 кг/см<sup>2</sup>. Після випалу є деформації, загальна усадка складає 11,6%, водопоглинання 8,1%. Межу міцності при стисканні після випалу зразки мають у середньому 184 кг/см<sup>2</sup>. Такий невисокий показник пов'язаний головним чином з закладеними внутрішніми напруженнями під час формовки внаслідок розшарування глинистої маси, а також рихлуватою структурою виробів із-за підвищеного вмісту води у формувальній суміші.

Глина 2 є більш придатною для формовки виробів методом екструзії: вона має меншу робочу вологість (20,5%), відсутнє залипання та

розшарування формувальної маси. Механічна міцність при стисканні сухих зразків становить 35 кг/см<sup>2</sup>, випалених – 260 кг/см<sup>2</sup>. Усадка після випалу дорівнює 2%, водопоглинання – 9,7%.

Глина 3 – найбільш опіснена з усіх дослідних в даній роботі (число пластичності 11). Для формування шляхом екструзії вона потребує підвищеної кількості води для зв'язування глинистих часток, але під час екструзії виріб виходить рихлий. Низькою є механічна міцність сухих (15 кг/см<sup>2</sup>) та випалених (102 кг/м<sup>2</sup>) зразків. Після випалу при 1040°C матеріал має ознаки перевипалу, що і пояснює низькі значення механічної міцності, деформується (усадка при випалі 7,2%), має високе значення водопоглинання – 21,5%.

Літо- та хлоритовмісна глина 4 має дрібнозернистий гранулометричний склад. Формування виробів екструзією та сушіння не викликало суттєвих складнощів, але напівфабрикати мали низьку щільність. Міцність сухих зразків виробів відносно невисока – 31 кг/см<sup>2</sup>. При 1040°C матеріал деформується з усадкою при випаленні 6,8%. Механічна міцність при стисканні 330 кг/см<sup>2</sup>, водопоглинання випалених виробів 4,5%. Необхідно відмітити цікавий жовто-рожевий колір випаленої проби, що схожа на «античну цеглу».

Глинисті відходи 5 – дрібнозернистий матеріал з високим вмістом каолініту. Він є достатньо пластичним для екструзії і має високу щільність навіть із вмістом 25% води у формувальній суміші. Проте, через недостатню зв'яз-

ності маси, вироби-напівфабрикати покриті дрібними тріщинами; механічна міцність сухих зразків невисока – 30 кг/см<sup>2</sup>. Випалені вироби деформуються при 1040°C, тому механічна міцність зразків, випалених при даній температурі, є також невисока (150 кг/см<sup>2</sup>) через наявність внутрішніх напружень, закладених під час формовки в екструдері. Виріб має незначні розшарування та дрібні тріщини. Усадка при випалі 5,4%, водопоглинання зразків становить 3,8%. Відмічено, що зразки мають світло-каштановий колір.

Порівнюючи дилатометричні криві, які відображають зміну лінійних розмірів випалених зразків із дослідних глин (рис. 3) в залежності від температури, можна заключити, що найменші зміни лінійних розмірів у бік розширення мають зразки із глини 5 (максимально 0,31% при температурі 600°C). Найбільші зміни лінійних розмірів характерні для зразків із глини 2 (максимально 1,1% в інтервалі температур 700–900°C). Термічне розширення залежить від вмісту та хімічного складу склоподібної фази в матеріалі [13]. Ймовірно, саме в цій глині у склофазу переходить більше оксидів лужних металів (при низькому вмісті тугоплавкого алюмінію оксиду), які чинять найбільший вплив у термічне розширення керамічного матеріалу.

Враховуючи отримані результати, при відпрацюванні складів шихт для формовки керамічної цегли методом екструзії було приготовлено суміші дослідних глин (табл. 4). Глинисті матеріали вводили в однаковому співвідно-

Таблиця 3

Характеристики дослідних зразків з глинистої сировини

Найменування властивості	Номер дослідної проби				
	1	2	3	4	5
Сушильні властивості:					
Вода суміші за вагою сухого виробу при 75°C, %	27,1	20,5	46,8	21,3	25,2
Число пластичності	22	17	11	21	9
Усадка при сушінні, %	5,8	5,4	5,8	4,7	7,5
Чутливість до сушіння, см	20	20	20	20	20
Межа міцності при стисканні, кг/см <sup>2</sup>	22	35	15	31	30
Випалові властивості:					
Втрата ваги по відношенню до сухого виробу, %	9,5	6,05	5,9	6,8	10,4
Загальна усадка по відношенню до сухого виробу, %	11,6	7,4	13	11,5	12,9
Усадка при випалі, %	5,8	2	7,2	6,8	5,4
Межа міцності при стисканні, кг/см <sup>2</sup>	184	260	102	330	150
Водопоглинання, %	8,1	9,7	21,5	4,5	3,8
Уявна питома вага, г/см <sup>3</sup>	1,96	1,93	1,7	2,4	2,2
Наявність висолів ASTM	немає	немає	немає	немає	немає
Наявність відколів (рекарбонізація)	немає	немає	немає	немає	немає
Соляний наліт	немає	немає	немає	є	немає

шенні, а у маси С, С1 та С2 додатково водили опіснюючий компонент (шамот) у кількості 10%.

Таблиця 4

Глинисті композиції для одержання керамічної цегли

Компоненти	Склад суміші			
	М1	С	С1	С2
Глина 1	+			+
Глина 2			+	
Глина 3	+			
Глина 4		+	+	+
Глина 5	+	+	+	+
Опіснювач		+	+	+

Дослідні суміші ретельно усереднювали, зволожували, методом екструзії формували зразки та випалювали при температурах 1020 і 1040°C з витримкою при максимальній температурі 30 хв. Властивості керамічних мас та випалених зразків наведені в табл. 5, графіки насичення найбільш вдалих зразків складів С1 і С2 – на рис. 4.

Аналіз параметрів зразків складу М показав, що нормальна робоча вологість маси, необхідна для екструзії, виявилась достатньо високою (40,0%) внаслідок чого було отримано низь-

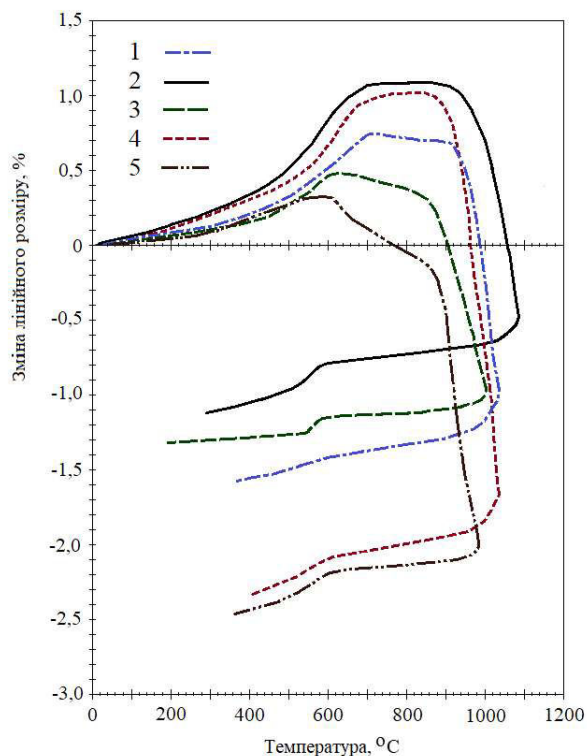


Рис. 3. Графіки залежності зміни лінійних розмірів випалених зразків із дослідних глин від температури

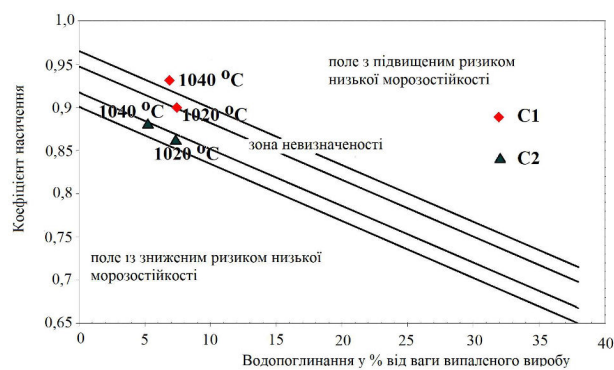


Рис. 4. Коефіцієнт насичення дослідних зразків С1 і С2

ку щільність екструдованих зразків та невисоку міцність при стисканні у напівфабрикатів (38 кг/м<sup>2</sup>). Фізичні та механічні характеристики випалених зразків цього складу також є недостатніми для лицьової кераміки: водопоглинання 16,9%, а механічна міцність при стисканні – 130 кг/см<sup>2</sup>.

Композиція С має меншу нормальну робочу вологість (26,6%) за рахунок більшого опіснення базової глинистої композиції, а також введення додатково 10% опіснювача. Менша кількість води дозволила отримати екструдований виріб з більшою щільністю у порівнянні зі зразками складу М – такою, яка дозволить витримати завантаження сирих виробів на пічні вагони. А додавання шамоту дозволило усунути дрібні тріщини на екструдованому зразку й збільшити міцність сухих виробів (до 48 кг/см<sup>2</sup>).

Випал зразків складу С показав, що при 1020°C вогнева усадка становить 2,6%, а водопоглинання 8,5%. При більш високій температурі усадка становить 4,3%, а поглинання 8%.

Маса С1 відрізнялась від маси С введенням глини 2, що передбачало зменшення усадки виробів. Проте, показники водопоглинання випалених зразків залишились достатньо високими для якісної лицьової цегли. Коефіцієнти насичення між 0,9 і 0,94 вказують на невисоку морозостійкість виробів.

Зразки складу С2 після випалу при 1040°C мали 4,2% вогневої усадки і 5,1% водопоглинання. Коефіцієнт насичення  $W_s=0,89$ , що показує тенденцію до більш високої морозостійкості зразків цього складу у порівнянні із С1. При температурі 1020°C усадка при випаленні 3,2%, водопоглинання 6,8%, а коефіцієнт насичення  $W_s=0,86$ .

Візуальні характеристики дослідних зразків після випалу наведені на рис. 5.

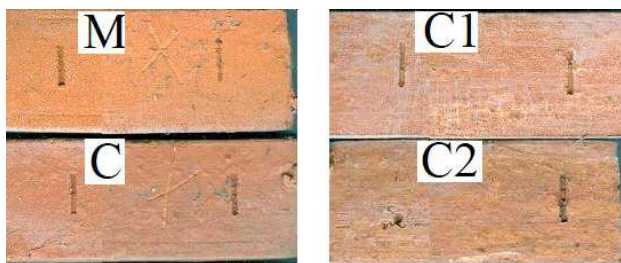


Таблиця 5

## Характеристики дослідних керамічних мас та випалених зразків цегли

Найменування властивості	Дослідна суміш							
	М		С		С1		С2	
Сушильні властивості:								
Вода суміші за вагою сухого виробу при 75 <sup>0</sup> С, %	40,0		26,6		23,8		21,0	
Число пластичності	17		12		13		16	
Усадка при сушінні, %	9,3		8,1		6,4		5,8	
Чутливість до сушіння, см	20		20		20		20	
Межа міцності при стисканні, кг/см <sup>2</sup>	38		48		48		59	
Випалові властивості:								
Втрата ваги по відношенню до сухого виробу, %	1020	1040	1020	1040	1020	1040	1020	1040
Загальна усадка по відношенню до сухого виробу, %	6,6	6,9	7,2	7,4	6,0	6,1	6,8	6,9
Усадка при випалі, %	2,7	3,0	2,6	4,3	2,6	3,0	3,2	4,2
Межа міцності при стисканні, кг/см <sup>2</sup>	130	140	231	243	210	225	240	245
Водопоглинання, %	16,9	15,4	8,5	8,0	8,2	7,5	7,8	5,1
Уявна питома вага, г/см <sup>3</sup>	1,9	1,9	2,1	2,2	2,0	2,1	2,1	2,2
Наявність висолів ASTM	немає		немає		немає		немає	
Наявність відколів (рекарбонізація)	немає		немає		немає		немає	
Соляний наліт	легкий		легкий		легкий		немає	

Таким чином, за комплексом отриманих властивостей для виготовлення виробів методом жорсткої екструзії, придатними для подальших випробувань виявились композиційні суміші С1 і С2, при чому характеристики зразків з композиції С2 дозволяють прогнозувати можливість отримання лицьових виробів, наближених до клінкерної цегли.

Рис. 5. Дослідні зразки після випалу при 1020<sup>0</sup>С**Обговорення результатів досліджень**

Підходи до проектування складів мас для виготовлення керамічної цегли мають базуватись на вивченні фазового складу та мікроструктури керамічних виробів [14]. Головними особливостями керамічної маси для виготовлення лицьових і клінкерних виробів є наявність у її складі опіснюючих добавок, які забезпечують стійкість виробів до деформації під час випалу, і плавнів, які мають забезпечити інтенсивне рідкофазне спікання. При випалі таких виробів потрібно правильно вибрати температурно-часовий режим, який буде відповідати інтервалу спікання

основного глинистого матеріалу. Це необхідно для того, щоб, з одного боку, отримати міцну щільну структуру виробу з водопоглинанням в межах 6%, а з іншого – уникнути таких видів браку, як деформація, розтріскування, «переви-пал», спучування, тощо.

Якісну керамічну цеглу отримують на основі полімінеральної сировини [15], яка містить легкоплавкі і вогнетривкі глини, суглинки, гранітоїдні відсівки та інші опіснюючі та спікаючі добавки. Отримані дані про оксидно-мінеральний склад дають змогу прогнозувати склад шихти для виробництва лицьової та клінкерної цегли, режими термічного оброблення та властивості виробів.

У дослідних композиційних сумішах (табл. 1, 2) полімінеральний склад забезпечується повною мірою. Позитивним є те, що мінералі-плавні (мікроклін, альбіт, кальцит та ін.) вже присутні у глинах і вдається досягти спікання сировини при відносно невисоких для випалу лицьової цегли температурах 1020–1040<sup>0</sup>С, навіть не застосовуючи такі дорогі плавні, як склобій. Щодо опіснення маси, в результаті досліджень формуальної здатності сировини було з'ясовано, що вміст природного опіснювача – кварцового піску, який є у кожній з дослідних глин в різній кількості, в цілому недостатній. В цьому випадку було вирішено використовувати подрібнений шамот. Він не має термічних перетворень зі зміною об'єму, як кварц, а також більш інтенсивно «сплавляється» з основною склому-

літовою масою під час рідкофазного спікання.

Додавання шамоту є фундаментальним для того, щоб вироби, сформовані з керамічної маси, не мали дрібних тріщин, а також щоб знизити відсотковий вміст води при екструзії. Також введення шамоту дозволяє зменшити усадку та досягти збільшення механічної міцності сухих виробів. Окрім того, технологічні операції переміщення цих виробів стають легшими і зазвичай призводять до меншої кількості браку.

Найкращими за характеристиками керамічної маси та властивостями випалених виробів виявились зразки композиції С2. Із формувальної маси методом екструзії отримали зразки з вмістом 21% води від сухого виробу.

Необхідно зауважити, що маючи на увазі екструзію глинистої композиції шляхом «stiff extrusion», завжди необхідно прагнути до зменшення відсоткового вмісту води в суміші, і в подальших роботах можливо вдасться знизити вміст води ще приблизно на 2–3%. Можна припустити, що усадка при сушінні досягне 4–4,5%. Це міркування має бути підтверджено промисловими випробуваннями, оскільки неможливо досягти в лабораторії значень тиску для екструзії в подібних умовах.

Підвищений вміст води в суміші негативно впливає на усадку та щільність виробів, які потрібно садити на пічні вагони. З пакетами, що мають висоту приблизно 1,5 м, відповідно, виникають проблеми, пов'язані з їх стійкістю, через ефект диференційних усадок, відбувається розплющення виробів у нижніх шарах і цегла виходить нерівною.

Оскільки характеристики виробів, які передбачається виробляти з 45% порожнечі, повинні мати механічну міцність при стисканні 300 кг/см<sup>2</sup> водопоглинанням приблизно 6%, необхідно забезпечити більшу величину вогневої усадки, яка для отримання бажаного рівня водопоглинання повинна становити близько 3,5%.

Тому найбільш важливим є забезпечення стійкості пакетів шляхом повільного підвищення температури, починаючи з початку спікання 850–900°C. Потрібно також досягти вищезгаданої температури, уникаючи диференціальних розширень та подальшого розкриття пакетів при попередньому нагріванні. В даному випадку необхідно дуже уважно проводити повільну та диференційну термічну обробку, так як для виробництва цегли з даними характеристиками пакети зазвичай мають висоту 80 см, максимум 100 см.

Отже, найбільш раціональною для формування виробів методом жорсткої екструзії є ком-

позиція із дослідних глин під шифром С2. Одержання для даної суміші низьких значень величини водопоглинання, близько 6%, при коефіцієнті насичення порядку 0,90, призводить, на нашу думку, до підвищеної чутливості до морозу, яка могла б бути знижена при великих значеннях величини водопоглинання за рахунок збільшення відкритої пористості виробів. Для виробів такої пористості коефіцієнт насичення становить 0,78.

Для сушіння на пічних вагонетках, із вмістом води в шихті приблизно 20%, потрібно прийняти цикл сушіння мінімум 72 год. Щодо випалу, потрібно застосовувати два термічні градієнти: 50–60°C/год до 850°C, потім максимум 10–15°C/год до максимальної температури 1020–1040°C.

#### **Висновки**

Запропоновані основні підходи щодо розробки складів мас для виробництва керамічної цегли методом жорсткої екструзії; досліджено глинисті сировинні матеріали, які були визначені як потенційно доцільні для широкого застосування; встановлено склад композиційної суміші для отримання зразків лицьової кераміки достатньо високої якості, а на основі отриманих характеристик дослідних зразків надані рекомендації щодо застосування мас у виробничих умовах.

Композиційну шихту для виробництва цегли розроблено на базі глин Дружківського та Залютинського родовищ, а також глинистих відходів збагачення циркону Вільногірського ГМЗК.

Встановлено, що на базі даних матеріалів, шляхом формування методом жорсткої екструзії та застосуванням випалу при температурах 1020–1040°C, можливо одержати керамічну цеглу марки не нижче М225. Водопоглинання спечених виробів становить 5,1%, повітряна та вогнева усадки відповідно 5,8 та 4,2%, а механічна міцність при вигині 245 кг/см<sup>2</sup>.

Для сушіння у тунельних сушарках доцільно прийняти цикл сушіння мінімум 72 год, а при випалі застосовувати два термічні градієнти: 50–60°C/год до 850°C, потім максимум 10–15°C/год до максимальної температури 1020–1040°C.

В результаті спікання отриманий насичений жовто-коричневий з рожевим відтінком колір зразків без ознак висолів чи рекарбонізації, який є фактично класикою у цегельному виробництві.



## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Innovative directions for utilization of ferrous metallurgy waste in ceramic brick production* / Imangazin M.K., Abdrakhimova E.S., Abdrakhimov V.Z., Kairakbaev A.K. // *Metallurgist*. – 2017. – Vol.61. – P.111-115.
2. *Recycling wastes from ozokerite production in large-tonnage energy-conserving technology for fabricating construction ceramic* / Khomenko E.S., Koleda V.V., Mirshavka O.A., Ripak V.R. // *Glass Ceram.* – 2014. – Vol.71. – No. 3-4. – P.124-127.
3. *Incorporation of siliceous sand and lignite tailings from Miocene deposits (Zeramdine, Eastern Tunisia) in clay bricks and ceramic tiles: technological feasibility* / Imen M., Slim B., Fagel N., Gaied M.E. // *Arab. J. Geosci.* – 2021. – Vol.14. – Art. No. 282.
4. *The clayey quarry sludge from a waste to a valuable raw material for red ceramics* / Bouachera R., Kasimi R., Ibnoussina M., El Aoud M., Taha Y., El Boudour El Idrissi H., et al. // *J. Mater. Cycles Waste Manag.* – 2022. – Vol.24. – P.1047-1058.
5. *Energy saving technology for sintering of black bricks from high-siliceous clay* / Flores N.M., Vlasova M., Marquez Aguilar P., Kakazey M., Chavez C.M., Arroyo M.R., et al. // *MRS Adv.* – 2020. – Vol.5. – P.3123-3131.
6. *Cangussu N., Vasconcelos L., Maia L.* Environmental benefits of using sewage sludge in the production of ceramic bricks // *Environ. Sci. Pollut. Res.* – 2022.
7. *Kairakbaev A.K., Abdrakhimov V.Z., Abdrakhimova E.S.* Phase composition and physico-Mechanical properties at different firing temperatures of ceramic earthquake-resistant bricks with the use of ferro-dust // *Glass Ceram.* – 2021. – Vol.77. – P.478-482.
8. *Karasik O., Kozyreva T., Dushyn V.* Determination of the influence of aluminum phosphate on the properties of quartz ceramics // *East. Eur. J. Enterprise Technol.* – 2021. – No. 1. – P.15-21.
9. *Abdrakhimova E.S., Abdrakhimov V.Z.* Formation of glaze coatings of clinker bricks based on raw kaolin and aluminum-containing nanotechnogenic raw materials // *Inorg. Mater. Appl. Res.* – 2018. – Vol.9. – P.588-594.
10. *Development of engobe coatings based on alkaline kaolins* / Khomenko O., Datsenko B., Sribniak N., Nahorni M., Tsyhanenko L. // *East. Eur. J. Enterprise Technol.* – 2019. – Vol.6. – No. 6(102). – P.49-56.
11. *Belyi Ya.I., Zaichuk A.V.* Ceramic pigments for producing black glazes // *Glass Ceram.* – 2005. – Vol.62. – No. 9-10. – P.290-292.
12. *Zaichuk A.V., Belyi Y.I.* Improvement of the compositions and properties of gray ceramic pigment // *Glass Ceram.* – 2013. – Vol.70. – No. 5-6. – P.229-233.
13. *Karasik E.V., Hordieiev Yu.S.* Calculation of thermal expansion, glass transition temperature and glass density in the system  $RO-Al_2O_3-B_2O_3-SiO_2$  (where  $RO=BaO, SrO, CaO, MgO, ZnO$ ) // *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*. – 2020. – No. 6. – P.69-74.
14. *Khomenko E.S., Purdik A.V.* Particulars of microstructure formation in clinker ceramic // *Glass Ceram.* – 2017. – Vol.74. – No. 1-2. – P.48-51.
15. *Levitskii I.A., Khoruzhik O.N.* Relationship of properties, phase composition, and microstructure of clinker brick // *Glass Ceram.* – 2021. – Vol.78. – P.193-199.

Надійшла до редакції 26.04.2022

## DETERMINATION OF APPROACHES TO THE DEVELOPMENT OF CERAMIC COMPOSITIONS FOR THE MANUFACTURE OF FACIAL BRICKS

O.S. Khomenko <sup>a, \*</sup>, B.M. Datsenko <sup>b</sup>, G.V. Fomenko <sup>a</sup><sup>a</sup> Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnipro, Ukraine<sup>b</sup> Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

\* e-mail: elenahths@ukr.net

This paper considers the principles of designing a composite mixture for the production of ceramic facing bricks based on clay materials. The complex of conducted researches allows establishing rational technological parameters of molding and firing of ceramic products to achieve high values of operational properties. Composite charges were obtained based on clays from Druzhkovsky and Zalyutinsky deposits, as well as on clay wastes of zircon-ilmenite sand enrichment from Vilnohirska Mining and Metallurgical Plant. It was established that based on these materials by forming via the method of rigid extrusion and application of firing at temperatures of 1020–1040°C, it is possible to fabricate a ceramic brick of grade not lower than M225.

**Keywords:** clay; face brick; composite mixture; charge; plasticity; extrusion; firing; sintering; shrinkage; water absorption; mechanical strength.

## REFERENCES

1. Imangazin MK, Abdrakhimova ES, Abdrakhimov VZ, Kairakbaev AK. Innovative directions for utilization of ferrous metallurgy waste in ceramic brick production. *Metallurgist*. 2017; 61, 111-115. doi: 10.1007/s11015-017-0462-4.
2. Khomenko ES, Koleda VV, Mirshavka OA, Ripak VR. Recycling wastes from ozokerite production in large-tonnage energy-conserving technology for fabricating construction ceramic. *Glass Ceram.* 2014; 71: 124-127. doi: 10.1007/s10717-014-9633-y.
3. Imen M, Slim B, Fagel N, Gaied ME. Incorporation of siliceous sand and lignite tailings from Miocene deposits (Zeramdine, Eastern Tunisia) in clay bricks and ceramic tiles: technological feasibility. *Arab J Geosci.* 2021; 14, 282. doi: 10.1007/s12517-021-06582-w.
4. Bouachera R, Kasimi R, Ibnoussina M, El Aoud M, Taha Y, El Boudour El Idrissi H, et al. The clayey quarry sludge from a waste to a valuable raw material for red ceramics. *J Mater Cycles Waste Manag.* 2022; 24: 1047-1058. doi: 10.1007/s10163-022-01383-z.
5. Flores NM, Vlasova M, Marquez Aguilar P, Kakazey M, Chavez CM, Arroyo MR, et al. Energy saving technology for sintering of black bricks from high-siliceous clay. *MRS Advances*. 2020; 5: 3123-3131. doi: 10.1557/adv.2020.369.

6. Cangussu N, Vasconcelos L, Maia L. Environmental benefits of using sewage sludge in the production of ceramic bricks. *Environ Sci Pollut Res*. 2022. doi: 10.1007/s11356-022-18670-9.
7. Kairakbaev AK, Abdrakhimov VZ, Abdrakhimova ES. Phase composition and physico-mechanical properties at different firing temperatures of ceramic earthquake-resistant bricks with the use of ferro-dust. *Glass Ceram*. 2021; 77: 478-482. doi: 10.1007/s10717-021-00336-6.
8. Karasik O, Kozyreva T, Dushyn V. Determination of the influence of aluminum phosphate on the properties of quartz ceramics. *East Eur J Enterprise Technol*. 2021; 1: 15-21. doi: 10.15587/1729-4061.2021.224220.
9. Abdrakhimova ES, Abdrakhimov VZ. Formation of glaze coatings of clinker bricks based on raw kaolin and aluminum-containing nanotechnogenic raw materials. *Inorg Mater Appl Res*. 2018; 9: 588-594. doi: 10.1134/S2075113318040020.
10. Khomenko O, Datsenko B, Sribniak N, Nahornyi M, Tsyhanenko L. Development of engobe coatings based on alkaline kaolins. *East Eur J Enterprise Technol*. 2019; 6(102): 49-56. doi: 10.15587/1729-4061.2019.188126.
11. Belyi YI, Zaichuk AV. Ceramic pigments for producing black glazes. *Glass Ceram*. 2005; 62: 290-292. doi: 10.1007/s10717-005-0094-1.
12. Zaichuk AV, Belyi YI. Improvement of the compositions and properties of gray ceramic pigment. *Glass Ceram*. 2013; 70: 229-233. doi: 10.1007/s10717-013-9550-5.
13. Karasik EV, Hordieiev YuS. Calculation of thermal expansion, glass transition temperature and glass density in the system RO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> (where RO=BaO, SrO, CaO, MgO, ZnO). *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*. 2020; (6): 69-74. doi: 10.32434/0321-4095-2020-133-6-69-74.
14. Khomenko ES, Purdik AV. Particulars of microstructure formation in clinker ceramic. *Glass Ceram*. 2017; 74: 48-51. doi: 10.1007/s10717-017-9926-z.
15. Levitskii IA, Khoruzhik ON. Relationship of properties, phase composition, and microstructure of clinker brick. *Glass Ceram*. 2021; 78: 193-199. doi: 10.1007/s10717-021-00377-x.