

БЕТОНИ ТА РОЗЧИНИ НА ВІДХОДАХ ЗОЛ ТЕС

CONCRETES AND MORTAR BASED ON TPP WASTE ASH

Дехта Т. М., к.т.н., доц., orcid.org/0000-0001-5023-3070; Бондаренко С. В., к.т.н., доц., orcid.org/0000-0001-5023-3070; Василенко С. В., асистент, orcid.org/0000-0001-8687-4726 (Український державний університет науки і технологій, Навчально-науковий інститут Придніпровська державна академія будівництва та архітектури)

T. M. Dekhta, Ph.D., associate professor, orcid.org/0000-0001-5023-3070; S. V. Bondarenko, Ph.D., associate professor, orcid.org/0000-0001-5023-3070; S. V. Vasylenko, assistant, orcid.org/0000-0001-8687-4726 (Ukrainian state university of science and technology, educational and scientific institute of the Dnipro state academy of construction and architecture)

На звалищах, відвалах і сховищах Придніпров'я накопичилися десятки мільйонів тон різних вторинних мінеральних ресурсів - золошлакові суміші теплових електростанцій (ТЕС), тощо). Проведені теоретичні та експериментальні дослідження показали, що вібровакуумування є більш ефективним методом ущільнення золошлакових бетонів у порівнянні з традиційним методом вібраційного ущільнення. Ущільнення бетонних сумішей за допомогою вібраційного вакууму дає можливість значно збільшити щільність, міцність, морозостійкість та інші властивості таких бетонів. У бетонів з однаковою міцністю можливо зменшити витрати цементу. При цьому можливо провести негайну розпалубку, а також значно скоротити тривалість термічної обробки. Запропонований метод формування не вимагає значних капітальних витрат на впровадження, оскільки при цьому застосовується стандартне обладнання, що широко використовується в будівельній галузі та технології залізобетону. Актуальністю роботи є розробка і дослідження технології вібровакуумної обробки бетонних сумішей на основі вторинних мінеральних ресурсів, яка дозволяє отримувати бетони високої якості (підвищена щільність з міцністю та іншими властивостями). Запропоновано спосіб поліпшення якості золошлакового вакуумбетону за рахунок добавки електроліту в невеликій кількості в бетонну суміш при її приготуванні. Досліджено основні властивості віброущільнених і вібровакуумованих бетонів на основі вторинних мінеральних ресурсів, проведена порівняльна оцінка цих властивостей, доведено переваги вакуумбетонів. Найбільш об'єктивну оцінку характеристик міцності та інших фізико-механічних

властивостей бетону на основі вторинних мінеральних ресурсів, ущільненого вібраційним вакуумом, можливо отримати у виробничих умовах, наприклад, на залізобетонних заводах.

Tens of millions of tons of various secondary mineral resources have accumulated in landfills, dumps, and storage facilities in the Dnieper region - ash and slag mixtures from thermal power plants (TPPs), etc.). Theoretical and experimental studies have shown that vibrovacuum compaction is a more effective method of compacting fly ash concrete compared to the traditional method of vibration compaction. Compaction of concrete mixtures using vibration vacuum makes it possible to significantly increase the density, strength, frost resistance and other properties of such concretes. For concretes with the same strength, it is possible to reduce cement consumption.

In this case, it is possible to carry out immediate demolding, as well as significantly reduce the duration of heat treatment. The proposed molding method does not require significant capital costs for implementation, since it uses standard equipment that is widely used in the construction industry and reinforced concrete technology. The relevance of the work is the development and research of the technology of vibrovacuum processing of concrete mixtures based on secondary mineral resources, which allows obtaining high-quality concrete (increased density with strength and other properties). A method of improving the quality of ash-slag vacuum concrete by adding a small amount of electrolyte to the concrete mixture during its preparation is proposed. The main properties of vibrocompacted and vibrovacuum-filled concretes based on secondary mineral resources were investigated, a comparative assessment of these properties was carried out, and the advantages of vacuum concretes were proven. The most objective assessment of the strength characteristics and other physical and mechanical properties of concrete based on secondary mineral resources, compacted by vibration vacuum, can be obtained in production conditions, for example, in reinforced concrete plants.

Ключові слова:

вторинні мінеральні ресурси, золошлакові суміші, вібровакуумування, бетонні суміші.

Вступ. Приклад використання вакуумної технології ущільнення бетону наведено в роботі [2]. Однак був використаний легкий бетон. Він має тенденцію ламатися через високий тиск вакуумування. Тому подальші дослідження використання вторинних мінеральних ресурсів базуються на важких бетонах.

Перше повне узагальнення результатів наукових досліджень, а також виробничого досвіду з використання золошлакових відходів ТЕС наведено в

30-ті роки минулого століття. Була доведена висока ефективність використання золошлакових відходів ТЕС при виробництві пуцоланових цементів, виготовленні стінових каменів, для виробництва легких заповнювачів, приготування легких (тепліх) бетонів.

Була введена класифікація відходів ТЕС від спалювання вугілля, де вказано розділення їх на шлаки (частково розплавлені і спечені частки) і золи (дрібні неспечені частки). У свою чергу, шлаки, в залежності від виду палива, що спалюється, поділялися на: антрацитові, кам'яновугільні, буровугільні, торф'яні, горючі сланці [3]. Це визначає необхідність комплексних досліджень складу та властивостей мінеральної частини різного вугілля, яке спалюють на електростанціях, оскільки основною причиною недостатнього використання золошлаків в народному господарстві є незадовільний стан вивчення в якості сировини. Також без ретельного вивчення таких відходів та їх впливу на гідратацію, твердіння, а також експлуатаційні властивості золобетонів їх виробництво неможливо [4].

Також запропоновано класифікацію цих відходів, в основу якої покладено такі ознаки, як вид палива, що спалюється, спосіб спалювання, хімічний і мінералогічний склад мінеральної частини палива, структура і зовнішні ознаки шлаків. Було відзначено, що для характеристики технічних властивостей паливних шлаків набагато більше значення мають його зовнішні морфологічні ознаки, такі як структура, ступінь оклінкерованості, гранулометрія і колір, а не вихідний вид палива. Основна увага була приділена паливним шлакам, а склад і властивості золи-винесення практично не розглядалися [5]. При більш високому рівні заміщення природного піску в бетонах та будівельних розчинах шлаком, бетон показав меншу міцність, ніж у стандартній суміші, ущільненій вібраційним способом [6].

Незначні обсяги і низька ефективність використання золи на підприємствах будіндустрії, малі обсяги утилізації відходів енергетики не дозволяють проектувати на великих теплових електростанціях маловідходні і безвідходні технології. Недоліки золошлакових сумішей менше проявляються при використанні їх в гідротехнічному будівництві, де клас бетону визначається у віку 180 діб. На більшості підприємств будівельної індустрії при приготуванні бетонів для громадського, промислового і сільськогосподарського будівництва цей напрям виявився малоефективним, і зола-виносу практичного застосування не знайшла [7]. Неоднорідний склад золи ТЕС є одним з найбільших недоліків, які скорочують її використання. При високому вмісті крупних частинок золи-виносу (більш 0,045 мм), а також при збільшенні вмісту незгорілих частинок вугілля потреба в воді зростає. Це призводить до розшарованості бетонної суміші при ущільненні. А також до зменшення фізико-механічних властивостей золобетонів, зниження довговічності виробу або конструкції [8].

Оскільки золошлакові суміші становлять основну частину відвалів більшості теплових електростанцій, що спалюють пиловидне паливо, вони

представляють особливий інтерес для підприємств будівельної індустрії, як компонент бетону. Постійно зростаючі запаси цієї сировини змогли б значно знизити існуючий дефіцит наповнювачів бетону [9].

Метою дослідження є вдосконалення технології бетонів на основі вторинних мінеральних ресурсів. На практиці при цьому використовується оптимізація складу бетону за допомогою введення золи в якості традиційних заповнювачів для бетону. А також через використання вібраційної вакуумної обробки бетонних сумішей.

Для досягнення мети були поставлені наступні завдання:

- підібрати раціональні склади бетонних сумішей для вакуумної обробки;
- дослідити основні фізико-механічних властивості вібровакуумованих бетонів на основі вторинних мінеральних ресурсах Придніпров'я;
- розробити технологію вібровакуумованих бетонних виробів на основі вторинних мінеральних ресурсах Придніпров'я.

Результати експериментальних досліджень. Одна з найбільших в Європі Придніпровська ТЕС, щодня викидає на звалища тисячі тон золошлакових сумішей, завдаючи значної шкоди навколишньому середовищу.

Зерна пиловидної золи – це крихітні частинки розміром від декількох мікрон до 0,14 мм. Велика частина зерен ошлакована і округла. Частина зерен відшліфована лише зовні – під склоподібною оболонкою знаходяться мінерали, які не встигли розплавитися в момент згорання пилоподібного вугілля в печі. Структура самого зерна обумовлена його дуже коротким перебуванням у зоні високих температур. В результаті швидкого підвищення температури майже одночасно відбувається вигорання органічних речовин, що містяться у вугіллі, і спікання мінеральної частини. Газ, що виділяється під час цього процесу, спучує розплав. Різке охолодження зерен стабілізує склоподібну фазу. В результаті частинки пилоподібної золи є розплавленими зернами, багато з яких мають крихітні, переважно закриті пори.

Шлаки представляють собою склоподібні зерна розміром 0,3...20 мм неправильної форми з гострими гранями. Значна частина зерен має пори різних розмірів, які утворилися під дією пари при попаданні вогненно-рідкого шлаку в воду. Іноді зустрічаються в даній суміші більші включення шлаку - розміром до 40 мм. Хімічний склад золошлакових сумішей наведено в таблиці 1.

Для приготування бетонних сумішей використовували наступні матеріали:

- шлакопортландцемент м400 (м. Кривий Ріг) (ДСТУ Б В.2.7-46-2010);
- зола-виносу Придніпровської ТЕС (ДСТУ Б В.2.7-205:2009);
- вода водопроводна (ДСТУ Б В. 2.7.-273:2011);
- електроліт - CaCl_2 (ДСТУ Б В.2.7-175:2008. ДСТУ Б В.2.7-69-98).

Таблиця 1

Хімічний склад золошлакових сумішей ТЕС

Вид відходів	Склад оксидів, %							
	Si O ₂	Al ₂ O ₃	FeO+ +Fe ₂ O ₃	Ti O ₂	Ca O	Mg O	S O ₃	В.п. п.
Зола	41... ...53	15... ...22	5...9	0,5	3...4	1...1,6	0,4... 0,8	10... ...14
Шлак	48... 56	20... 28	9...13	0,5	4,5... 5	1...1,6	0,5... 0,6	0...1

Бетонні суміші готували з однаковою рухливістю, яка характеризується осіданням стандартного конуса – $ok = 5...6$ см.

Результати досліджень авторів [15] вказують на високу потребу у воді золобетонних сумішей. це, на наш погляд, є основною причиною низької міцності зольного бетону при помірних витратах цементу.

Спочатку визначали ефективність вібровакуумної обробки звичайних золобетонних сумішей (без додавання електроліту). в цих дослідженнях використовували бетонну суміш із витратою цементу 280 кг/м^3 . зразки $15 \times 15 \times 7$ см формували за допомогою вібровакуумування (з метою зменшення впливу масштабного фактору). попереднє ущільнення бетонної суміші у формах проводили вібраційним методом протягом $7...10$ с. потім ці зразки піддавали вакуумуванню до припинення видалення надлишків води для змішування. величина вакууму становила $0,7$ (загальний вакуум приймався за одиницю). під час вакуумування проводили періодичну вібрацію тривалістю $8...10$ с кожні $1,5...2$ хв (виконували два прийоми вібрації) [16].

додавання електроліту в кількості $0,2...0,7$ % від витрати цементу може суттєво збільшити кількість вилученої надлишкової води, зменшуючи при цьому тривалість вакуумування. при всіх прийнятих витратах цементу раціональне додавання електроліту становило $0,4...0,5$ %. завдяки цьому додаванню було отримано найбільшу кількість вилученої надлишкової води замішування (110 л/м^3 або 37 %). а тривалість вакуумної обробки зменшена з 6 хвилин до $4...4,5$ хвилин, що дуже важливо в умовах виробництва [16].

ці закономірності підтверджуються і результатами аналізу міцності вакуумних бетонів на основі золошлакових сумішей тес (рисунк 1).

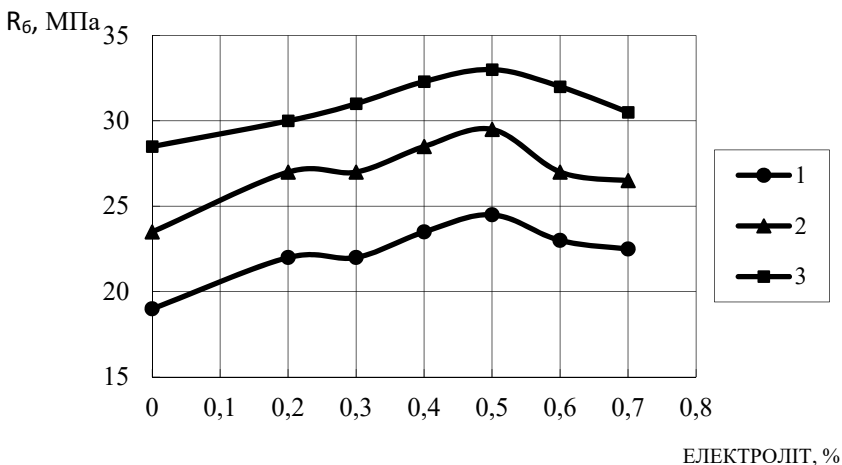


Рис. 1. межа міцності золотшлакового вакуумбетону залежно від витрати електроліту: 1 – при витратах цементу 280 кг/м³; 2 – теж, при 350 кг/м³; 3 – теж, при 400 кг/м³

Вакуумбетони, отримані з бетонних сумішей з додаванням електроліту, мають більшу міцність порівняно з міцністю вакуумбетонів із бетонних сумішей без такої добавки. при раціональній витраті електроліту було досягнуто найбільше збільшення міцності – на 17...22 % (порівняно з міцністю вакуумбетонів із бетонних сумішей без додавання електроліту). отримані результати переконливо пояснюються за допомогою теорії коагуляції електролітами.

У цьому випадку раціональна тривалість вакуумування становила 6 хв (виходячи зі швидкості видалення надлишку води змішування).

Широке використання в будівництві бетонів на основі відходів ТЕС дає можливість вирішити проблему місцевих заповнювачів, а також сприяє охороні навколишнього середовища [17-18].

Висновки:

1. При підборі раціональних складів бетонних сумішей для вакуумної обробки визначена оптимальна рухливість вихідної бетонної суміші, яка обумовить найбільш компактне розміщення складових в процесі вакуумування (найбільшу щільність). Така рухливість суміші зростає в міру зниження витрати цементу (з ОК = 1...2 см до 5...7 см).

2. Результати досліджень основних властивостей вібровакуумованих золотшлакових бетонів підтвердили що, міцність золотшлакового вакуумбетона в середньому вище міцності віброущільненого бетону з рухомих сумішей на 6...10 МПа або на 60...100 % (в залежності від витрати цементу).

4. Завдяки розробці технології вібровакуумованих виробів на основі

бетонів на вторинних мінеральних ресурсах Придніпров'я надається можливість використовувати існуюче технологічне обладнання без принципових конструктивних змін, здійснювати негайне розпалублення відформованих виробів, що суттєво зменшує металоємність технології.

1. Mariusz Holtzer, Rafał Dańko, Angelika Kmita, Dariusz Drożyński, Michał Kubecki, Mateusz Skrzyński, Agnieszka Roczniak (2020). Environmental Impact of the Reclaimed Sand Addition to Molding Sand with Furan and Phenol-Formaldehyde Resin- A Comparison // *Materials*, Vol. 13, P. 4395. <https://www.mdpi.com/1996-1944/13/19/4395>

2. Sang-Yeop Chung, Pawel Sikora, Dietmar Stephan, Mohamed Abd Elrahman (2020). The Effect of Lightweight Concrete Cores on the Thermal Performance of Vacuum Insulation Panels // *Materials*, Vol. 13, P. 2632. <https://www.mdpi.com/1996-1944/13/11/2632>

3. Xiaohui Zhu. Properties of Alkali Activated Slag Concrete // *Chemical Engineering TransactionsCET Journal*, 2017. Vol. 62. P. 1009 – 1014. <https://doaj.org/article/4d39fc854a7e44749abd80068fa052c2>

4. Rimma K. Niyazbekova, Muratbek T. Userbaev, Gulnara A. Kokayeva, Lazzat S. Shansharova, Marat D. Konkanov, Saule A. Abdulina. Ash Deposits CHP – as an Additional Source of Raw Material for Construction Production // *Chemical Engineering TransactionsCET Journal*. 2018. Vol. 70 P. 649 – 654. <https://doaj.org/article/56ad70ca5c6f438ab01cc7ac39af3b30>

5. Madhura Sridharan. Ch. Madhavi. Investigating the influence of copper slag on the mechanical behaviour of concrete // *Materialstoday: Proceedings*, 2020. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320388039>

6. Thuy Bich Thi Nguyen, Rachot Chatchawan, Warangkana Saengsoy, Somnuk Tangtermsirikul, Takafumi Sugiyama. Influences of different types of fly ash and confinement on performances of expansive mortars and concretes. 2019. Vol. 209. P. 176 – 186. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061819305124>

7. Savić Aleksandar, Vlahović Milica, Martinović Sanja, Đorđević Nataša, Broćeta Gordana, Volkov-Husović Tatjana. Valorization of fly ash from a thermal power plant for producing high-performance self-compacting concrete. 2020. Vol. 52, Issue 3. P. 307 – 327. <https://doaj.org/article/5e528041df1344bf9e3adea1ad3a8558>

8. M. Rafieizonooz, M.R. Salim, M.H. Hussin, J. Mirza, S.M. Yunus, E. Khankhaje . Workability, Compressive Strength and Leachability of Coal Ash Chemical Engineering TransactionsCET Journal. 2017. Vol. 56. P. 439 – 444. <https://doaj.org/article/baced1e274354d52ba08ecd05644c32d>

9. Guo Yin-Le, Liu Xue-Ying, Hu Yue-Ping. Study on the influence of fly ash and silica fume with different dosage on concrete strength // *Internatio Symposium on Architecture Research Frontiers and Ecological Environment*. 2021. Vol. 237. doi: <https://doaj.org/article/a83ba35c625b4bce9d74f05ea549ec21>

10. Bavita Bhardwaj, Pardeep Kumar (2017). Waste foundry sand in concrete: A review // *Construction and Building Materials*, Vol. 156, P. 661-674.

11. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061817318111>

12. Rafat Siddique, Gurpreet Singh (2011). Utilization of waste foundry sand (WFS) in concrete manufacturing // *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 55, P. 885-892.

13. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921344911000802>

14. Сторожук Н.А., Павленко Т.М., Аббасова А.Р. Незаслужено забутий спосіб ущільнення бетонних сумішей // *Технології бетонів*. – 2018. – № 1-2. – С. 27-31.

15. Рациональне використання золошлакових сумішей, зол і шлаків ТЕС у технології бетонів / М. В. Савицький, Т. М. Павленко, А. Р. Аббасова // Бетон та залізобетон. – 2014. – № 3. – С. 28 – 31.
16. Сторожук, Н. А., Павленко Т. М., Аббасова А. Р. Основи теорії формування структурної міцності вакуумбетону при ущільненні бетонних сумішей // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – 2020. – №81. – С. 139-148.
17. Эффективный способ использования золи тепловых электростанций у технологии бетонів / Сторожук М.А., Павленко Т.М., Аббасова А.Р. // «Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки». Том 29 (68) № 5, 2018. – С. 98 – 104.
18. Tatyana Dekhta / Experimental Investigation and Theoretical Background of the Optimal Control of the Concrete Mixture Forming // Pavlo Pshinko, Olena Hromova, Oksana Steinbrech; Komunikácie - vedecké listy Žilinskej univerzity v Žiline / Communications - Scientific Letters of the University of Žilina. – Slovakia, №2, 2023 – P. D39 – D42 : DOI: 10.26552/com.C.2023.034 <https://komunikacie.uniza.sk/contents/csl/2023/02.pdf>
19. Дехта Т. М., Шпирько М. В., Бондаренко С. В., Василенко С. В. Будівельне матеріалознавство: навчальний посібник. - Дніпро: ДВНЗ «ПДАБА», 2022. - 115 с. ISBN 978-966-323-229-4.
20. Дехта Т. М. Системний аналіз в технології будівельних матеріалів / О.В. Штайнбреш, // Матеріали Всеукраїнської науково-методичної конференції Проблеми математичного моделювання – Кам'янське, 27-28 травня, ДДТУ, 2020. – С. 97 – 98. https://docs.google.com/document/d/1Ju4wT6k4xtkU0sR2-bS-VGfLWi_F3Wamf6XdKYfngd0/edit