

УДК 662.613.13

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.6/29>**Спасьонова Л.М.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Суббота І.С.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Готорук А.Є.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ВИКОРИСТАННЯ ЗОЛОШЛАКОВИХ ВІДХОДІВ ТЕПЛОЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА БУДІВЕЛЬНОЇ КЕРАМІКИ

Об'єктом дослідження є керамічні будівельні матеріали, які в сучасному світі залишаються одними з основних у будівельній індустрії. Перед підприємствами гостро стоїть проблема збільшення об'єму виробництва. Головною проблемою для галузі є забезпечення підприємств високоякісною сировиною, запаси якої постійно зменшуються. У зв'язку з дефіцитом глинистої сировини ця проблема не може бути розв'язана без застосування місцевої легкоплавкої глини та залучення відходів виробництва.

Розвиток теплоенергетики призвів до значного накопичення відходів, що утворюються у процесі виробництва. Відходи забруднюють довкілля і водночас є цінною мінеральною сировиною, яка може бути використана для виробництва будівельних матеріалів.

В результаті науково-дослідної роботи досліджено місцеву глинисту легкоплавку сировину з добавками золошлакових відходів, визначені раціональні склади сировинних мас, що дозволяють поліпшити технологічні властивості готової продукції. Відходи теплових станцій у вигляді золи можна використовувати без попереднього їх подрібнення, а отже без додаткових енергетичних витрат, що дозволяє розширити сферу корисного використання вторинної сировини та знизити собівартість готової продукції.

При дослідженні фізико-механічних властивостей керамічних мас на основі відходів теплоелектростанцій встановлено підвищення їх чутливості до сушіння в 2,8 разів, міцності на стиск у 1,8 разів, морозостійкості до 25 циклів. Також отримані результати свідчать, що усадка після сушіння і випалу та водопоглинання зменшилися. Проведені дослідження показали, що місцева мінеральна сировина, з відпрацюванням технологічних режимів, може бути використана для виробництва будівельної кераміки, яка буде необхідна після закінчення воєнного стану для відновлення України.

Ключові слова: екологічна технологія, відходи теплоелектростанцій, утилізація відходів, будівельна кераміка, легкоплавка глина.

Постановка проблеми. У сучасних умовах необхідно нарощувати темпи цивільного будівництва, яке супроводжується збільшенням обсягів виробництва будівельних матеріалів. Економічна ситуація, що склалася в країні, вимагає зниження витрат на усіх етапах виробництва. Одне з провідних місць на ринку будівельних матеріалів займає керамічна промисловість. Головною проблемою для галузі є забезпечення підприємств високоякісною сировиною, яка неоправно виснажується. У виробництво керамічних будівельних матеріалів залучається все більше низькосортної сировини, використання якої без кори-

гуючих добавок не дозволяє отримувати вироби з необхідними технічними характеристиками. Для регулювання властивостей кераміки, зниження собівартості виробництва застосовують в якості добавки відходи місцевої промисловості. Однією з таких добавок є відходи теплових електростанцій. Незважаючи на значний досвід у вживанні їх для виробництва будівельної кераміки об'єм цих відходів залишається значним, що приводить до необхідності подальшого вдосконалення способів їх використання. Тому актуальними є дослідження присвячені розширенню сировинної бази завдяки залученню місцевої легкоплавкої

сировини з додаванням відходів для створення керамічних будівельних матеріалів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. В роботі [1] наведені результати досліджень впливу викидів ТЕС. Показано, що близько 32% земель України забруднені викидами ТЕС. Використання промислових відходів у виробництві будівельних матеріалів дозволяє до 40% задовольнити потребу в сировині цієї галузі, на 10...30% знизити витрати на виробництво будівельних матеріалів із природної сировини, при економії капітальних вкладень до 35...50%. Дане джерело дає підґрунтя та озвучує необхідність аналізу властивостей та безпечності отриманих матеріалів. Дані дослідження в роботі проведені не були, бо стосувались саме економічних переваг використання відходів у виробництві.

У дослідженні [2] зола винесення – найдрібніші частинки потоку газів та один із основних видів відходів ТЕС при спалюванні вугілля розглядається як активна мінеральна добавка при виробництві в'язучих, силікатних та керамічних виробів. В роботі використовується підхід теоретичного розгляду складу та будови золи та отриманих з неї скломатеріалів. За результатами досліджень вміст SiO_2 у золі в переважно не більше 41...54%. Вміст оксидів алюмінію, заліза, кальцію та магнію досить близькі за своїм значенням. Мінеральна частина зол ТЕС на 90...92% складається зі скла – склоподібної фази. Основним компонентом цієї фази є кремнезем, який значною мірою формує фізичні та хімічні властивості золи і бере участь як основний компонент у процесах гідратаційного твердіння та у процесах синтезу, утворюючи різні гідросилікати.

Зола складається із високозалізного алюмосилікатного скла з домішками лужних та лужноземельних металів. У більшості природних сполук іони алюмінію та заліза знаходяться у шестерній координації. Однак за високих температур іони цих елементів можуть змінювати свою координацію з утворенням тетраедричних угруповань, чому сприяє присутність оксидів K , Ca , Mg . В тетраедричних угрупованнях алюміній і залізо виступають поряд з кремнієм як склоутворювачі, а в октаедричних – як модифікатори.

Склофаза золи мікронеоднорідна. Природа неоднорідностей може мати як ліквіційний, і флуктуаційний характер. Ліквіційні явища можуть призводити до утворення мікроділянок, що майже повністю складаються з Al_2O_3 , так як іон алюмінію має більше значення електростатичного силового поля, ніж інші іони.

Навіть при несприятливих режимах горіння частка дійсно шкідливих частинок від загального вмісту горючих становитиме лише близько 8% (якщо третина частинок, що не згоріли, не встигне пройти стадію коксування). Тому навіть у золах із високим значенням частинок, що не згоріли (близько 20...30%), вміст шкідливих частинок буде невеликим (1,5...2,5%). Це свідчить, що їх додавання не може надати помітного негативного впливу на властивості отриманих матеріалів. Отже, це дає підстави стверджувати, що зола за складом може бути використана у якості добавки до керамічної маси. Автори дослідили фізико-хімічні процеси та структуру сировини та отриманих виробів, проте необхідно ще приділити увагу механічним властивостям продукту виробництва. Придільена увага теоретичній складовій, але без практичного виготовлення та випробування контрольних зразків дослідження є неповним. Такі результати не можна вважати підґрунтям для впровадження використання добавки золи в шихту без фізико-механічних досліджень.

В дослідженні авторів [3] показано, що розмір сферичних частинок золи коливається від небагатьох мікронів до 50–60 мкм. Введення у шихту 12,15% мелених золошлакових відходів Придніпровської ТЕС, 3,5% піритних огарків і 0,75–1,25% електролітів поліпшує фізико-механічні характеристики. Є не вирішені питання: не врахована усадка та пластичність зразків, а без цих параметрів важко судити про можливість використання такого продукту.

Введення до шихти золи ТЕС, що утворилася від спалювання донецького вугілля, за результатами авторів [3], збільшує віддачу вологи, скорочує термін висихання на 20–25%. Встановлено також, що оптимальна кількість зол становить 20–30%.

Для покращення якості цегли при використанні високочутливої до сушіння глини в складі шихти замість 15% тирси пропонується 30% летючої золи. Таким чином виникає можливість отримання цегли марок 125–150, з гарною морозостійкістю. Знижується собівартість одиниці продукції, але не оцінена безпечність отриманих виробів. Також у роботі залишилось невирішене питання, що могло б пояснити отримані результати. Отже, не розкрито питання завдяки яким чинникам збільшення вмісту золи у зразку покращує його властивості.

Автори [4] зазначили, що існує багато сфер застосування золи теплових електростанцій, де її можна використовувати: як теплоізоляційний

матеріал, мінеральні добрива, у будівництві доріг як асфальтобетонну основу та ін. Розглянуто достатньо способів використання корисних властивостей золи. Наприклад, отримання сухої будівельної суміші шляхом механічного подрібнення, вилучення корисних елементів хімічним шляхом. Це дає можливість отримати високоякісні комплексні мінеральні добрива. Шляхом ситового сепарування можна отримати основу для будівництва доріг на територіях ТЕС, що сприяє покращенню екологічної ситуації в районах їх розміщення.

Аналіз зразків дослідження [4] після геліотермічного хімічного впливу показує, що зі збільшенням щільності, їх маси та об'єму водопоглинання зменшуються, коефіцієнт розм'якшення золошлакових матеріалів незначний (3–4%). Різке зниження водопоглинання спостерігається у разі механохімічної активації системи за оптимальних температурних умов, що свідчить про значне зменшення капілярної та відкритої пористості структури. Токсикологічний аналіз не проводили.

В усіх використаних композиціях зразків з добавками модифікованого пластифікатора та вапна спостерігається достатньо висока морозостійкість, що відповідає вимогам будівельних норм, проте не підібраний оптимальний вміст додавання шлаку до шихти на основі порівняльного аналізу. Є доцільним проведення такого дослідження у майбутньому.

Автори [5] пропонують використання вугільної золи для виробництва легкого бетону з щільністю в діапазоні 1560–1960 кг/м³. Міцність на стиск такого матеріалу протягом 28 днів коливається в діапазоні 20–40 Н/мм². Також золу пропонують використовувати як часткову заміну природних заповнювачів, а більш дрібну – як пісок.

Відсоток золи, який можна використовувати в складі суміші, залежить від її якості та необхідної міцності продукту. Включення золи має більш виражений вплив на опір розтягу, ніж на міцність на стиск, зниження міцності на розрив майже не помітно, якщо мінімальний вміст цементу становить 365 кг/м³.

Усадка при висиханні зменшилася зі збільшенням вмісту золи. Бетон із золи демонструє меншу усадку при висиханні порівняно з контрольними зразками. Через підвищену потребу у воді суміші золи має набагато більший ступінь текучості.

Зола-винесення та зола підвищують вогнестійкість матеріалів, головним чином завдяки широкому плато випаровування, яке утворює ця зола в результаті збільшення водопоглинання пористих заповнювачів.

Недоліками такого використання у дослідженні [5] є нижчий модуль пружності зольних сумішей, необхідність більшого вмісту води та збільшення часу схоплювання суміші зі збільшенням відсотка золи. Необхідне дослідження класу безпечності таких виробів та морозостійкості, для забезпечення усіх складових для використання отриманих матеріалів. Цікавим є розгляд такого застосування, що дає за аналогією застосувати схожі методики та випробування для виробництва керамічних виробів.

Автори [6] виявили, що завдяки складу температура плавлення золи-винесення відносно низька. Враховуючи ці характеристики, летючу золу можна оскловувати, і якщо її розплавити при температурах вище 1300 °С, утворюється відносно інертне скло, а контрольовану кристалізацію можна індукувати на склі на основі золи-винесення.

У роботі застосований підхід контролювання якості отриманих зразків за показниками мікротвердості. Значення мікротвердості в кераміці на основі золи зменшуються зі збільшенням часу витримки при температурі зародження, що пояснюється співвідношенням Холла-Петча. Значення твердості склокераміки, зародженої при 680 °С/5 год, відповідає приблизно 7,2 за шкалою Мооса і є вищим за типові значення твердості до подряпин для плитки для підлоги (від 5 до 7 Мооса). Однак це менше, ніж значення стійкості до подряпин, зареєстровані для склокерамічних матеріалів на основі шлаку. Окрім значень мікротвердості, твердості на зношення, необхідне дослідження інших фізико-хімічних властивостей отриманого матеріалу та його безпечності. Тільки більш комплексні дослідження і їх результати можуть бути використані для гарантування якості виробів зі шлаку.

Кристалізація стеклооснові золи відбувається при температурах вище 671 °С з утворенням лише діюксидної фази в матриці вихідного скла. Склокераміка, що зародилася при температурі 680 °С, мала мікроструктуру з кристалітів розміром від 0,2±0,5 мкм. Розмір кристалів збільшується з часом витримки. Збільшення розміру зерна призводить до загального зниження механічних властивостей, таких як мікротвердість і стійкість до зношування. Склокерамічний матеріал на основі легкої золи з оптимальними властивостями для дослідження [6] є матеріал, що зароджувався при 680 °С протягом 5 год із мікротвердістю 907 кг/мм² і зносом близько 270 мм³/м.

Автори [7] тестували скляні, керамічні та склокерамічні вироби виготовлені із золи-винесення

ТЕС без будь-яких добавок. Було виявлено аморфну фазу зразка скла. У зразку склокераміки виявлено фазу авгіту, а в зразках кераміки – фази енстатиту та муліту. Крихітні кристалити однорідно дисперговані в мікроструктурі склокерамічного зразка, а в керамічних зразках утворилися витягнуті кристали. За токсикологічними випробуваннями виготовлені зразки можна вважати нешкідливими матеріалами. Виготовлені зразки показали високу стійкість до розчинів лугів на відміну від кислотних. Мікроструктурні, фізико-хімічні та механічні властивості отриманих зразків склокераміки кращі, ніж у виготовлених зразків скла та кераміки, що вказує на пріоритетність їх виготовлення з даної сировини. Необхідний підбір оптимальних співвідношень вмісту золи-винесення у виробках для отримання вищих експлуатаційних властивостей.

За інформацією з джерела [8] хімічний склад золи-винесення є типовим: склоподібна потрійна система ($\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$) зі значною кількістю оксидів металів, які здатні діяти для зародження і кристалізації. Вказано, що зола-винесення значно зручніша за доменні та сталеварні шлаки у склокерамічному виробництві. Це досягається завдяки доступності у формі тонкого порошку, що робить його готовим для змішування інших інгредієнтів у партії та у більшій кількості, ніж шлак.

Результатами роботи [8] є виявлена закономірність впливу різної тривалості витримки при температурі кристалізації на мікроструктуру та властивості отриманих зразків склокераміки. Механічні властивості та коефіцієнт теплового розширення зразків склокераміки залежать лише від кількості кристалічної фази, а хімічна стійкість має високе значення. Також робота містить підібраний оптимальний час витримки зародження та кристалізації, але не враховано залежність даних параметрів від кількості доданої золи-винесення та безпечність продукції.

У дослідженні [9] зола-виносу теплової електростанції розглядається як сировинний матеріал для склокераміки оскільки містить SiO_2 , CaO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 . Вказується, що таке доповнення складу знижує температуру плавлення і в'язкість розплаву. Контрольована кристалізація розплавів, що містять золу з теплових електростанцій, можлива шляхом термічної обробки кристалізації та нуклеації. Додавання TiO_2 до вмісту золи-винесення позитивно впливає на кристалізацію, діючи як агент зародження. Недоліком даного використання є той факт, що вміст Fe_2O_3 обмежує використання летючої золи лише для кольорових продуктів, не враховує токсичність та фізико-хімічні характеристики отриманої склокераміки.

Дослідження [10] оцінює можливість використання вугільної золи (відходів теплових електростанцій) як заміну дрібного заповнювача в розчині та бетоні. Результати аналізу розчину та бетону, що містить вугільну золу при частковій і повній заміні піску, порівнювали з даними для звичайного розчину і бетону. Щільність будівельного розчину та бетону помітно зменшується зі збільшенням вмісту золи у вугільному кубі. Незважаючи на збільшення проникного пористого простору будівельних розчинів і бетонів із збільшенням вмісту вугільної золи, використання вугільної золи суттєво не впливає на міцність бетону на стиск. Зразки показали хороші теплоізоляційні властивості; значення теплопровідності значно знизилися з підвищенням зольності вугілля, а теплопровідність будівельного розчину та бетону зі 100% золи зменшилась на 68,61 та 46,91% відповідно порівняно з еталонним зразком. Не досліджено морозостійкість, клас безпечності та водопоглинання отриманого бетону.

Щодо особливостей золи теплових електростанцій як будівельного матеріалу вони досить добре вивчені та рекомендовані будівельникам для виробництва бетонів та дорожнього покриття, у меншій мірі як будівельний керамічний матеріал [1]. У всіх випадках зола використовується як добавка у відносно невеликому об'ємі.

Отже, за результатами обробки та аналізу наукових джерел близької тематики технологія потребує визначення оптимальних співвідношень класичної сировини та відходів на основі порівняння експлуатаційних властивостей контрольних зразків. А отримані матеріали мають бути досліджені на безпечність та відповідність вимогам за діючими нормативними документами.

Мета дослідження – розробка екологічної технології використання відходів теплових станцій для виробництва будівельних керамічних матеріалів. Це дасть можливість отримати вироби з комплексом необхідних експлуатаційних властивостей, розширити сировинну базу завдяки застосуванню місцевої легкоплавкої сировини та покращити екологічний стан в регіоні.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- підібрати склади та технологічні параметри виготовлення будівельних керамічних виробів на основі місцевої легкоплавкої сировини с залученням відходів ТЕС;
- дослідити придатність відходів ТЕС для отримання виробів будівельної кераміки;

– визначити фізико-механічні характеристики керамічних виробів з використанням відходів ТЕС у складі будівельних матеріалів.

Виклад основного матеріалу. Для вирішення поставлених завдань застосовували сучасні фізико-хімічні методи – рентгенофазовий, термічні (ТГ, ДТГ, ДТА) методи аналізу, хімічні методи дослідження сировинних матеріалів і мас на їх основі, що дало можливість оцінити особливості структуроутворення керамічних матеріалів. Для визначення придатності місцевої легкоплавкої глини для виготовлення керамічних виробів були проведені систематичні дослідження з розробки складів мас, а також основних характеристик виготовленої продукції.

Для визначення фазового складу матеріалів було застосовано модернізований рентгеновський дифрактометр ДРОН-3М (Burevisnyk), оснащений комп'ютерною системою для автоматичного запису даних дифракції. Було використано фільтроване $\text{Cu} - \text{K}\alpha$ випромінювання. Аналіз отриманих даних проведено з використанням програми "Match". Ідентифікація фаз виконана згідно міжнародної бази стандартних рентгеновських дифракційних даних (PDF-2 database of ICDD). Коригування рівня фону та апроксимація піків проведена за допомогою програми "Fityk" [11].

При виконанні роботи було вивчено можливість застосування зольних відходів Трипільської ТЕС для виробництва будівельної кераміки на основі легкоплавкої глини Бучанського родовища Київської області, дифрактограма якої наведена в [12]. Хімічний склад сировинних компонентів наведено в таблиці 1.

Важливою характеристикою глин, яка визначає її пластичність, чутливість до сушіння і випалу, спіклівість, засмічення домішками, а також міцність готових виробів є гранулометричний склад [2].

Аналіз гранулометричного складу даної глинистої сировини показав, що розмір часток понад 0,25 мм складає всього 0,1%, розмір від 0,25 до 0,05 мм – 23,52%, розмір 0,05–0,01 мм складає 19,3%, 0,01–0,005 мм – 22,15%, 0,005–0,001 мм – 13,4% і менше ніж 0,001 мм – 21,53%. Згідно класифікації досліджувана сировина належить до дисперсної

глини з низьким вмістом включень. Вміст фракцій від 0,005–0,001 мм та 0,001 мм свідчить про її добру водозачинність, зв'язність та спіклівість.

Дана сировина відноситься до помірно- або середньопластичної залежно від шару залягання. Наявність значної кількості пилоподібної фракції (0,05–0,005 мм) погіршує сушильні властивості, підвищуючи чутливість до сушіння. Повітряна усадка глини знаходиться в межах 8%, а вогнева – до 3%.

Згідно хімічного складу глина за кількістю Al_2O_3 , знаходиться в межах 10,5–11,51%, що за класифікацією глинистої сировини відповідає групі кислих глин. За кількістю Fe_2O_3 та TiO_2 глина відноситься до сировини з високим вмістом забарвлюючих оксидів, 4,01 та 0,57 відповідно. Сума водорозчинних солей у вихідній сировині складала 0,25 мг-екв/100 г глини, що відносить її до групи з низьким їх вмістом.

Мікроскопічне дослідження золи Трипільської ТЕС показало, що до її фазового складу входять глинисті агрегати в кількості 22%, склоподібна речовина – 50% і кристалічні фази. Склоподібна речовина золи є продуктом термохімічного впливу на мінеральну частину палива. Її частки, як правило, мають правильну сферичну форму, можуть бути суцільні або порожнисті.

Склоподібна фаза досліджуваної золи Трипільської ТЕС неоднорідна і представлена зернами неправильної форми з гострими гранями розміром від 0,3 до 10 мм. Значна частина зерен має пори різних розмірів, що утворилися в результаті різкого випаровування при попаданні шлаку в воду. Іноді зустрічаються також великі включення розміром до 40 мм. Жовтуватий колір склоподібної фази надають присутні оксиди заліза. Основним компонентом цієї фази є кремнезем, який значною мірою формує фізичні та хімічні властивості золи і бере участь, як основний компонент, у процесах гідратаційного твердіння та у процесах синтезу, утворюючи різні гідросилікати. Вміст вуглецю в межах 8–10%.

Кристалічна фаза золи Трипільської ТЕС містить муліт, гематит, магнетит; SiO_2 представлений різними модифікаціями кварцу у вигляді безбарвних кристалів розміром до 0,14 мм. Дрібні зерна

Таблиця 1

Хімічний склад глинистої сировини Бучанського родовища Київської області та золи Трипільської ТЕС

Зразки глини та золи	Вміст оксидів, %									В.п.п.
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	CaO	Na_2O	K_2O	MgO	SO_3	
Глина Бучанського родовища	61,9	10,91	4,23	0,49	6,76	2,19	1,12	1,57	–	10,82
Зола Трипільської ТЕС	50,8	20,51	10,04	0,68	2,9	2,40	0,85	0,85	0,17	–

кварцу частково оплавлені і мають округлу форму. Насипна об'ємна маса кварцу – 900 кг/м³, щільність – 2180 кг/м³, питома поверхня – 3900 см²/г.

У роботі використовували пластичний спосіб підготовки сировинної суміші та формування зразків. При розробці керамічних мас для виготовлення будівельної кераміки необхідно враховувати чутливість їх до сушіння, зміну лінійних розмірів зразків під час сушіння та випалення, межу міцності на стиск та водопоглинання.

Керамічні зразки для проведення досліджень готували методом пластичного формування, використовуючи технологічний режим максимально наближений до процесу виготовлення керамічних виробів будівельного призначення. Для цього глину спочатку подрібнювали, а потім перемелювали у вальцях тонкого помелу і бігунах.

Підготовлені компоненти просіювали крізь сито, перемішували і зачиняли водою до нормальної формувальної вологості. Після вилежування протягом доби формували зразки розміром 50×50×50 мм і балок розміром 60×15×10 мм методом пластичного пресування при вологості 18–22%. Вилежування маси необхідно проводити для забезпечення протікання масообмінних процесів між глиною та цеолітом в повному обсязі. Відформовані зразки висушували до вологості 3–6%. Сушіння проводили в сушильній шафі при 100°C до постійної маси. Випал проводили в електричній печі при 950–1050°C з витримкою 2 години при максимальній температурі. Охолоджувалися зразки протягом 24 годин.

При використанні вигораючих домішок, якими є золошлакові відходи, важливо виявити вплив їх дисперсності на характеристики міцності керамічних матеріалів.

Збільшення дисперсності вигораючих домішок і температури випалення зразків зменшують розміри пор, що приводить до зменшення щільності і зміни характеристик міцності. Встановлено, що на міцність впливає не тільки дисперсність вигораючих домішок, а і співвідношення дисперсності вихідної сировини і домішок.

В роботі вивчено вплив дисперсності домішок на міцність кераміки в залежності від дисперсності вихідної сировини. Для цього досліджували міцність зразків в залежності від дисперсності вихідної сировини, дисперсності домішок і температури випалу. Дисперсність вихідної сировини становила менше 1,0; 0,8 і 0,5 мм. Результати досліджень міцності зразків залежно від дисперсності вигораючих домішок і температури випалення приведені на рис. 1–3.

З метою вивчення впливу добавки відходів ТЕС на технологічні властивості керамічних мас на основі легкоплавкої сировини були досліджені шихти для виробництва будівельної кераміки різного складу. Співвідношенням легкоплавкої глини і золи Трипільської ТЕС становили, %: № 1 – 100:0; № 2 – 90:10; № 3 – 80:20; № 4 – 70:30; № 5 – 60:40; № 6 – 50:50; № 7 – 40:60.

Результати проведених досліджень свідчать про те, що максимальна міцність характерна для зразків, співвідношення дисперсності вихідної сировини і вигораючих добавок яких становила 1:1. На міцність керамічних матеріалів істотно впливає склад шихти, методи формування, режими сушки і випалення.

З підвищенням температури випалення міцність керамічних матеріалів підвищується. Фізико-механічні показники шихти, цегли-сирцю і випаленої цегли наведені в табл. 2.

Для порівняння технологічних показників досліджуваних керамічних мас обраний склад під номером 1, який застосовується на підприємствах.

Наведені в табл. 2 дані показують, що тільки склад 7 практично не придатний для формування керамічних виробів. Результати дослідження інших складів керамічних мас показали, що їх фізико-механічні властивості не поступаються базовим показникам.

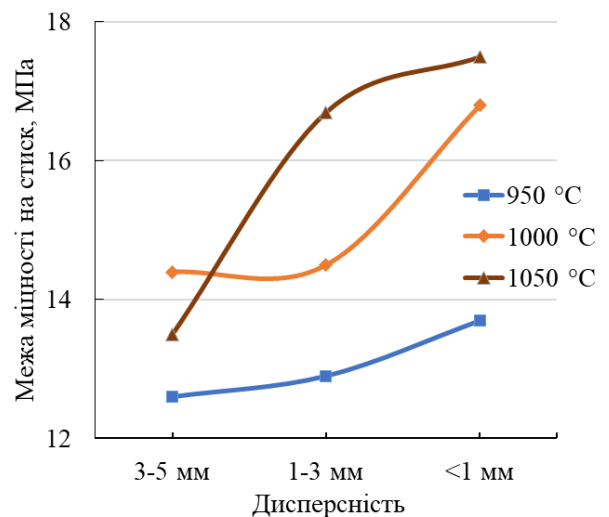


Рис. 1. Міцність зразків на стиск залежно від дисперсності домішок і температури випалення (вихідна сировина з дисперсністю < 1 мм)

Показник пластичності досліджуваних керамічних мас трохи вищий, ніж вихідної маси. Виходячи з отриманих даних, представлених в табл. 2, керамічна маса є помірно пластичною. Збільшення кількості відходів дозволило знизити

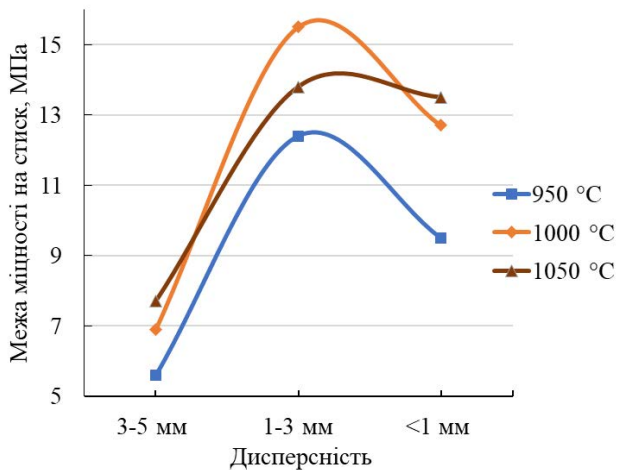


Рис. 2. Міцність зразків на стиск залежно від дисперсності домішок і температури випалення (вихідна сировина з дисперсністю < 0,8 мм)

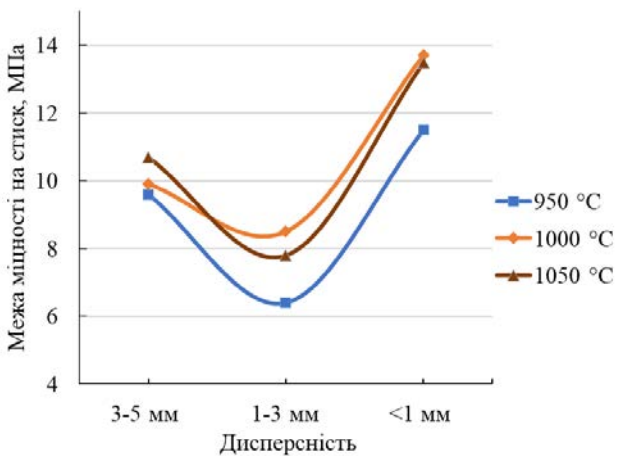


Рис. 3. Міцність зразків на стиск залежно від дисперсності домішок і температури випалення (вихідна сировина з дисперсністю < 0,5 мм)

чутливість до сушіння і поліпшити їх сушильні властивості. Це позитивно позначилося на повітряній усадці досліджуваних зразків різних складів керамічних мас. Вони стали малочутливими до сушіння, висушування відбувалося без тріщин і мали незначну повітряну усадку. Знижуючи усадку і покращуючи пластичність керамічної маси, введенням золошлакових відходів, вдалося підвищити міцність і морозостійкість керамічної цегли.

Результати досліджень отриманих зразків за водопоглинанням свідчать про підвищену їх пористість, що дає можливість отримати полегшений матеріал, який володіє високою звуко- та теплоізоляційною здатністю.

Таким чином, проведені дослідження показали можливість використання золошлакових відходів Трипільської ТЕС для виготовлення полегшеної якісної керамічної цегли, що відповідає вимогам до будівельних матеріалів. Використання золи, як наповнювача, при виробництві керамічних будівельних матеріалів дає можливість вирішувати одну з важливих екологічних задач сьогодення – утилізацію відходів виробництва, що безумовно зменшує навантаження на довкілля та сприяє поліпшенню екологічного стану регіону.

Вивчення властивостей зол ТЕС та можливості їх використання для виробництва будівельної кераміки проводилися вченими різних країн протягом багатьох років [1–10]. Однією з причин цього є те, що характеристики зол кожної ТЕЦ за хімічним та гранулометричним складом істотно відрізняються один від одного. Така неоднорідність сировини вимагає постійного вивчення

Таблиця 2

Фізико-механічні характеристики досліджуваних керамічних мас

Показники	Номер складу керамічної маси						
	1	2	3	4	5	6	7
Характеристики шихти							
Пластичність	12	18	15	13	11	9	7
Чутливість до сушіння, с	80	110	130	160	190	230	300
Характеристики цегли-сирцю							
Повітряна усадка, %	5,8	5,2	4,8	4,5	4,3	4,2	4,0
Механічна міцність цегли-сирцю (кінцева вологість ≤8 %, МПа)							
на згин	0,8	2,0	1,8	1,5	1,2	0,9	0,7
на стиск	4,8	10,8	9,6	8,8	5,4	5,0	4,7
Характеристики випаленої цегли. Механічна міцність, МПа							
на згин	2,4	3,8	4,2	4,8	4,3	3,5	2,1
на стиск	10,4	12,4	13,4	16,8	15,7	13,1	10,2
Морозостійкість, цикли	15	20	25	30	25	20	14
Усадка, %	6,8	6,9	6,8	6,5	6,2	6,0	5,0
Водопоглинання, %	22,5	20,0	19,1	18,8	19,0	20,5	22,8
Щільність, кг/м ³	1880	1990	1880	1740	1700	1540	1380

методів її підготовки та варіації сировинного складу мас.

В роботі [2] автори теоретично розглядали склад та будову золи та отриманих з неї скломатеріалів. В проведених нами дослідженнях показано, що будова та склад золи, результати дослідження яких наведені в табл. 1, залежить від цілого комплексу одночасно діючих факторів. На властивості зольних відходів впливає вид та морфологічні особливості палива. Крім цього має значення тонкість помелу в процесі його підготовки, зольність, хімічний склад мінеральної частини палива, температура в зоні горіння, час перебування частинок у цій зоні та ін. Значний вміст карбонатів у мінеральній частині вихідного палива під впливом високих температур у процесі горіння приводить до утворення силікатів, алюмінатів та феритів кальцію – мінералів, здатних до гідратації. Завдяки їх утворенню пояснюється можливість використання золи у якості добавки до кераміки, що не буде погіршувати якість виробів.

Порівняно з аналогічними дослідженнями [3, 4] вдалося отримати керамічні матеріали з максимальними показниками міцності на стиск та згин та отримати з гарними результатами морозостійкості отриманої кераміки. Особливість нашого дослідження полягає в тому, що вивчено вплив співвідношення дисперсності вихідної сировини і домішок на міцність виробів будівельної кераміки. В результаті встановлено, збільшення дисперсності вигораючих домішок та температури випалення приводить до зменшення розміру пор і щільності, і як наслідок до зростання міцності. Це було досягнуто завдяки підбору співвідношення добавки та легкоплавкої глини і порівняння експлуатаційних властивостей контрольних зразків. Отримані матеріали досліджені на безпечність та можливість використання у будівництві. Отже, дане дослідження доповнило існуючі дані про можливість використання відходів ТЕС у будівельній промисловості.

Велика кількість золи-винесення з ТЕС використовується для захоронення, що негативно впливає на довкілля. Особливо небезпечними є вимивання потенційно токсичних речовин у ґрунти та підземні води, зміна елементного складу рослинності, що росте поблизу ТЕС, та накопичення токсичних елементів по всьому харчовому ланцюгу. Питома вага переробки золи за [1] в Україні складає в межах 10%, тоді як у США цей показник сягає 20%, у Великій Британії – 60%, у Франції – 72%, у Фінляндії – 84%. Використання відходів ТЕС у виробництві будівельної кераміки

дає можливість збільшення цього відсотка в Україні у комплексі із використанням місцевої легкоплавкої сировини.

Так автори [7] досліджували застосування золи-винесення ТЕС без будь-яких добавок для виготовлення скляних, керамічних та склокерамічних виробів. На відміну від їх дослідження в даній роботі встановлено оптимальне співвідношення місцевої легкоплавкої глини і добавки золи ТЕС для отримання керамічних виробів з оптимальними експлуатаційними властивостями.

Розвиток даної технології дозволяє покращити екологічну ситуацію в районах розміщення ТЕС, виключити забруднення повітря і водного басейнів, звільнити землю, зайняту під відвали. Окрім цього, введення до 50 мас.% золи на 15–40% знижує собівартість сировини та виробництва отриманих матеріалів.

Отже, дане дослідження заповнює проблему визначення оптимальних співвідношень класичної сировини та відходів на основі порівняння експлуатаційних властивостей контрольних зразків. Дана добавка за табл. 2 покращує фізико-механічні характеристики і підходить для виробництва якісних та довговічних керамічних будматеріалів, враховуючи ключові параметри: міцність, водопоглинання, морозостійкість, усадку та щільність.

Досить високий вміст Fe_2O_3 у золі-винесення, за даними табл. 1, обмежує використання летючої золи лише для кольорових продуктів, через забарвлюючу властивість цього оксиду. Отже, необхідно враховувати, що таку сировину краще застосовувати не для облицювальної кераміки.

Розвиток даного використання вугільної золи в будівництві мають бути зосереджені на сертифікації золошлаків, стандартизації щодо його використання та регулювання. Також важливим кроком може бути довгострокове дослідження впливу довговічності та міцності матеріалу з використанням вугільної золи.

Перспективним є використання золи не тільки у будівельній кераміці, а ще й в мулітовій, звичайній, побутовій, художній та у сфері полімерних композитів.

Висновки

1. При оцінці придатності сировини для виготовлення конкретного виду будівельних матеріалів необхідно керуватися комплексною оцінкою властивостей легкоплавкої глини. До них відносяться мінералогічний, хімічний склад, вплив домішок на формування структури виробу після випалу з метою отримання необхідних фізико-технічних характеристик, що відіграє найважливішу роль.

Введення домішки золи до 50 мас.% дозволило забезпечити максимальні показники міцності на стиск, морозостійкість та водопоглинання.

2. Особливість будови золи Трипільської ТЕС полягає в тому, що до її фазового складу входять глинисті агрегати в кількості 22%, склоподібна речовина – 50% і кристалічні фази. Це дозволяє використовувати її в якості сировини для керамічного виробництва і одночасно вирішувати екологічні проблеми з захисту навколишнього середовища.

3. При дослідженні фізико-механічних властивостей керамічних мас на основі відходів ТЕС встановлено підвищення їх чутливості до сушіння в 2,8 разів, міцності на стиск у 1,8 разів, морозостійкості до 25 циклів. Також отримані результати свідчать, що усадка після сушіння і випалу та водопоглинання зменшилися.

Максимальні показники міцності на стиск та згин для запропонованих рецептур були досягнуті при температурі випалу 1050°C і характеризуються щільним, міцним керамічним черепком.

Результати проведених досліджень свідчать про те, що максимальна міцність характерна для зразків, співвідношення дисперсності вихідної сировини і відходів ТЕС становила 1:1.

Вирішення поставленого завдання дозволить створювати високоякісні будівельні матеріали, які володіють високою звуко- та теплоізоляційною здатністю на основі низькосортних глинистих порід, що забезпечить залучення у виробництво величезних ресурсів місцевої сировини. Використання відходів ТЕС як наповнювача при виробництві будівельних матеріалів дає можливість вирішувати найважливішу екологічну задачу – утилізацію відходів виробництва, що безумовно зменшує навантаження на довкілля та сприяє поліпшенню екологічного стану регіону.

Дослідження проводилось в рамках ініціативної теми «Керамічні матеріали на основі мінеральної сировини Київського регіону» (Державна реєстрація 0122U000523, дата реєстрації: 2022-01-23) без фінансової підтримки.

Список літератури:

1. Дворкін Л.І., Пашков І.А. Будівельні матеріали з відходів промисловості. Київ: Вища школа, 1989. 312 с. DOI <https://doi.org/10.32782/2664-0406.2021.39.5>
2. Приходько, А. П., Павленко, Т. М., & Аббасова, А. Р. Особенности зола тепловых электростанций как строительного материала. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2010. № 2-3 (143-144). С. 47-52.
3. Ковальський, В. П., Сідлак, О. С. Використання золи виносу ТЕС у будівельних матеріалах. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2014. Том 16. № 1. С. 35-40.
4. Alinazarov, A. K., Khusainov, M. A., & Gaybullaev, A. H. Applications of Coal Ash in the Production of Building Materials and Solving Environmental Problems. *Global Scientific Review*. 2022. Vol. 8. P. 89-95.
5. Abubakar, A. U., Baharudin, K. S. Potential use of Malaysian thermal power plants coal bottom ash in construction. *International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology*. 2012. Vol. 3, № 2. P. 25-37.
6. Erol, M., Genç, A., Öveçoğlu, M. L., Yücelen, E., Küçükbayrak, S., Taptık, Y. Characterization of a glass-ceramic produced from thermal power plant fly ashes. *Journal of the European Ceramic Society*. 2000. Vol. 20, № 12. P. 2209-2214. DOI [https://doi.org/10.1016/S0955-2219\(00\)00099-6](https://doi.org/10.1016/S0955-2219(00)00099-6)
7. Erol, M., Küçükbayrak, S., Ersoy-Mericişoyu, A. Comparison of the properties of glass, glass-ceramic and ceramic materials produced from coal fly ash. *Journal of Hazardous Materials*. 2008. Vol. 153, № 1-2. P. 418-425. DOI <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.08.071>
8. Erol, M., Demirler, U., Küçükbayrak, S., Ersoy-Mericişoyu, A., & Öveçoğlu, M. L. Characterization investigations of glass-ceramics developed from Seyitömer thermal power plant fly ash. *Journal of the European Ceramic Society*. 2003. Vol. 23. № 5. P. 757-763. DOI [https://doi.org/10.1016/S0955-2219\(02\)00193-0](https://doi.org/10.1016/S0955-2219(02)00193-0)
9. Goga, F., Dudric, R., Cormos, C., Imre, F., Bizo, L., Misca, R. Fly ash from thermal power plant, raw material for glass-ceramic. *Environmental Engineering and Management Journal*. 2013. Vol. 12, №2. P. 337-342. DOI: 10.30638/eemj.2013.041
10. Torkittikul, P., Nochaiya, T., Wongkeo, W., & Chaipanich, A. Utilization of coal bottom ash to improve thermal insulation of construction material. *Journal of material cycles and waste management*. 2017. Vol. 19. P. 305-317. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10163-015-0419-2>
11. Wojdyr M. Fityk: a general-purpose peak fitting program. *J. Appl. Cryst.* 2010. Vol. 43, № 5-1. P. 1126-1128. DOI <https://doi.org/10.1107/S0021889810030499>
12. Спасьонова Л. М. Створення якісної кераміки з місцевої легкоплавкої сировини з високою чутливістю до сушіння. *Вчені Записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського*. 2023. Т. 34(73), № 3. С. 94-99. DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.3.2/16>

Spasonova L.M., Subbota I.S., Hotoruk A.Ye. USE OF ASH SLAG TYPES OF THERMAL POWER PLANTS FOR THE PRODUCTION OF BUILDING CERAMICS

The object of research is ceramic building materials, which remain one of the main ones in the construction industry. Enterprises face the acute problem of increasing production volumes. The main problem for the industry is providing enterprises with high-quality raw materials, the reserves of which are constantly decreasing. Due to the shortage of clay raw materials, this problem cannot be solved without the use of local low-melting clay and the involvement of production waste.

The development of thermal energy has led to a significant accumulation of waste generated in the production process. Waste pollutes the environment and at the same time is a valuable mineral raw material that can be used for the production of building materials.

As a result of the research work, local low-melting clay raw materials with additives of ash slag waste were investigated, rational compositions of raw materials were determined, which allow to improve the technological properties of finished products. The waste of thermal stations in the form of ash can be used without preliminary grinding, which allows you to expand the scope of useful use of secondary raw materials and reduce the cost of finished products.

When studying the physical and mechanical properties of ceramic masses based on thermal power plant waste, it was found that their sensitivity to drying increased by 2.8 times, compressive strength by 1.8 times, frost resistance up to 25 cycles. The obtained results indicate that shrinkage after drying and firing and water absorption decreased. The conducted studies showed that local mineral raw materials, with the development of technological regimes, can be used for the production of construction ceramics, which will be necessary for the restoration of Ukraine

Key words: *ecological technology, thermal power plant waste, waste utilization, construction ceramics, low-melting clay.*