

НАКОПИЧЕННЯ ШЛАКІВ МЕТАЛУРГІЙНИХ ПІДПРИЄМСТВ: ОЦІНКА ВПЛИВУ НА ДОВКІЛЛЯ ТА ЕКОЛОГІЧНО ОБҐРУНТОВАНЕ ПОВОДЖЕННЯ

Бондар О.І., Риженко Н.О., Салій І.В.

Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління
вул. Митрополита Василя Липківського, 35, корп. 2., 03035, м. Київ
dei20015@ukr.net, alsko2011@ukr.net, igorsalij1964@gmail.com

Розглянуті найбільш вагомі чинники забруднення промисловими відходами, зокрема, шлаками металургійних підприємств. навколишнього середовища та їх негативний вплив на всі компоненти довкілля. При відкритому способі складування відвалів шлак є джерелом забруднення атмосфери через емісію поллютантів у повітря, об'єкти гідросфери і ґрунт, впливаючи при цьому на стан флори, фауни і здоров'я людей. Негативні наслідки впливу шлаків у відвалах є багатофакторними: ґрунти (зміна щільності зложення ґрунтового профілю, забруднення ґрунту та міграція поллютантів за ґрунтовым профілем); водні екосистеми (забруднення водних об'єктів токсикантами; міграція небезпечних речовин у ґрунтові води); атмосферне повітря (забруднення токсикантами та їх перенесення на значні відстані); вплив на клімат; здоров'я людини (підвищення ризику онкозахворювань, вплив на імунну систему); ландшафти (руйнування фацій та зміна (або утворення нових) елементів рельєфу, порушення функціонування ландшафтоутворюючих чинників, зміщення компонентної та територіальної екологічної рівноваги в ландшафті, нерациональне використання земельних ресурсів); біота (вплив на біорізноманіття, зниження біопродуктивності). Впровадження технологій використання металургійних шлаків як заміника природних дорожньо-будівельних матеріалів у дорожньому будівництві призведе до зниження обсягів відходів – шлакових відвалів, а також сприятиме збереженню природних ресурсів, що використовуються у виробництві традиційних будівельних матеріалів. Тому шлак доцільно розглядати не як відходи, а цінну сировину, що забезпечує і стимулює впровадження екологічно дружних технологій, зменшуючи навантаження на компоненти довкілля від емісій токсикантів та інших небезпечних впливів, що призведе до істотних позитивних змін як для здоров'я населення, так і для біоти. *Ключові слова:* шлаки, відходи, оцінка впливу на довкілля, екологічно обґрунтоване поводження.

Storage of metallurgical enterprises slags: environmental impact assessment and environmentally friendly management.
Bondar O., Ryzhenko N., Saliy I.

One of the most important factors of environmental pollution and negative impact on all components of the environment is the large amount of industrial waste, including slag from metallurgical enterprises. In the open method of storage of dumps, slag is a source of air, soil, water and biota pollution through the emission of pollutants. The negative consequences of the impact of slag in the dumps are multifactorial: soils (change in the solidity of the soil profile, soil contamination and migration of pollutants in the soil profile); aquatic ecosystems (pollution of water with toxicants; migration of hazardous substances into groundwater); atmospheric air (pollution by toxicants and their transfer over long distances); climate impact; human health (increased risk of cancer, effects on the immune system); landscapes (destruction of facies and change (or formation) of new relief elements, dysfunction of landscape-forming factors, displacement of component and territorial ecological balance in the landscape, irrational use of land resources); biota (impact on biodiversity, reduction of bioproductivity). The technologies implementation of the use of metallurgical slag will lead to reduce the volume of slag dumps, as well as contribute to the preservation of natural resources used for the production of traditional building materials. Therefore, slag should be considered not as waste, but a valuable product that provides the introduction of environmentally friendly technologies. As a result, the load on the environment components from emissions of toxicants and other hazardous effects will be considerably reduced. This will lead to significant positive changes for both public health and biota. *Key words:* slags, waste, environmental impact assessment, environmentally friendly management.

Постановка проблеми. У рейтингу WorldSteelAssociation (WSA) Україна зберігає провідне місце у виробництві металопродукції і наближається до країн першої десятки світу [1]. Виробництво металопродукції в Україні нині забезпечують провідні підприємства, зокрема, ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», ПАТ «Металургійний комбінат «Азовсталь», ПАТ «ММК ім. Ілліча, ПАТ «Дніпровський металургійний комбінат», ПАТ «Запоріжсталь» тощо. За оперативними даними ОП «Укрметалургпром», за 5 місяців 2020 року українськими металургійними підприємствами вироблено 7,43 млн тонн металопродукції (93,8% порів-

няно з аналогічним періодом 2019 року). Однак металургійна галузь є одним із найбільш інтенсивних забруднювачів, викиди якої від стаціонарних джерел забруднення сягають 38% загальної кількості поллютантів. На підприємства чорної металургії припадає близько 15% всіх промислових викидів в атмосферу пилу, 8–10% – викидів діоксиду сірки, 10–15% – загального обсягу споживання води. До цього варто додати величезну кількість твердих відходів (шлаків, шламів тощо). Структура виробництва шлаку по деяких металургійних підприємствах України у 2018 році наведена на рисунку 1.

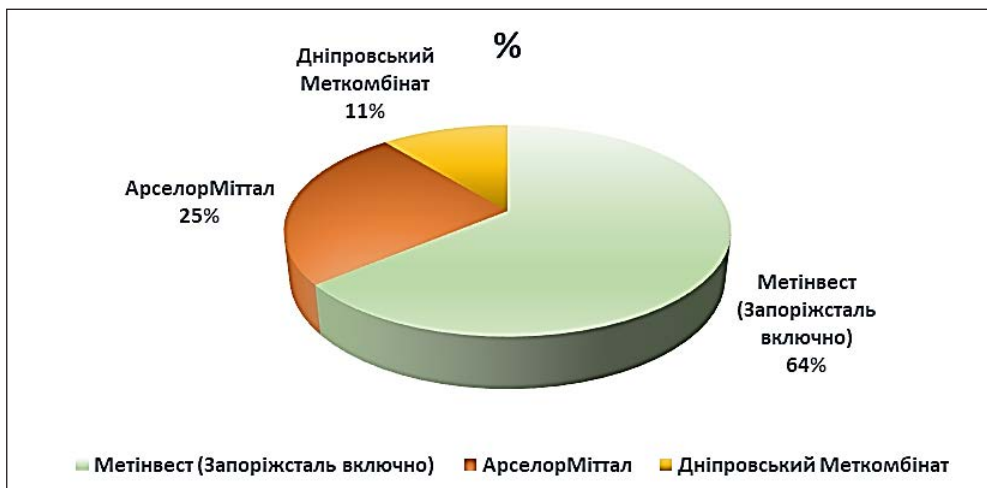


Рис. 1. Структура виробництва шлаку по металургійних підприємствах

За різними оцінками, в Україні накопичено приблизно 35–36 млрд тонн різних техногенних відходів. Обсяг накопичених у відвалах золошлакових матеріалів, твердих продуктів згорання вугілля від ТЕЦ – понад 250 млн тонн, металургійних шлаків – понад 160 млн тонн. Більшість із них хоч і мають ресурсну цінність, у буквальному сенсі зберігаються під відкритим небом; 54,5% обсягу металургійних шлаків розміщується у відвалах або на тимчасових складах після видобутку з них скрапу і флюсів для застосування в технологічному процесі. Сталеплавильний шлак у нашій країні практично не знаходить застосування. Тоді як у країнах ЄС, за даними Euroslag, 46% від загального обсягу його утилізації доводиться саме на дорожнє будівництво. Також в ЄС його застосовують як мінеральні добрива (2,7%) і для гідравлічного інжинірингу (2,2%). На рисунку 2 наведено розподіл відходів металургійних підприємств (за Носковою та Макогон) [2]. Основну частину відходів металургійних підприємств становлять шлаки, які є багатокомпонентними системами, що складаються з продуктів високотемпературної взаємодії руди, порожньої породи, флюсів, палива та штучних мінералів, містять оксиди (SiO₂, CaO, FeO, MgO, Al₂O₃ і (рідше) ZnO) змінного складу, є нестійкими у фізико-хімічних умовах земної поверхні.

Річне утворення шлаків у середньому становить: 4,4 млн тонн доменних шлаків, 2,6 млн тонн сталеплавильних, 0,829 млн тонн феросплавних. За даними Каненко та Злобина, на металургійних підприємствах України накопичено 240 млн тонн шлаків, 128 млн тонн з яких є сталеплавильні [3]. Подальше накопичення металургійних шлаків як відходів завдаватиме серйозної шкоди довкіллю і здоров'ю людини, які займають величезні площі, забруднюють токсичними речовинами компоненти екосистеми, підвищують собівартість готової продукції підприємств через значні витрати на їх транспортування, розміщення і зберігання. У зв'язку

з цим одним із найактуальніших прикладних екологічних питань є дослідження можливості застосування шлаків як будівельних матеріалів.



Рис. 2. Розподіл відходів металургійних підприємств

Зв'язок авторського доробку з важливими науковими та практичними завданнями. Дослідження виконано в рамках НДР «Розроблення екологічно прийнятних технологій поводження з відходами гірничорудної та металургійної промисловості» за номером Державної реєстрації 0120U101148.

Виклад основного матеріалу.

Властивості шлаку. Властивості доменного шлаку у відвалах залежать від характеристик вихідних матеріалів, режиму доменного процесу і від умов його охолодження після зливу. Тому відвальний доменний шлак у відвалах різних заводів та навіть у відвалі одного комбінату відрізняється за зовнішнім виглядом, складом, будовою, фізичним та механічним властивостями. З часом під дією вологи і вуглекислоти відбуваються більш-менш тривалі фізичні та хімічні процеси вапняного і залізного розпаду. Щільні кам'яноподібні шматки мають міцність на стиснення 150–600 кг/см² і більше, в той час як

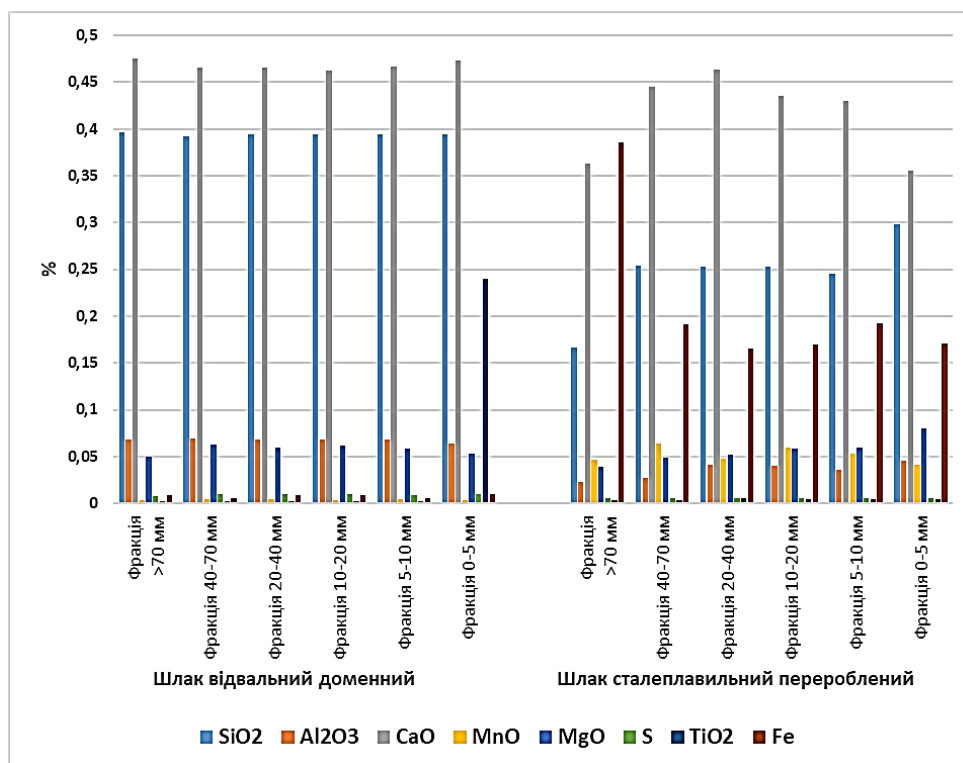


Рис. 3. Хімічний склад шлаків ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»

пористі різновиди – 50–150 кг/см². Переважаючими за розміром шлаки у відвалах більшості заводів є фракції 5–40 мм. Вони становлять до 70% за вагою. Великі шматки і брили містяться, як правило, в кількості 5–10%, а дрібні і пил розміром до 5 мм – 25–30%. Однак гранулометричний склад одержаного шлаку залежить від методу розроблення відвалів. Шлак є металургійним розплавом (після твердіння – каменевидна або склоподібна речовина), що покриває поверхню рідкого металу при металургійних процесах – плавлі сировини, обробці розплавлених проміжних продуктів і рафінуванні металів. Шлак є сплавом оксидів змінного складу; головні компоненти шлаку – кислотний оксид SiO₂ і основні оксиди CaO, FeO, MgO, а також амфотерні Al₂O₃ (рис. 3).

Екологічні проблеми накопичення шлаків як відходів. Ефект впливу забрудників-складників відходів на довкілля виявляється в різних напрямках, тому в процесі переробки та використання будь-яких відходів виробництва, особливо шлаків, доцільно враховувати ефект впливу на довкілля як за сценарію невикористання відходів як потенційних будівельних матеріалів, так і за умов їх використання. При відкритому способі складування відвалів шлак є джерелом забруднення атмосфери через емісію забруднюючих речовин у повітря, об'єкти гідросфери і ґрунт, а через них – на стан флори, фауни і здоров'я людей.

За умов складування на відвалах шлак піддається впливу атмосфери, що робить його чутливим

до фізичних та хімічних процесів [4; 5]. Скрізь, де є металургійні шлаки, у водоймах накопичуються води з надзвичайно високою концентрацією сульфідів, які іноді прориваються в струмки і річки, що призводить до сильного забруднення та виникнення техногенних аварій. Кисень у воді витрачається на окислення сульфідів, вміст кисню в таких сульфідних водоймах дорівнює нулю і це призводить до загибелі живих організмів. Основні види впливу відходів металургійних підприємств на довкілля та здоров'я людини наведено на рисунку 4.

Більшість металургійних комбінатів мають відвали, в яких переважно складаються шлаки без спеціальної обробки і спеціалізована шлакова продукція перед відправленням її споживачам. Для складування відходів використовується до 40% території підприємства. Збільшення обсягів утворення відходів призведе до низки негативних наслідків (рис. 5).

За розрахунками Крюковської (2019), за використання шлаків, зменшення їх обсягів у відвалах призведе до поліпшення екологічного стану Криворізького регіону [6–8]. Зниження обсягів шлаків у відвалах на 50% дасть змогу знизити ймовірність виникнення головної події, яка призведе до екологічних проблем на 13,9% щодо базового сценарію. При середньому значенні обсягу утворення з 1 тонни виплавленого чавуну утворюється 450–540 кг шлаку, якщо прийняти середнє значення 500 кг, то річний обсяг утворення шлаків становить 11,28 млн тонн. Прогнозована маса збереженого дорожньо-



Рис. 4. Основні види впливу відходів металургійних підприємств на довкілля та здоров'я людини

будівельного матеріалу у випадку 20% заміни природних матеріалів шлаками для 3000 км доріг різної категорії складає 2 905 848 т, а для 50% – 7 264 620 т. Необхідна маса шлаків для заміни цього обсягу природних матеріалів становить 2 356 550 т та 5 891 375 т відповідно. Ступінь використання утворених шлаків (тобто утилізації відходів) у річному вимірі за різними сценаріями становить 21 та 52% відповідно.

Світовий досвід «екологічно дружного» використання металургійних шлаків як альтернативного заміника природних будівельних матеріалів у дорожньому будівництві. Є низка підходів щодо використання шлаків як будівельних матеріалів доріг. Шлак має певну споживчу цінність у зв'язку з можливістю отримання продукції з певними важливими властивостями, внаслідок цього значення шлакопереробки для металургів різко зростає. Продуктами переробки в металургійних відходах є щебінь, гранульований шлак, шлакова пемза, мінеральна вата [6]. За рахунок використання відходів як вторинних матеріальних ресурсів можна вирішити низку таких важливих задач, як економія сировини, запобігання забруднення водою, ґрунту і повітряного басейну, використання відходів для будівництва доріг. Отже, шлакові матеріали варто розглядати як одні з найбільш технічно та економічно вигідних альтернативних матеріалів для використання в будь-

яких будівельно-ремонтних роботах, як нині, так і в майбутньому. Поступове скорочення накопичення відходів металургійної промисловості, розширення можливостей утилізації, знешкодження, екологічно безпечно їх видалення для повторного використання в дорожньому будівництві дасть змогу досягнути підвищення рівня екологічної безпеки – звільнення площ, з одного боку, і заміна природних матеріалів – з іншого.

Під час виробництва 3 т нержавіючої сталі утворюється близько 1 т сталевих шлаку. Пораховано, що за рік 50 млн т сталевих шлаку виробляється з різних металургійних виробництв по всьому світу. Тільки в Європі близько 12 млн т сталевих шлаку виробляється щороку. Сталевий шлак є залишковим матеріалом, що утворюється під час виробництва нержавіючої сталі чи від плавлення лома для виробництва сталі в електродуговій печі (EAF) або шляхом перетворення заліза на сталь в основній кисневій печі (BOF). Сталевий шлак конкурує з природним агрегатом, висока продуктивність якого обмежена. Тому шлак доцільно розглядати не як відходи, а цінну продукцію, яка забезпечує впровадження екологічно дружних технологій.

За даними Mohd. Rosli Hainin et al (2015), сталеві шлаки успішно використовуються для будівництва доріг [9]. Країни Європи, Канада, Австралія та США

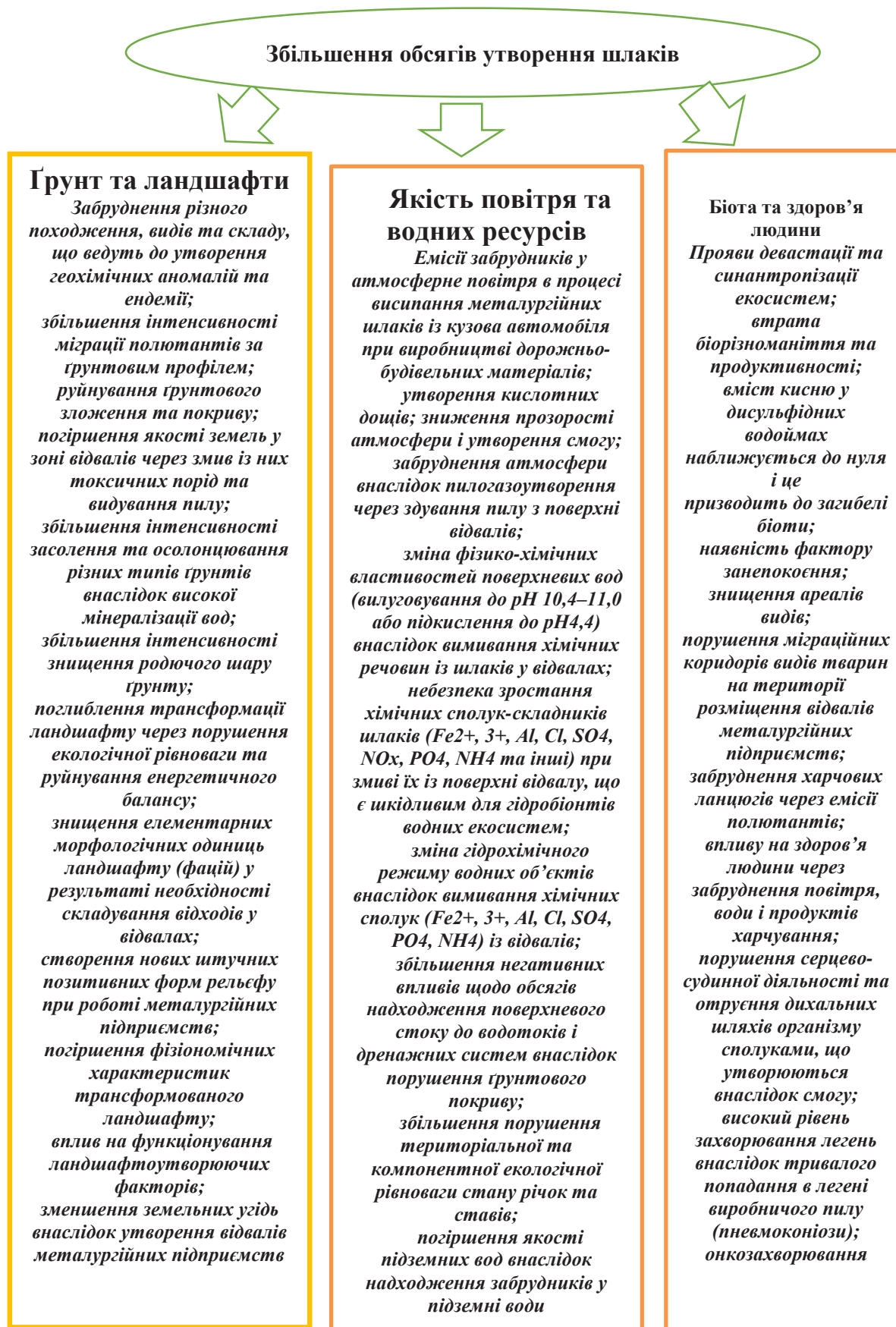


Рис. 5. Наслідки збільшення обсягів утворення шлаків

визнають сталеві шлаки навіть не як промислові відходи, а як корисний будівельний матеріал, та успішно використовують для наплавлення та основи бруківки. Khan et al. (2002) зазначали, що перевагою використання сталевих шлакових бетону є висока стійкість до ковзання (як у вологих, так і сухих умовах), що надаються протягом усього періоду експлуатації тротуарів [10]. Stock і Ibberson (1996) описували використання сталевих шлаків у бітумному дорожньому будівництві в Південному Йоркширі та його околицях протягом останніх 60 років: більше 300 000 т сталевих шлаку на рік було використано для будівництва доріг [11]. Різні країни по всьому світу зі спекотним кліматом, наприклад, Сінгапур, Малайзія, Австралія, Південна Африка, Саудівська Аравія та Італія, вже реалізували чудові властивості шлакового асфальту [12]. Висока температура поверхні змушує традиційний асфальт стати пластичним, а потім деформується дуже легко, що призводить до розриву [13]. Однак використання шлаків EAF показало економічну доцільність порівняно з природними матеріалами [14]. Розрахунки Mumrin et al. (2005) показали, що вартість будівництва дорожньої бази може зменшитися при використанні сталевих шлаку в поєднанні з природною ґрунтовою сумішшю, оскільки це забезпечує максимальну міцність і стійкість при коротшій товщині порівняно з використанням традиційних матеріалів. Результати випробувань Kehagia (2008) виявили, що сталевий шлак EAF є кращим у високо напружених зонах, де традиційні матеріали малоефективні [15–17]. Nainin et al. (2012) також зазначали властивість шлаків утримувати тепло значно довше, ніж природні агрегати, що корисне в процесі будівництва доріг [18]. Напрями застосування відходів у дорожньому будівництві наведено на рисунку 6.

Відповідно до Каталогу місцевих матеріалів та відходів виробництва для дорожнього будівництва [19], найширше застосовані види промислових відходів і вторинних продуктів промисловості, що наведено на рисунку 7.

За різними оцінками, у Сполучених Штатах Америки щорічно виробляється біля 15,5 млн т доменного шлаку [20]. Майже весь доменний шлак, вироблений у США, і приблизно 90% його кількості – шлак із повітряним охолодженням (ACBFS). У разі подрібнення до потрібної товщини хімічний склад і склоподібна (некристалічна) природа осклованих шлаків такі, що у сполученні з водою вони реагують з утворенням цементних продуктів гідратації. Величина цих цементних реакцій залежить від хімічного складу, вмісту скла та ступеня подрібнення шлаку. Доменний шлак із повітряним охолодженням (ACBFS) вважається багатьма спеціалізованими агентствами звичайним заповнювачем і може замінити як грубі, так і дрібні заповнювачі в асфальтових покриттях. Однак ACBFS краще абсорбує, ніж звичайний заповнювач і тому користується високим попитом. Крім того, шлак має меншу питому вагу, ніж звичайні мінеральні наповнювачі, що призводить до більш високого виходу асфальтового покриття (більший обсяг при тій самій вазі). Принаймні, в 17 штатах США є специфікації, що охоплюють використання ACBFS як заповнювач в асфальті гарячої суміші для поверхневого шару. До них належить Алабама, Колорадо, Флорида, Іллінойс, Індіана, Кентуккі, Луїзіана, Мічиган, Нью-Йорк, Огайо, Пенсильванія, Теннессі, Техас, Юта, Вірджинія, Західна Вірджинія і Вісконсин [21]. Типовий склад доменного шлаку США наведено у таблиці 1.



Рис. 6. Напрями застосування відходів у дорожньому будівництві

Таблиця 1
Типовий склад доменного шлаку США

Складники	%
Оксид кальцію (CaO)	41,0
Діоксид кремнію (SiO ₂)	36,0
Оксид алюмінію (Al ₂ O ₃)	13,0
Оксид магнію (MgO)	7,0
Оксид заліза (FeO або Fe ₂ O ₃)	0,5
Оксид мангану (MnO)	0,8
Сірка (S)	1,5

Асфальтобетон із гарячою сумішшю, що містить правильно відібрані і оброблені агрегати АСВФС, демонструє гарний опір тертю на поверхнях дорожнього покриття, хорошу стійкість до зачистки і високу стабільність. Кутова форма і високий кут тертя (від 40° до 45°) подрібненого АСВФС сприяє високій бічній стабільності, коли АСВФС вводиться в дорожні суміші. Це особливо корисно, коли необхідно враховувати жорстке гальмування і прискорення. АСВФС також виявляє високу стійкість до заморожування-відтаування та вивітрювання [22].

Доменні шлаки в багатьох країнах переробляють переважно на щебінь. У Франції та Чехії шлаки гранують. Шлаки у Франції та Китаї низько основні і не схильні до силікатного розпаду. В Англії, Чехії частина шлаків має високу основність і використання їх обмежене [23]. Хімічний склад доменних шлаків у Чехії (на прикладі підприємства Kotouč Štramberk, Ltd) наведено в таблиці 2 [24].

В Японії більше 30 років використовується шлак доменної печі як бетонний агрегат [25]. Щорічний продаж шлаків для сукупного використання корпорації Nippon Steel & Sumitomo Metal залишається на рівні 1 млн т. Оскільки сучасна тенденція світової спільноти орієнтована на переробку відходів, ком-

панія актуалізувала реалізацію ефективного використання шлаку, дослідивши використання доменного шлаку як конкретного агрегату для широких різновидів застосувань. Шлак використовується як бетонний агрегат для дорожнього покриття, а також для лиття бетонних виробів. Використання шлаку розширюється, і ще в 2013 році було запропоновано використання тонкодисперсного шлакоутворювача для високоміцного бетону. Кількість вироблення шлаку в Японії становить приблизно 300 кг на 1 т виробленого чавуну, а щорічне виробництво доменного шлаку (шлаку BF) перевищує 24 млн т.

Таблиця 2

Хімічний склад доменних шлаків підприємства Kotouč Štramberk, Ltd, Чехія

Показник	Одиниці виміру	Значення
CaO	%	36,3
MgO	%	11,7
SiO ₂	%	42,5
Al ₂ O ₃	%	6,8
Fe ₂ O ₃	%	0,18
SO ₃	%	1,56
K ₂ O	%	0,36
Cl	µg·g ⁻¹	156,6
Sr	µg·g ⁻¹	377,3
Ba	µg·g ⁻¹	834,7

Доменні шлаки також використовують для виробництва шлакової вати. З розплавлених металургійних шлаків відливають каміння для бруківки доріг, бордюрний камінь, жаростійкі плитки, труби й інші вироби. Основним споживачем шлаків є цементна промисловість. Європейськими нормами дозволяється вводити в портландцемент до 35%

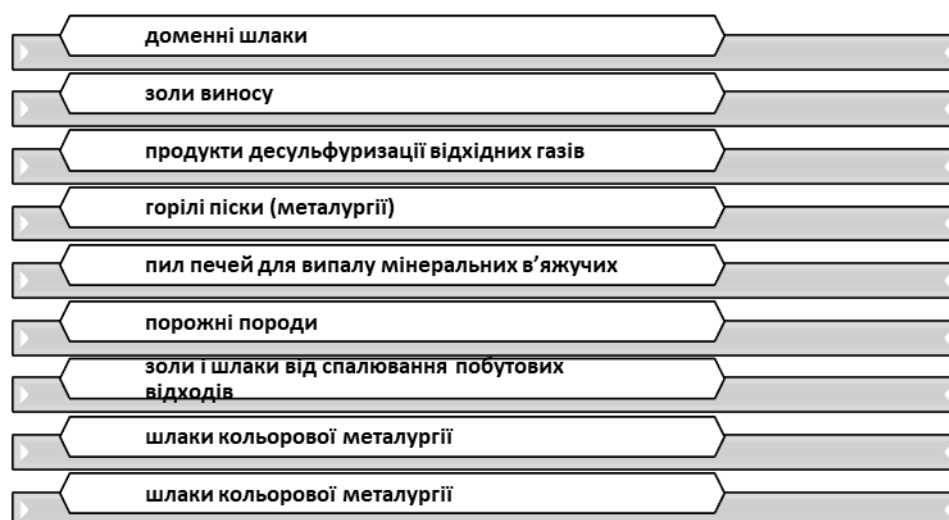


Рис. 7. Найбільш широко застосовані види промислових відходів і вторинних продуктів промисловості

доменного гранульованого шлаку, а в шлакопортландцемент – до 80%. Введення доменних шлаків у сировинну суміш збільшує продуктивність печей і знижує витрату палива на 15%, а собівартість – на 25–30%. Крім того, шлак як активна добавка значно покращує низку будівельно-технічних властивостей цементу [26].

Чільне місце за обсягом та значенням для дорожньо-будівельної галузі посідають доменні шлаки, отримані як побічний продукт при виплавці чавуну із залізних руд. Його особливістю є неоднорідність за розмірами, міцністю та фізико-хімічними властивостями, що ще недавно змушувало ставитися з деякою недовірою до цього матеріалу і обмежувало його застосування [6; 7]. Хімічний склад металургійних шлаків та їх фізичні властивості дають змогу застосувати шлаки як компонент для виробництва будівельних матеріалів (шлакобетону і цементу) в дорожньому будівництві [8]. Використання шлакових матеріалів є найбільш технічно та економічно вигідними для використання в будь-яких будівельно-ремонтних роботах при будівництві автомобільних доріг. Щебінь та суміші з шлакових матеріалів застосовують у шарах дорожнього одягу, в процесі укріплення узбіччя, влаштування шорстких поверхневих обробок покриттів та приготування асфальтобетонних сумішей [27].

Металургійні шлаки всіх металургійних комбінатів України придатні для дорожнього будівництва. Важливим є питання, для яких доріг і в яких конструктивних шарах дорожнього одягу їх застосовувати. На думку А.Я. Тулаєва, щебінь із доменних шлаків заводів України має подрібнюваність 20–40% і зношування в поличному барабані 30–55%. При таких показниках механічних властивостей шлаки південних заводів найчастіше не можуть бути використані у верхніх шарах дорожніх покриттів. Але водночас вони належать до категорії шлаків із високою активністю (4–8 МПа). Тому використання їх в'язучих властивостей при будівництві основ дорожнього одягу дає змогу одержувати більш економічні й довговічні конструкції [28]. Альтернативою гранітному щебню може бути щебінь із шлаку металургійного,

який, на відміну від гранітного, з часом набирає міцність. Пікове значення міцності шлаку в конструктивному шарі дорожнього одягу досягається на 5-й рік експлуатації автомобільної дороги.

Головні висновки. Одним із найбільш вагомих чинників забруднення навколишнього середовища і негативного впливу на всі компоненти довкілля є значна кількість промислових відходів, зокрема, шлаків металургійних підприємств. При відкритому способі складування відвалів шлак є джерелом забруднення атмосфери через емісію забруднюючих речовин у повітря, об'єкти гідросфери і ґрунт, негативно впливаючи на стан флори, фауни і здоров'я людей.

Негативні наслідки впливу шлаків у відвалах є багатофакторними: ґрунти (зміна щільності зложення ґрунтового профілю, забруднення ґрунту та міграція поллютантів за ґрунтовым профілем); водні екосистеми (забруднення водних об'єктів токсикантами; міграція небезпечних речовин у ґрунтові води); атмосферне повітря (забруднення токсикантами та їх перенесення на значні відстані); вплив на клімат; здоров'я людини (підвищення ризику онкозахворень, вплив на імунну систему); ландшафти (руйнування фацій та зміна (або утворення нових) елементів рельєфу, порушення функціонування ландшафтоутворюючих факторів, зміщення компонентної та територіальної екологічної рівноваги в ландшафті, нераціональне використання земельних ресурсів); біота (вплив на біорізноманіття, зниження біопродуктивності).

Зменшення обсягів металургійних шлаків у відвалах підприємств Кривого Рогу призведе до поліпшення екологічного стану регіону. Впровадження технологій використання металургійних шлаків як заміника природних дорожньо-будівельних матеріалів у дорожньому будівництві призведе до зниження обсягів шлакових відвалів та збереження природних ресурсів, які використовуються для виробництва традиційних дорожньо-будівельних матеріалів. Тому навантаження на компоненти довкілля від емісій токсикантів та інших небезпечних впливів значно зменшиться, що призведе до суттєвих позитивних змін як для здоров'я населення, так і для біоти.

Література

1. Рейтинг WorldSteelAssociation. URL: <https://www.worldsteel.org/media-centre/press-releases/2020/Global-crude-steel-output-increases-by-3.4--in-2019.html?fbclid=IwAR06LxjASFv4aul7rMQqEwxxBNuxJFU6b03GQ5GnlBXI-6lC2ocp6Cnyyo>
2. Носков В.А., Макогон В.Ф. Состояние и перспективы утилизации железосодержащих отходов в металлургическом производстве Украины. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2001. № 4. С. 98.
3. Каненко Г.М., Злобин А.Г. и др. Использование отходов металлургических предприятий в строительной индустрии. *Экология и промышленность*. 2005. № 1 (2). С. 41.
4. Спільник Н.В. Негативний вплив шлаків на навколишнє середовище URL: http://www.rusnauka.com/9_SNP_2015/Ecologia/2_190025.doc.htm
5. Макарова В.М. Вплив шлакових відвалів на стан навколишнього природного середовища Дніпропетровського району. URL: http://www.rusnauka.com/17_AVSN_2012/Ecologia
6. Крюковська Л.І., Скорченко В.Ф. Методи дослідження технічних характеристик шлаків для дорожнього будівництва. *Екологія промислових підприємств. Проблема утилізації відходів* : праці міжнародної науково-технічної конференції, 13–17 вересня 2004 р., м. Ялта. Київ : Знання, 2004. 116 с.

7. Крюковська Л.І. Підвищення рівня екологічної безпеки у дорожньому будівництві шляхом використання металургійних шлаків : дис. ... канд. техн. наук : 21.06.01 «Екобезпека». 2019. 188 с.
8. Крюковська Л.І., Скорченко В.Ф. Методи дослідження технічних характеристик шлаків для дорожнього будівництва. *Екологія промислових підприємств. Проблема утилізації отходов* : праці міжнародної науково-технічної конференції, 13–17 вересня 2004 р., м. Ялта. Київ : Знання, 2004. 116 с.
9. Mohd. Rosli Hainina, Md. Maniruzzaman A. Azizab, Zulfiqar Alia, Ramadhansyah Putra Jayaa, Moetaz M. El-Sergany, Haryati Yaacob Steel Slag as A Road Construction Material. *Jurnal Teknologi*. 73:4, 2015, pp. 33–38.
10. Khan, Z.A., Malkawi, R.H., Al-Ofi, K.A., Khan, N. 2002. Review of Steel Slag Utilization in Saudi Arabia. 6 th Saudi Engineering Conference. KFUPM, Dhahran, Saudi Arabia.
11. Stock, A., Ibberson, C.M., Taylor, I. 1996. Skidding Characteristics of Pavement Surfaces Incorporating Steel Slag Aggregates. *Journal of the Transportation Research Board*. 1545(1): 35–40.
12. Jones, N. 2000. The Successful Use of Electric Arc Furnace Slag in Asphalt. Proceedings 2nd European Slag Conference. Euroslag.
13. Martin, J., Cooley Jr, L.A., Hainin, M.R. 2003. Production and Construction Issues for Moisture Sensitivity of Hot-Mix Asphalt Pavements. Transportation Research Board National Seminar. San Diego, California. Pp. 209–222.
14. Rohde, L., Peres Nãñez, W., Augusto Pereira Ceratti, J. 2003. Electric Arc Furnace Steel Slag: Base Material for Low-Volume Roads. *Journal of the Transportation Research Board*. 1819(1): 201–207.
15. Kehagia, F. 2008. Skid resistance performance of asphalt wearing courses with electric arc furnace slag aggregates. *Waste Management & Research*, 27(3), 288–294.
16. Ziari, H., & Khabiri, M.M. 2007. Preventative maintenance of flexible pavement and mechanical properties of steel slag asphalt. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 15(3), 188–192
17. Chris Maharaj, Daniel White, Rean Maharaj & Cheryon Morin Re-use of steel slag as an aggregate to asphaltic road pavement surface. *Cogent Engineering* (2017), 4: 1416889.
18. Hainin, M.R., Yusoff, N.I.M., Sabri, M.F.M., Aziz, M.A.A., Hameed, M.A.S., & Reshi, W.F. (2012). Steel slag as an aggregate replacement in Malaysian hot mix asphalt. *ISRN Civil Engineering*, 2012, 1–5. <https://doi.org/10.5402/2012/459016>
19. Каталог місцевих матеріалів та відходів виробництва для дорожнього будівництва ДП «Державний дорожній науково-дослідний інститут імені М.П. Шульгіна» (ДП «ДерждорНД»). 2011 р.
20. User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction. URL: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/97148/bfs1.cfm>
21. Collins, R.J. and S.K. Ciesielski. 1994. Recycling and Use of Waste Materials and By-Products in Highway Construction, National Cooperative Highway Research Program Synthesis of Highway Practice 199, Transportation Research Board, Washington, DC.
22. ASA/RTA. A Guide to the Use of Slag in Roads, Australian Slag Association and Roads and Traffic Authority of NSW, New South Wales, Australia, 1993.
23. Рекус И.Г., Шорина О.С. Основы экологии и рационального природопользования. Москва, МГУП, 2001. 146 с.
24. Václavík V., Dirner V., Dvorský T., Daxner J. The use of blast furnace slag. *Metalurgija*, 51.2012 4, 461–464.
25. Takayuki Miyamoto, Koichi Torii, Kenichi Akahane, Sachiko Hayashiguchi. 2015. Production and Use of Blast Furnace Slag Aggregate for Concrete. *Nippon steel & sumitomo metal technical report*. Vol. 109. Pp. 102–108.
26. Доменные шлаки могут заменить дорогой цемент. *Приазовский рабочий*. 2016. № 153 (20297). URL: <http://pr.ua/news.php?new=27431>
27. ДСТУ Б В.2.7-149:2008 Будівельні матеріали. Щебінь і щебенево-піщані суміші із шлаків металургійних для дорожніх робіт. Технічні умови.
28. Дорожные одежды с использованием шлаков / А.Я. Тулаев, М.В. Королев, В.С. Исаев, В.М. Юмашев. Под ред. А.Я. Тулаев. Москва, Транспорт, 1986. 221 с.