

УДК 625.7/8

О. О. Фоменко

асистент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4429-1706>

Кафедра будівництва та експлуатації автомобільних доріг ім. О.К. Бірулі
Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25,
Харків, Україна, 61002

А. В. Сєдов*

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7879-6614>

Кафедра будівництва та експлуатації автомобільних доріг ім. О.К. Бірулі
Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25,
Харків, Україна, 61002

*автор-кореспондент, e-mail: avs.1708@ukr.net

Використання золошлакових сумішей для будівництва шарів основи дорожнього одягу

Цитувати як:

Фоменко, О. О., Сєдов, А. В. (2025). Використання золошлакових сумішей для будівництва шарів основи дорожнього одягу. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 23, 370-380. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-32](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-32)

© 2025, Фоменко О. О., Сєдов А. В.

Анотація. У статті наведено інформацію щодо обсягу утворення золошлакових відходів від спалювання вугілля, обсягу їх утилізації. Дані загальні відомості щодо обсягу утворення золошлакових побічних продуктів у зарубіжній практиці, їх практичного та ефективного використання. У світовій практиці золошлаки зазвичай використовуються у виробництві будівельних матеріалів, таких як: бетон, асфальтобетонні суміші, цегли, керамічна плитка, теплоізоляція тощо. Залучення цих матеріалів до технологічного процесу дорожнього будівництва дозволить знизити негативний вплив на навколишнє середовище та розширити ресурсну базу галузі. Золошлакові відходи складаються з комбінації золуносу та паливного шлаку, які мають принципові відмінності у своїй структурі.

У ході проведених досліджень виконано оцінку деформаційних характеристик цього техногенного ґрунту в залежності від ступеня його ущільнення та вологості. Аналіз показав, що збільшення щільності на 0,01 од. коефіцієнт ущільнення дає приріст модуля пружності від 6 % до 7 %, а модуля деформації від 2 % до майже 5 %. Вплив вологості на деформативні параметри золошлакових сумішей суттєвий, хоча й децю нижчий за вплив щільності. Причому при оптимальній вологості значення модулів пружності та деформації має найменшу величину.

Аналіз хімічного та фазового складів золошлакових сумішей свідчить про схожість цих техногенних ґрунтів з природними піщаними та глинистими ґрунтами. Однак структура золошлакових сумішей визначає ряд істотних особливостей порівняно з природними ґрунтами. Порівняння величини модулів

деформації природних ґрунтів і золошлакових сумішей показує, що цей показник у техногенного ґрунту децю нижчий, ніж у піщаних ґрунтів, але не поступається природним глинисто-пиловатим ґрунтам.

Оцінено його придатність як будівельний матеріал для будівництва шарів основи дорожнього одягу автомобільних доріг.

Ключові слова: золошлакова суміш, дорожній одяг, деформаційні характеристики, вологість, коефіцієнт ущільнення, структурна міцність

Вступ

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми. Технологічний процес виробництва електроенергії на ТЕС призводить до утворення значної кількості відходів у формі шлаку і золи. Шлак і золу відносять до великоуламкових відходів.

Теплоелектростанція (ТЕС) потужністю 1 МВт/добу спалює до 10000 т кам'яного або бурого вугілля, при цьому формуються близько 2500-1000 т відходів, в залежності від типу вугілля та умов спалювання [1]. В світі широко розповсюджена практика утилізації золошлаків через будівництво доріг [2]. Позитивний досвід застосування цих матеріалів мають, наприклад США, Франція, Німеччина, Японія, Польща, Індія (табл. 1) [3, 4, 5, 6]. На рис. 1 показані напрямки використання золошлакових матеріалів. Як бачимо, у світовій практиці золошлаки зазвичай використовуються у виробництві будівельних матеріалів, таких як: бетон, асфальтобетонні суміші, цегли, керамічна плитка, теплоізоляція тощо.

Таблиця 1. Обсяги виробництва та утилізації золошлакових відходів в Україні та світі

Країна або група країн	Обсяг ЗВ на рік, млн. т	Відсоток утилізації, %
Європа (15 країн ЄС)	52,6	90,9
Індія	131,0	55,7
Японія	11,1	96,4
США	118,0	42,1
Україна	26,6	10

Застосування шлаків для будівництва доріг обумовлено не тільки питаннями зниження вартості будівництва. Мільйони тон відходів використовуються у дорожньому будівництві, вивільняючи тим самим значні території, які займані полігонами та звалищами.

Залучення цих матеріалів до технологічного процесу дорожнього будівництва дозволить знизити негативний вплив на навколишнє середовище та розширити ресурсну базу галузі.



Рис. 1. Використання золошлакових матеріалів в світі [5]

Застосування шлаків стає ще ефективнішим за рахунок нерівномірного поширення території країни, за рахунок чого знижується дальність транспортування матеріалів до об'єктів будівництва. Технології спалювання вугілля на українських ТЕС в основному передбачають гідравлічний спосіб видалення золи, з використанням води або водного лужного розчину. Для детального вивчення властивостей золошлаків, необхідно дослідити їх мінералогічний склад, сорбційну активності та структуру поверхні, які залежать від технології спалювання та ефективності систем золоуловлювання.

Вміст різних хімічних сполук в золошлакових відходах напряму залежить від типу та складу палива. Для об'єктів паливно-енергетичного комплексу України, на яких експлуатується вугільне паливо різних марок, концентрації компонентів у золошлакових відходах (кремнію, алюмінію і заліза) різні. Також невелика частина елементів присутня в золошлакових відходах у вигляді сульфатів CaSO_4 , MgSO_4 та FeSO_4 (табл. 2) [2].

Таблиця 2. Усереднений хімічний склад мінеральної частини золошлакових відходів деяких твердопаливних ТЕС [4]

Підприємство теплоенергетики	Мінеральні золошлакоутворюючі компоненти, мас. %							
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	SO_3
Старобешівська ТЕС	44–50	24 – 30	8 – 6	2,5 – 4,6		–		1,2
Миронівська ТЕС	67,8	19,8	10,9	5,5		2,8		2,1–7
Вуглегірська ТЕС	16,7	40,6	23,0	8,4		–		0,02
Краматорська ТЕЦ	49,4	22,5	17,1	10,05		–		–
Бурштинська ТЕС	48,6	23,3	15,3	4,4	2,2	0,5	1,6	0,47

Згідно з табл. 2 основну масу золошлакових відходів в середньому складають оксид кремнію – від 45 % до 60 %, оксид кальцію – від 2,5 % до 9,6 %, оксид заліза – від 4,1 % до 10,6 %, оксид магнію – від 0,5 % до 4,8 %, оксид сірки – від 0,02 % до 7 %.

оксид алюмінію – від 10,1 % до 21,8 % і триоксид сірки – від 0,03 % до 2,7 % [2].

Таким чином, можна зробити висновок, що для будівництва доріг можна використовувати всі види відходів згоряння на вугільних електростанціях.

Мета і завдання дослідження. Згідно з ДБН В.2.3-4, через сприятливі кліматичні умови, використовувати відходи згоряння вугільних теплових електростанцій можна для будівництва доріг по всій території України [6]. Головною перешкодою, яка стримує повномасштабне застосування золошлакових відходів, є недостатня вивченість механічних властивостей цих матеріалів. Таким чином, метою дослідження є обґрунтувати можливість застосування золошлакових сумішей з відвалів ТЕС при будівництві земляного полотна та шарів основи дорожнього одягу.

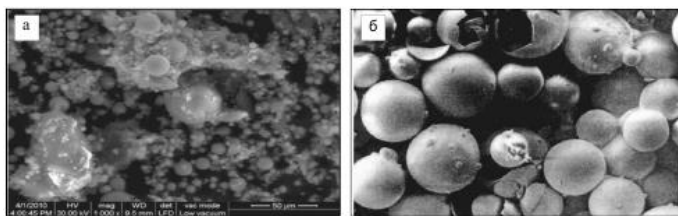
Матеріали та методи

Методологічною основою для вирішення поставлених завдань є системний підхід у вивченні досвіду застосування золошлакових сумішей при будівництві автомобільних доріг та вплив факторів на їх фізико-механічні властивості.

Результати та обговорення

Золошлакові відходи складаються із золи-уносу та шлаку, які мають відмінності структури.

Частинки зол-уносу, як правило мають сферичну або близьку до неї форму. Однак золи-уносу не завжди мають однорідні частинки. Частина їх може складатися повністю зі скла, деякі можуть мати у середині включення мінералів або коксових зерен. Зустрічаються також і порожнисті кульки (мікросфера), які утворені в результаті потрапляння повітря до розплаву перед застиганням. Розмір частинок від 3 мкм до 150 мкм [7] (рис. 2).



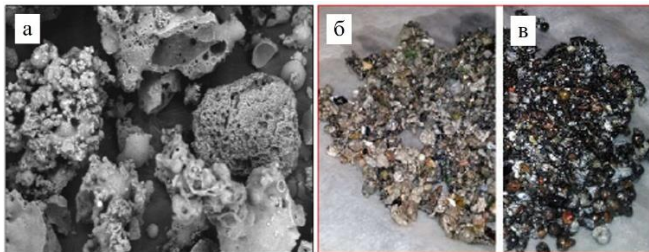
а – золи-винесення; б – зольні мікросфери

Рис. 2. Зовнішній вигляд золи-винесення під мікроскопом

Також в процесі згоряння можуть утворюватися частинки шлаку і золи-уносу неправильної та губчастої форми, а також мати ядро із кристалічних речовин.

Крупні фракції золошлакових відходів містять агрегати, які утворюються при злипанні окремих зерен (такі структури, як правило неоднорідні і мають невисоку міцність).

Шлакові частинки можуть бути двох різних видів, в залежності від системи видалення відходів: система рідкого видалення шлаку або система твердого видалення шлаку (рис. 3).



а – пористі частинки сплавлених агрегатів; б – пористий шлак;
в – щільний шлак

Рис. 3. Зовнішній вигляд паливного шлаку

Частинки із системи рідкого шлаковидалення створюють зерна правильної форми з гладкою поверхнею без великої кількості пір. Такий матеріал менш схильний до водопоглинання, має високу міцність на стиск і утворює більші частинки шлаку. Подібна форма часток суттєво впливає на фізико-механічні характеристики золошлакових сумішей.

Найбільший вплив на механічні характеристики матеріалів, з яких складаються шари основи дорожнього одягу, має зміна таких параметрів як вологість та коефіцієнт ущільнення. На них впливають фактори середовища, які протягом експлуатації автомобільної дороги викликають зміни у самій структурі матеріалу. Отже, в ході життєвого циклу автомобільних доріг змінюються параметри міцності та деформативності будь-якого матеріалу в шарах дорожнього одягу.

В роботі виконаний аналіз дослідження характеристик міцності золошлакових сумішей в залежності від щільності і вологості. На рис 4 представлені результати визначення модуля деформації золошлакових сумішей в залежності від коефіцієнта ущільнення. Зростання модуля деформації при збільшенні щільності пояснюється збільшенням кількості контактів частинок у структурі матеріалу, що веде до зниження контактної напруги та зменшення зминання маломіцних агрегатів. Різкий приріст модуля при тиску 0,3 мПа пов'язаний з таким станом зразка, при якому не відбувається перепакування частинок за рахунок ковзання агрегатів, а осідання може пояснюватися руйнуванням частинок, щільно защемлених у своїх положеннях. Такі зміни структури золошлакових сумішей раніше були описані Kim та ін. [7, 8, 9, 10, 11, 12].

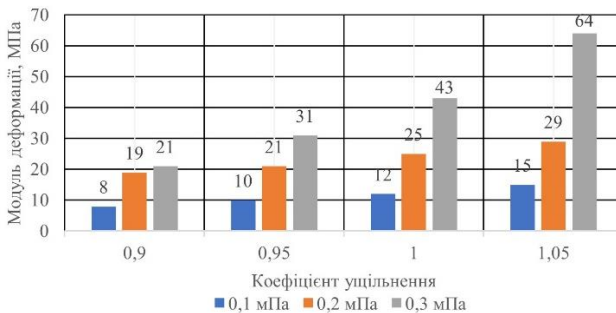


Рис. 4. Залежність модуля деформації від коефіцієнта ущільнення

На рис. 5 представлені результати визначення модуля деформації золошлакових сумішей при різній вологості та постійному коефіцієнті ущільнення 0,95.

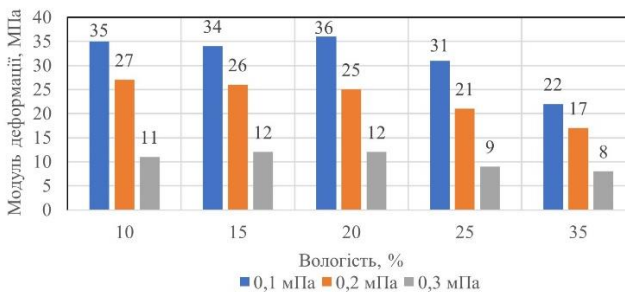


Рис. 5. Залежність модуля деформації від вологості

Випробування золошлакових сумішей із різною вологістю вказують на зниження модуля деформації зі зростанням вологості. При збільшенні вологості вода сприяє розсуванню частинок золошлакової суміші, що послаблює структуру. З іншого боку, збільшення товщини водних плівок сприяє збільшенню осідання, так як їх здатність деформуватися вище, ніж у частинок золошлакової суміші.

Подібні залежності змін модулів пружності були отримані Kim та ін, що вказує на схожість поведінки золошлакових сумішей різного походження.

Крім цього, неоднорідність також може викликати зміни механічних характеристик золошлакових сумішей [10, 11, 12]. Збільшення вмісту пористого шлаку має негативний вплив на модуль деформації як дрібно-, так і в середньозернистих золошлакових сумішей. При цьому середньозернисті суміші, які зазвичай мають велику величину модуля

деформації, з додаванням пористого шлаку мають гірші деформаційні параметри в порівнянні з дрібнозернистими. У першу чергу це пов'язано з високою подрібненістю пористого шлаку.

Як відомо, в процесі ущільнення відбувається більш компактне пакування частинок за рахунок місцевих зсувів і зісковзування дрібніших частинок у пори агрегатів, що ще більше зміцнює скелет ґрунту. Після закінчення процесу ущільнення ці зрушення практично згасають і матеріал починає працювати на стадії оборотних деформацій. Чим вище вихідний коефіцієнт ущільнення, тим більше щільна структура скелета матеріалу утворюється у зразку, а отже, розподіл навантаження відбудеться на більшу кількість точок контакту. Крім збільшення структурної міцності, це знижує загальну деформативність матеріалу, чим і обумовлено зростання модуля пружності (рис. 6) [12].

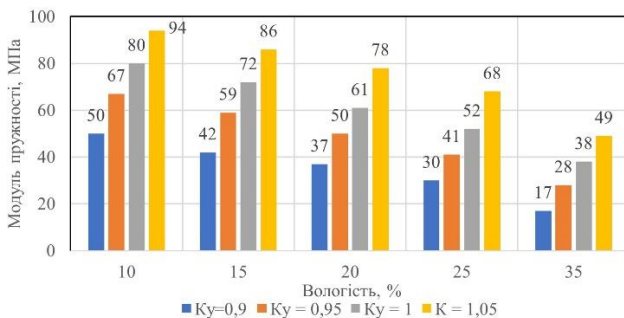


Рис.6 Залежність модуля пружності золошлакових сумішей від вологості та коефіцієнта ущільнення

На противагу ущільненню, підвищення вологості золошлакової суміші викликає розущільнення скелета, яке суттєво знижує здатність матеріалу чинити опір навантаженням. Причому, чим вища вологість, тим більший негативний ефект. Досягнення повної вологості створює ефект зважування частинок. У такому стані число контактів частинок зменшується, а діючий поровий тиск води розущільнює матеріал. Зростання щільності скелета золошлакової суміші викликає підвищення міцності масиву, однак, лише до досягнення максимальної щільності сухого ґрунту. При подальшому ущільненні приросту міцності немає, отже, переущільнення золошлакової суміші недоцільне.

Значення параметрів міцності золошлакової суміші дещо відрізняються, залежно від їх походження, проте не поступаються за міцністю природним ґрунтам.

Загальні залежності зміни параметрів міцності золошлакової суміші при зміні вологості і щільності схожі для всіх сумішей, незалежно від генезису.

Висновки

Були розглянуті залежності деформативних параметрів золошлакових сумішей від щільності матеріалу. Аналіз показав, що збільшення щільності на 0,01 од. коефіцієнт ущільнення дає приріст модуля пружності від 6 % до 7 %, а модуля деформації від 2 % до майже 5 %.

Вплив вологості на деформативні параметри золошлакових сумішей суттєвий, хоча й дещо нижчий за вплив щільності. Причому при оптимальній вологості значення модулів пружності та деформації має найменшу величину.

Аналіз хімічного та фазового складів золошлакових сумішей свідчить про схожість цих техногенних ґрунтів з природними піщаними та глинистими ґрунтами. Однак структура золошлакових сумішей визначає ряд істотних особливостей порівняно з природними ґрунтами. Порівняння величини модулів деформації природних ґрунтів і золошлакових сумішей показує, що цей показник у техногенного ґрунту дещо нижчий, ніж у піщаних ґрунтів, але не поступається природним глинисто-пилуватим ґрунтам.

Таким чином, застосування золошлакових сумішей з ТЕС для спорудження насипів земляного полотна, шарів дорожнього одягу є перспективним та актуальним напрямком утилізації цього техногенного ґрунту.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що при створенні поточної роботи вони не використовували технології штучного інтелекту.

References

1. Khlopytskyi O. (2014). State, problems and prospects of ash-slag waste recycling of Ukrainian thermal power stations // *ScienceRise*, 4, № 2, 4.
2. Thermal electricity. Режим доступу: <https://www.engie.com/en/activities/thermal-energy/thermal-power-stations> (дата звернення 08.05.2025). – Назва з екрана.
3. Baykala G. (2004). Highway embankment construction using fly ash in cold regions / G. Baykala, A. Edinçlilerb, A. Saygılıa // *Resources, Conservation and Recycling*, 42, 209-222.
4. Haleema A. (2016). Critical factors for the successful usage of fly ash in roads & bridges and embankments: Analyzing indian perspective / A. Haleema, S. Luthrab, B. Mannana, S. Khuranaa, S. Kumarc // *Resources Policy*, 49, 334-348.
5. Hadbaatar A. (2016). Study of Ash-Slag Wastes of Electric Power Plants of Mongolia Applied to their Utilization in Road Construction / A. Hadbaatar, N.A. Mashkin, N.G. Stenina // *Procedia Engineering*, 150, 1558-1562.
6. Mukherjee P.S. (2013). Exploring Fly Ash Utilization in Construction of Highways in India / P.S. Mukherjee, G. Vesmawala // *Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 8, Pp 23-32.
7. Pandian N.S. (2004). Fly ash characterization with reference to geotechnical application / N.S. Pandian // *Journal Indian Institute of Science*, 84, 189-216.
8. Pal S. K. (2009). Shear strength behavior of Indian flu ashes / S. K. Pal, A. Ghosh // *Indian Geotechnical Conference Geotechnics in Infrastructure Development (GEOTIDE)*, 1, 18-22.
9. Jakka R.S. Shear Strength Characteristics of Loose and Compacted Pond Ash / R.S. Jakka, M. Datta, G.V. Ramana // *J.Geotech and Geol*, 28(6), 763-778.
10. Martin J. P. Properties and use of fly ashes for embankments / J.P. Martin, R.A., B.J. Collins, F.J. Biehl // *Energy*, 116(2), 71–86.
11. Kumar D. (2014). Geotechnical Properties of Fly Ash and Bottom Ash Mixtures in Different Proportions / D. Kumar, N. Kumar, A. Gupta // *International Journal of Science and Research (IJSR)*, 3, 9, 1487-1494.
12. Kim B. Geotechnical Properties of Fly and Bottom Ash Mixtures for Use in Highway Embankments / B. Kim, M. Prezzi, R. Salgaro // *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 131, 7, 914-924.

Література

1. Khlopytskyi O. (2014). State, problems and prospects of ash-slag waste recycling of Ukrainian thermal power stations // *ScienceRise*, 4, № 2, 4.
2. Thermal electricity. Режим доступу: <https://www.engie.com/en/activities/thermal-energy/thermal-power-stations> (дата звернення 08.05.2025). – Назва з екрана.
3. Baykala G. (2004). Highway embankment construction using fly ash in cold regions / G. Baykala, A. Edinçlilerb, A. Saygılıa // *Resources, Conservation and Recycling*, 42, 209-222.

4. Haleema A. (2016). Critical factors for the successful usage of fly ash in roads & bridges and embankments: Analyzing indian perspective / A. Haleema, S. Luthrab, B. Mannana, S. Khuranaa, S. Kumarc // Resources Policy, 49, 334-348.
5. Hadbaatar A. (2016). Study of Ash-Slag Wastes of Electric Power Plants of Mongolia Applied to their Utilization in Road Construction / A. Hadbaatar, N.A. Mashkin, N.G. Stenina // Procedia Engineering, 150, 1558-1562.
6. Mukherjee P.S. (2013). Exploring Fly Ash Utilization in Construction of Highways in India / P.S. Mukherjee, G. Vesmawala // Journal of Mechanical and Civil Engineering, 8, Pp 23-32.
7. Pandian N.S. (2004). Fly ash characterization with reference to geotechnical application / N.S. Pandian // Journal Indian Institute of Science, 84, 189-216.
8. Pal S. K. (2009). Shear strength behavior of Indian flu ashes / S. K. Pal, A. Ghosh // Indian Geotechnical Conference Geotechnics in Infrastructure Development (GEOTIDE), 1, 18-22.
9. Jakka R.S. Shear Strength Characteristics of Loose and Compacted Pond Ash / R.S. Jakka, M. Datta, G.V. Ramana // J.Geotech and Geol, 28(6), 763-778.
10. Martin J. P. Properties and use of fly ashes for embankments / J.P. Martin, R.A., B.J. Collins, F.J. Biehl // Energy, 116(2), 71–86.
11. Kumar D. (2014). Geotechnical Properties of Fly Ash and Bottom Ash Mixtures in Different Proportions / D. Kumar, N. Kumar, A. Gupta // International Journal of Science and Research (IJSR), 3, 9, 1487-1494.
12. Kim B. Geotechnical Properties of Fly and Bottom Ash Mixtures for Use in Highway Embankments / B. Kim, M. Prezzi, R. Salgaro // Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 131, 7, 914-924.

Відомості про статтю:	Article information:
Отримано 19.05.2025	Received 19.05.2025
Отримано у доопрацьованому вигляді 01.06.2025	Received in revised form 01.06.2025
Прийнято 01.06.2025	Accepted 01.06.2025
Опубліковано 25.06.2025	Published 25.06.2025

O. O. Fomenko

assistant, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4429-1706>

Department Construction and operation of highways named after O.K. Birulya

Kharkiv National Automobile and Highway University, Yaroslav Mudrogo str., 25, Kharkiv, Ukraine, 61002

A. V. Siedov*

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7879-6614>

Department Construction and operation of highways named after O.K. Birulya

Kharkiv National Automobile and Highway University, Yaroslav Mudrogo str., 25, Kharkiv, Ukraine, 61002

*corresponding author, e-mail: avs.1708@ukr.net

Use of ash-slag mixtures for the construction of road base layers

How to Cite:

Fomenko, O. O., Siedov, A. V. (2025). Use of ash-slag mixtures for the construction of road base layers. *Modern technologies and methods of calculations in construction*, 23, 370-380. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-32](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-32)

Abstract. The article provides information on the volume of formation of ash and slag waste from coal combustion, and the volume of their utilization. This is general information on the volume of formation of ash and slag by-products in foreign practice, and their practical and effective use. In world practice, ash and slag are usually used in the production of building materials, such as concrete, asphalt concrete mixtures, bricks, ceramic tiles, thermal insulation, etc. The involvement of these materials in the technological process of road construction will reduce the negative impact on the environment and expand the resource base of the industry. Ash and slag waste consist of a combination of ash-carryover and fuel slag, which have fundamental differences in their structure.

During the conducted research, an assessment of the deformation characteristics of this technogenic soil was performed depending on the degree of its compaction and humidity. The analysis showed an increase in density by 0.01 units. The compaction coefficient gives an increase in the modulus of elasticity from 6% to 7%, and the modulus of deformation from 2% to almost 5%. The influence of humidity on the deformation parameters of ash-slag mixtures is significant, although somewhat lower than the influence of density. Moreover, at optimal humidity, the value of the modulus of elasticity and deformation is the smallest.

Analysis of the chemical and phase compositions of ash-slag mixtures indicates the similarity of these technogenic soils with natural sandy and clay soils. However, the structure of ash-slag mixtures determines a number of significant features compared to natural soils. Comparison of the magnitude of the modulus of deformation of natural soils and ash-slag mixtures shows that this indicator in technogenic soil is somewhat lower than in sandy soils, but is not inferior to natural clay-dusty soils.

Its suitability as a building material for the construction of base layers of road pavements of highways was assessed.

Keywords: ash-slag mixture, road surface, deformation characteristics, humidity, compaction coefficient, structural strength