

СУББОТА ІРИНА

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
<https://orcid.org/0000-0002-1581-8513>  
e-mail: [0503850107@ukr.net](mailto:0503850107@ukr.net)

СПАСЬОНОВА ЛАРИСА

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
<https://orcid.org/0000-0002-7562-7241>  
e-mail: [lar\\_spas@yahoo.com](mailto:lar_spas@yahoo.com)

## ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОГЕННОЇ СИРОВИНИ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА КЕРАМІЧНИХ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

*Не зважаючи на складну ситуацію у світі та в Україні, будівництво та архітектура розвиваються з кожним роком, а потреба в екологічно чистих та ефективних матеріалах зростає. Один з напрямків розвитку виробництва керамічних будівельних матеріалів – використання техногенної сировини, що вирішує і екологічні питання. Використання металургійних відходів у виробництві будівельних матеріалів дозволяє створюючи нові матеріали, вивчати їх властивості та поведінку в певних умовах експлуатації. Відходи, що утворюються під час металургійного виробництва, використовуються в технології виробництва будівельних матеріалів, допомагають зменшити навантаження на навколишнє середовище. Інтеграція відходів у виробництво дозволяє зменшити залежність від традиційної сировини та сприяє зниженню витрат на матеріали, а також на енергетичні ресурси. Цегла з додаванням шлаків має кращі фізико-механічні властивості, такі як підвищена міцність, термічна стійкість і зменшена усадка, що робить її більш привабливою для будівництва. Зниження витрат на сировину та енергію сприяє зниженню цін на готову продукцію, що робить будівельні матеріали більш конкурентноспроможними.*

*В роботі наведено результати досліджень керамічних мас на основі глини Київського родовища з застосуванням відходів металургійного виробництва. Це дозволить розширити застосування місцевої сировини для ефективного та екологічно чистого виробництва виробів будівельної кераміки.*

*Ключові слова: керамічні матеріали, глиниста сировина, відходи металургійного виробництва, будівельна кераміка.*

SUBBOTA IRYNA, SPASANOVA LARYSA  
National Technical University of Ukraine  
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

## USE OF TECHNOGENIC RAW MATERIALS FOR THE PRODUCTION OF CERAMIC BUILDING MATERIALS

*Despite the difficult times in the world and in Ukraine, construction and architecture are developing every year, and the need for environmentally friendly and efficient materials is growing. One of the directions of ceramic building materials production development is the use of man-made raw materials that solve environmental issues. The use of metallurgical waste in the production of building materials allows you to create new materials, study their properties and behavior in certain operating conditions. Waste generated during metallurgical production, used in the production technology of building materials, helps to reduce the influence on the environment. The integration of waste into production allows to reduce dependence on traditional raw materials and helps to reduce the costs of materials, as well as energy resources.*

*The paper presents the results of research of ceramic masses based on the clay of the Kyiv deposit with the use of metallurgical production waste. Two-component mixtures containing clay and 10, 20 and 30% of metallurgical slag were studied. Ceramic samples were prepared by the method of plastic molding, using a technological mode as close as possible to the process of manufacturing ceramic products for construction purposes. Brick with the addition of slag has better physical and mechanical properties, such as increased strength, crack resistance and reduced shrinkage, which makes it more attractive for construction. The water absorption and strength of bricks made with 30% addition of metallurgical waste have improved significantly – water absorption decreased by 2.0 times when fired at 1000 °C, which affects durability and quality. The flexural strength increased more than 2 times when fired at both 950 °C and 1000 °C, while the compressive strength increased almost 3 times at these firing temperatures. The use of metallurgical waste has been shown to reduce the shrinkage of bricks during drying and firing, which leads to a reduced risk of cracking and deformation, which in own turn can reduce the cost of repair and replacement of materials.*

*Lower costs of raw materials and energy contribute to lower prices for final products, making building materials more competitive.*

*Due to the limitation of high-quality clay raw materials in many regions of our country, the possibility of using local low-melting clays for the production of building ceramics has been presented. The addition of metallurgical production waste to the slurry will allow to expand the use of local raw materials for efficient and environmentally friendly production of construction ceramics and improve the environmental situation in the regions of metallurgical production.*

*Key words: ceramic materials, clay raw materials, metallurgical production wastes, building ceramics.*

### Постановка проблеми у загальному вигляді

#### та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Один з напрямків використання техногенних сировинних матеріалів – це використання відходів металургійного виробництва. Металургійна промисловість є однією з найбільших галузей, що генерує відходи, які можуть бути використані для виробництва керамічних будівельних матеріалів.

Відходи металургійного виробництва розділяються за наступними типами:

*Шлаки* – відходи, що утворюються під час виробництва сталі та чавуну, і можуть містити оксиди металів, силікати та інші сполуки.

*Металургійний пил* – відходи, що утворюються під час виробництва металу і можуть містити оксиди металів, карбіди та інші сполуки.

*Металургійні шлаки* – відходи, що утворюються під час виробництва металу і містять оксиди металів, силікати та інші сполуки.

Шлаки та металургійний пил можуть бути використані як компоненти для виробництва керамічної цегли. Металургійні шлаки в якості домішки для виробництва керамічної плитки та керамограніту.

Використання відходів металургійної промисловості, зокрема сталеплавильних шлаків, у виробництві керамічної цегли є інноваційним підходом, який має як наукові, так і практичні цілі.

Використання металургійних відходів у виробництві керамічної цегли дозволяє створювати нові матеріали, вивчати їх властивості та поведінку в певних умовах експлуатації. Завдяки науковим дослідженням можлива оптимізація процесів виробництва, що дозволяє знизити енергетичні витрати та поліпшити якість продукції. Використання відходів допомагає зменшити їх кількість, які утворюються під час металургійного виробництва, що є важливим для збереження навколишнього середовища. Інтеграція відходів у виробництво дозволяє зменшити залежність від традиційної сировини та сприяє зниженню витрат на матеріали. Цегла з додаванням шлаків має кращі фізико-механічні властивості, такі як підвищена міцність, термічна стійкість і зменшена усадка, що робить її більш привабливою для будівництва. Зниження витрат на сировину та енергію сприяє зниженню цін на готову продукцію, що робить будівельні матеріали більш конкурентоспроможними.

### **Аналіз досліджень та публікацій**

Використання відходів металургійного виробництва для виготовлення керамічної цегли є перспективним напрямком, який може принести екологічні та економічні інтереси. Відходи металургійного виробництва, такі як шлаки, золи та інші побічні продукти, являють собою значну кількість відходів, що негативно впливають на довкілля. Використання цих матеріалів у виробництві керамічної цегли, може знизити обсяг відходів і поліпшити екологію. У багатьох країнах активно використовують металургійні відходи як добавку при виробництві керамічних будівельних матеріалів.

Як відомо, металургійні шлаки є продуктом технологічного процесу виплавки металів, які здебільшого не переробляються і відправляються на зберігання у відвали. Під дією факторів зовнішнього середовища опади змивають небезпечні речовини в ґрунт і води. Обсяги технологічних відходів здебільшого відповідають об'єму основного виробництва. Тому щороку утворюється 11-12 млн тонн металургійних шлаків [1]. І тільки 45,5 % цих шлаків утилізується, більше половини поповнюють відвали виробництва. Відвальні шлаки концентруються у промислових регіонах країни. Наразі в Україні металургійних шлаків накопичилось понад 2 млрд тонн, з площею зайнятості понад 16 тис. га. Шлаки в багатьох розвинених країнах відносяться до вторинної сировини та не мають статусу відходів. Основним споживачем шлаків є будівельна галузь. Також українські шлаки експортують до Італії, Ізраїля та Грузії. Шлаки кольорової металургії містять до 60 % оксидів заліза, кремнію, алюмінію, кальцію, магнію, а також такі коштовні компоненти, як мідь, кобальт, цинк, свинець, кадмій, рідкісні метали. Перспективним напрямком їхнього використання є комплексна переробка, що включає попереднє вилучення кольорових і рідких металів, заліза з наступним використанням силікатного залишку для виробництва будівельних матеріалів аналогічно шлакам чорної металургії.

Швидке накопичення різноманітних промислових відходів через індустріалізацію та урбанізацію не тільки в розвинутих, а й в країнах, що розвиваються, ставить питання про їх утилізацію. Використання та переробка таких відходів в економічний, довговічний та екологічно чистий будівельний матеріал стає найефективнішим засобом зменшення впливу на довкілля. В огляді [2] автори розглядають використання різних промислових шлаків (купольного шлаку, шлаку електродугових печей, шлаку сталеплавильних печей і меленого гранульованого доменного шлаку) для розробки стійких будівельних матеріалів для створення екологічно чистої інфраструктури. Для виробництва екологічно прийнятних будівельних матеріалів ці відвальні шлаки використовуються як часткова, або і повна заміна заповнювача. Розглянуто додавання матеріалів в діапазоні від 10 до 60% для купольного шлаку, від 20 до 50% для EAFS, від 10 до 50% для GGBFS, і від 10 до 30% для SFS.

В роботі [3] досліджено доменний шлак, що є побічним продуктом процесу виплавки чавуну під час виробництва заліза. Розглянуто два різних типи водних шлаків – загартований гранульований шлак і шлак з повітряним охолодженням, які утворюються в процесі виплавки чавуну в доменній печі. Розглянуто хімічні, мінералогічні, фізичні, термічні та морфологічні властивості чотирьох різних шлаків, отриманих за різних умов охолодження оцінені для переробки на цемент і застосування в якості заповнювачів. Хімічні, мінералогічні, фізичні, термічні та морфологічні властивості цих чотирьох різних шлаків, отриманих за різних умов охолодження, оцінені для переробки і застосування в якості заповнювачів для будівельних матеріалів. Показано, що шлак повітряного охолодження придатний як заповнювач для застосування в будівельній галузі.

Наукові дослідження інженерів-будівельників спрямовані до пошуку креативних стратегій перетворення промислових відходів до створення недорогих, легких та екологічно чистих будівельних матеріалів для сталого будівництва. У статті [4] проаналізовано використання різних відходів для виробництва цегли, досліджено механічні та фізичні властивості цегли, виготовленої з додаванням різних домішок, дослідження для пошуку економічно ефективного методу виробництва цегли, який споживає менше енергії та створює меншу кількість забруднювачів навколишнього середовища.

Будівельні матеріали користуються широким попитом, тому будівельну галузь можна розглядати для застосування в якості добавок до керамічних мас різних типів відходів, які можна використовувати у виробництві керамічної цегли, що сприятиме поліпшенню екологічного стану довкілля та покращенню якості будівельних матеріалів. Тому останнім часом проводиться багато досліджень потенціалу переробки та повторного використання твердих відходів, що надходять з різних джерел. У даному дослідженні [5] розглядається широкий спектр аналітичних робіт (1998–2019 рр.) з додавання багатьох типів відходів флюсу до обпаленої глиняної цегли. Поточне дослідження пропонує висерпні рекомендації щодо впливу флюсу оксидів на виробництво (тиск формування, час замочування та температуру випалу), фізичні властивості (водопоглинання, об'ємна щільність, усадка під час випалу) та механічні властивості (міцність на стиск і вигин) глиняної цегли. Показано, що введення відходів флюсу приносить переваги виробничому процесу, оптимізуючи пластичність і знижуючи температуру випалу завдяки ранньому спіканню. Також покращуються фізико-механічні властивості цегли в межах оптимальних рівнів заміни. Результати цієї роботи можуть використані для стандартизації включення відходів флюсів у виробництво цегли.

Таким чином, застосування в якості добавки до керамічних мас металургійних відходів показує як ефективно можна використовувати їх в виробництві керамічної цегли, що сприятиме поліпшенню екологічного стану довкілля та покращенню якості будівельних матеріалів.

#### Формулювання цілей статті

**Метою роботи є:** дослідження впливу відходів металургійного виробництва на властивості керамічної цегли виготовленої на основі місцевої легкоплавкої глинистої сировини.

#### Виклад основного матеріалу

При вирішенні поставленої мети роботи, яка стосується використання побічних продуктів металургійної промисловості для виробництва керамічної цегли застосовували сучасні фізико-хімічні методи – рентгенофазовий, диференційно-термічний, хімічні дослідження сировинних матеріалів і мас на їх основі. При виконанні роботи проводили лабораторні дослідження придатності місцевої легкоплавкої глини, щоб оцінити механічні та фізичні властивості матеріалів, виготовлених з використанням домішок відходів сталеплавильних шлаків. Проводили аналіз різних пропорцій шлаків у складі керамічних мас на основі місцевої сировини для виготовлення керамічної цегли.

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

В якості глинистої сировини використовували Київську спонділову глину. Хімічний склад Київської спонділової глинистої сировини представлено в таблиці 1.

За мінералогічним складом досліджувані глини відносяться до полімінеральних глин, за гранулометричним – до середньодисперсних з низьким вмістом крупнозернистих включень (більше 0,5 мм).

При виконанні роботи були вивчені двокомпонентні суміші, які містили глину та 10, 20 і 30 % металургійного шлаку. 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 розміром 60×15×10 мм методом пластичного пресування при вологості 18-22 %. Сушіння проводили в сушильній шафі при 105 °C до постійної маси. Для випалення було обрано інтервал від 950 до 1050 °C. Пов'язано це, перш за все, з тим, що більшість заводів керамічної галузі працює саме у цих технологічних інтервалах температур, що сприятливо впливає на якість готових виробів.

На першому етапі досліджень проводили аналіз хімічного та мінералогічного складу Київської глини. Результати хімічного дослідження легкоплавкої глини наведено у таблиці 1. За результатами хімічного аналізу Київська глина вирізняється високим вмістом SiO<sub>2</sub> – 59,27%. За вмістом Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> згідно ДСТУ Б В.2.7-60-97 її можна віднести до групи кислих глин, так як кількість оксиду алюмінію < 14 %. За кількістю Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> та TiO<sub>2</sub> глина відноситься до сировини з високим вмістом забарвлюючих оксидів. Вона має невисокий вміст карбонатів, а сума лужних оксидів не перевищує 2 %. За мінералогічним складом відноситься до полімінеральних глин.

За результатами диференціально-термічного аналізу крива нагрівання досліджуваної сировини характеризується термічними ефектами, що відносяться до процесів виділення адсорбційної води (150 °C) і міжпакетної води (220 °C); окиснення двовалентного заліза з утворенням Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; видалення структурної води з глинистого мінералу майже до повного руйнування решітки (560 °C); поліморфного перетворення кварцу (580 °C); втрати залишків гідроксильної води (700 °C); дисоціації карбонатів кальцію (820 °C).

Рентгенофазовий аналіз вивчених зразків мінералів проводили на рентгенівському дифрактометрі ДРОН-2,0 з двома щілинами Соллера, з відфільтрованим CuKα – випромінюванням з нікелевим фільтром. Результати вказують на наявність в глині кварцу (0,137; 0,145; 0,154; 0,166; 0,181; 0,198; 0,212; 0,223; 0,228; 0,245; 0,334; 0,425 нм), гідрослюди (0,15; 0,256; 0,356; 0,444; 0,493; 1,00 нм), каолініту (0,15; 0,239; 0,256; 0,356; 0,444; 0,714 нм), хлориту (0,15; 0,256; 0,356; 0,470; 1,38 нм), польового шпату (0,284; 0,295; 0,318; 0,370; 0,383; 0,404 нм) та кальциту (0,144; 0,160; 0,162; 0,187; 0,191; 0,209; 0,249; 0,303; 0,386 нм).

Таблиця 1

**Хімічний склад глини Київського родовища**

Глина	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	В.П.П
Київського родовища	59,27	9,56	3,45	10,96	0,67	1,24	1,00	0,01	13,84

Металургійні відходи, які застосовували в якості домішки, мали в своєму складі у %: SiO<sub>2</sub> – 12% , Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 19, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 43, Na<sub>2</sub>O – 4-5. Мінералогічний склад відходів представлено гідроалюмосилікатом натрію та мінеральною фазою заліза. Ці відходи можна віднести до напівкислої сировини, а за градунометричним складом до низькодисперсної. Вони є малопластичними, мають досить високу формувальну вологість та малочутливі до сушіння.

З метою вивчення впливу добавки відходів металургійного шлаку на технологічні властивості керамічних мас на основі легкоплавкої сировини були досліджені наступні шихти для виробництва будівельної кераміки, склад яких приведений в таблиці 2.

Таблиця 2

**Склади досліджуваних мас**

Компоненти	Вміст компонентів в шихтах, мас. %			
	1	2	3	4
Глина Київського родовища	100	90	80	70
Металургійний шлак	-	10	20	30

Для визначення умов проведення процесу сушіння вивчали чутливість глини та керамічних мас до сушіння. Процесу утворення тріщин в керамічних масах сприяють даже малі швидкості сушіння. Поява тріщин пов'язана з напруженнями, які виникають внаслідок неоднакової усадки за перерізом і по поверхні виробів. Тому чутливість до сушіння визначає тріщиностійкість маси протягом сушіння. Дослідженнями глини та керамічних мас на основі легкоплавкої глини встановили, що при додаванні відходів металургійного виробництва чутливість до сушіння покращується. Дослідження чутливості до сушіння легкоплавкої глини становить 46 с, що свідчить про належність її до високочутливої групи. При додаванні домішки шлаку чутливість до сушіння становила 66 с (зразок 90:10 ), 70 с (80:20) і 75 с (зразок 70:30). Керамічна маса стала середньочутливою до сушіння. Також додавання відходів металургійного виробництва до досліджуваної глини сприяло зниженню повітряної усадки. Для досліджуваної глини вона складала 10,6 %, для зразка зі співвідношенням 90:10 – 9,1; для зразка 80:20 і для зразка 70:30 відповідно 7,7 і 6,5 %.

Серед фізико-механічних властивостей механічна міцність є одним з основних критеріїв придатності сировинних матеріалів для виробництва будівельної кераміки. Результати визначення межі міцності на стиск та на згин досліджуваних мас представлені на рис. 1 і 2.

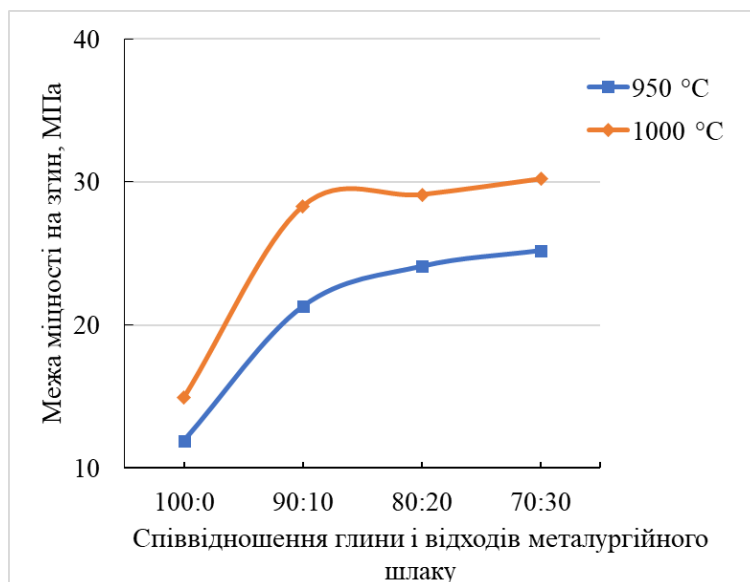


Рис. 1. Залежність межі міцності на згин керамічної цегли від складів досліджуваних мас

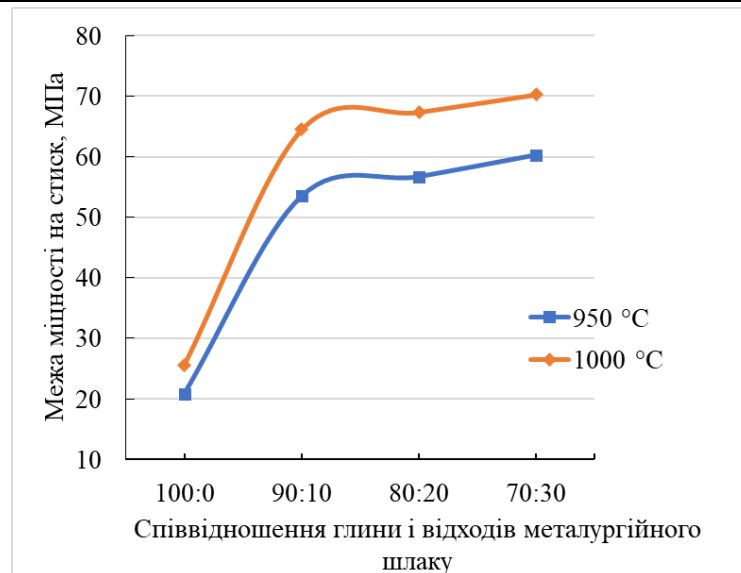


Рис. 2. Залежність межі міцності на стиск керамічної цегли від складів досліджуваних мас

Проведені дослідження показали, що при збільшенні кількості добавки відходів металургійного виробництва від 10 до 30 % до легкоплавкої глини, механічна міцність керамічних зразків при стисканні і вигині збільшується, в той час як водопоглинання зменшується.

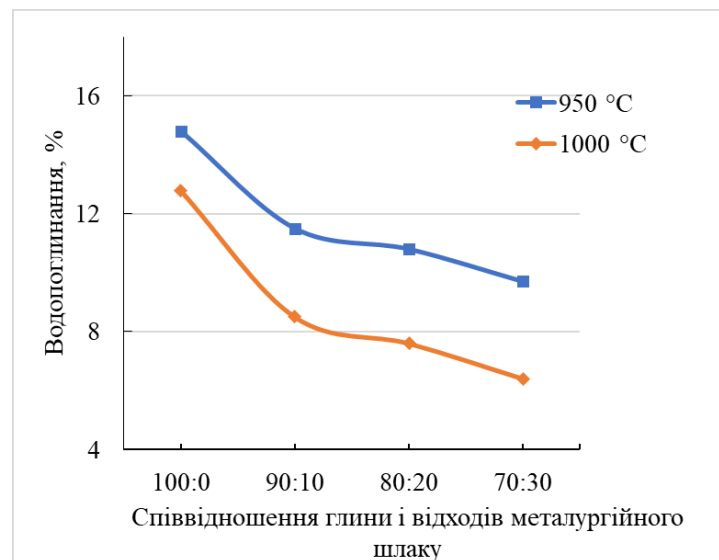


Рис. 3. Залежність водопоглинання керамічної цегли від складів досліджуваних мас

Також проводили візуальний огляд досліджуваних зразків на наявність тріщин, викривлень, оскільки якість випалення впливає не лише на механічну міцність, а й на водопоглинання керамічних виробів.

### Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Використання техногенних сировинних матеріалів для виробництва будівельної кераміки – це перспективний напрямок розвитку будівельної індустрії. Використання відходів металургійного виробництва у виробництві керамічної цегли показало як вторинні матеріали можуть бути ефективно інтегровані в будівельну індустрію. Результати дослідження свідчать про те, що такі інновації не лише підвищують якість матеріалів, але й значно знижують їх екологічний слід, що дозволяє економити природні ресурси, зменшити обсяги відходів та отримати екологічно чисті будівельні матеріали.

Водопоглинання та міцність цегли, виготовленої з 30 % додаванням відходів металургійного виробництва, значно покращилися. Водопоглинання зменшилося в 1,5 рази при 950 °C і в 2,0 рази при випаленні при 1000 °C, що є важливим фактором, оскільки ці властивості матеріалів впливають на їх довговічність і якість. Межа міцності на вигин збільшилася більше, ніж в 2 рази при випаленні як при 950 °C, так і при 1000 °C, в той час як межа міцності на стиск майже в 3 рази при 950 і 1000 °C.

Дослідження показали, що використання відходів металургійного виробництва зменшують усадку цегли під час висихання та випалення. Це призводить до зменшення ризику тріщин та деформацій, що може знизити витрати на ремонт і заміну матеріалів.

Зниження усадки та покращення експлуатаційних характеристик цегли дозволяють зменшити витрати на енергію під час виробництва. Це пов'язано з тим, що цегла потребує меншої температури для випалу, що, в свою чергу, зменшує споживання пального.

Ефективність переробки відходів металургійного виробництва пов'язане з наявністю державної політики в цій сфері. Основним споживачем шлаків все таки залишається будівельна галузь, де їх використовують для виробництва бетону, цегли, теплоізоляційних сумішей, цементу, шлакоблоків, газобетону, абразивів, пінобетонів, руберойду, сухих будівельних сумішей, тротуарної плитки та шиферу. Одним з найперспективніших напрямків утилізації шлакових матеріалів вважають будівництво доріг. Для металургійних шлаків вже розроблені технології переробки, відповідні ДСТУ, економічна оцінка, створена повна номенклатура з конкретними рекомендаціями щодо можливого напрямку їх використання, розроблені методики оцінки ефективних напрямів рециклінгу [1]. Тому ця область досліджень залишається перспективною з багатьох точок зору – технологічної, економічної, екологічної та ін.

### Література

1. Білоусова К. Не відходи, а ресурси: що робити з мільярдами тонн металургійних шлаків України. Ecopolitic.com.ua Режим доступу: <https://ecopolitic.com.ua/ua/news/ne-vidhodi-a-resursi-shho-robiti-z-milyardami-tonn-metalurgijnih-shlakiv-ukraini/>
2. Meshram S., Raut S.P., Ansari K. et al. Waste slags as sustainable construction materials: a compressive review on physico mechanical properties/ Meshram S., Raut S.P., Ansari K. et al. // Journal of Materials Research and Technology. – 2023. – Volume 23. – P. 5821-5845. DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.02.176
3. Tripathy S. K., Dasu J., Murthy Y. R. et al. Utilisation perspective on water quenched and air-cooled blast furnace slags/Tripathy S. K., Dasu J., Murthy Y. R. et al. // Journal of Cleaner Production. – 2020. – Volume 262. – P.121354. : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620314013>
4. Himabindu M., Raj V. H., Dutt A. et al. Recycling Waste into Building Materials: Innovations and Prospects in Brick Production for Sustainable Construction/Himabindu M., Raj V. H., Dutt A. et al.// 3rd International Conference on Applied Research and Engineering (ICARAE2023). E3S Web of Conferences. Volume 505, 04001 (2024) <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202450504001>
5. Rehman M. U., Ahmad M., Rashid K. Influence of fluxing oxides from waste on the production and physico-mechanical properties of fired clay brick: A review/ Rehman M. U., Ahmad M., Rashid K.// Journal of Building Engineering. – 2020. – Volume 27. – P. 100965. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.100965>

### References

1. Bilousova K. Ne vidhody, a resursy: scho robyty z milyardamy tonn metalurgijnyh shlakiv Ukrainy. Ecpolitic.com.ua Rezhym dostupu : <https://ecopolitic.com.ua/ua/news/ne-vidhodi-a-resursi-shho-robiti-z-milyardami-tonn-metalurgijnih-shlakiv-ukraini/>
2. Meshram S., Raut S.P., Ansari K. et al. Waste slags as sustainable construction materials: a compressive review on physico mechanical properties/ Meshram S., Raut S.P., Ansari K. et al. // Journal of Materials Research and Technology. – 2023. – Volume 23. – P. 5821-5845. DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.02.176
3. Tripathy S. K., Dasu J., Murthy Y. R. et al. Utilisation perspective on water quenched and air-cooled blast furnace slags/Tripathy S. K., Dasu J., Murthy Y. R. et al. // Journal of Cleaner Production. – 2020. – Volume 262. – P.121354. : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620314013>
4. Himabindu M., Raj V. H., Dutt A. et al. Recycling Waste into Building Materials: Innovations and Prospects in Brick Production for Sustainable Construction/Himabindu M., Raj V. H., Dutt A. et al.// 3rd International Conference on Applied Research and Engineering (ICARAE2023). E3S Web of Conferences. Volume 505, 04001 (2024) <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202450504001>
5. Rehman M. U., Ahmad M., Rashid K. Influence of fluxing oxides from waste on the production and physico-mechanical properties of fired clay brick: A review/ Rehman M. U., Ahmad M., Rashid K.// Journal of Building Engineering. – 2020. – Volume 27. – P. 100965. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.100965>