

УДК 691.32

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.300824.107.1080

В'ЯЖУЧІ ІЗ ВТОРИННОЇ СИРОВИНИ ВІДХОДІВ ВУГЛЕЗБАГАЧЕННЯ ДЛЯ ЇХ ВИКОРИСТАННЯ У ЗВЕДЕННІ БУДІВЕЛЬНИХ ОБ'ЄКТІВ МЕТОДОМ 3D-ДРУКУ

РУДІН А. А., *аспір.*

Кафедра технології будівельного виробництва, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056)-756-34-76, e-mail: aconicus@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-4215-3884

Анотація. Постановка проблеми. Технологія будівництва методом 3D-друку – один із сучасних методів швидкого будівництва, який дозволяє значно автоматизувати будівельний процес із досягненням високої точності у виготовленні конструкцій складної конфігурації за допомогою обладнання (3D-принтера), яке працює під управлінням програмного забезпечення для завдання точних координат моделі конструкції, що друкується. Основними матеріалами для технології будівельного 3D-друку стали композиційні суміші на основі в'язучого. Як в'язуче може бути застосований цемент або композиційні в'язучі [1]. Технологія виробництва цементу передбачає випал його компонентів за 1 450 °С, що потребує значних витрат енергетичних ресурсів та впливає на його кінцеву вартість і суміші загалом. Застосування відходів вуглезабагачення, які містять у своєму складі глинисті мінерали, кварц, пірит та незначну кількість карбонатів, домішок і горючих речовин, дозволяє знизити витрати технологічного палива та температури випалу в'язучого за рахунок реалізації тепловірних властивостей вугільних включень. Таким чином відходи вуглезабагачення можуть бути використані як паливний компонент в отриманні в'язучого. **Висновки.** На основі проведених досліджень можна зробити висновок про перспективність компонентного в'язучого матеріалу з використанням відходів вуглезабагачення та зведення будівельних об'єктів методом 3D-друку. За рахунок реалізації тепловірних властивостей можна знизити витрату технологічного палива та температуру випалу для отримання в'язучого і зменшити викиди CO₂ в атмосферу та кінцеву вартість будівельної суміші для 3D-друку.

Ключові слова: неорганічні в'язучі; відходи вуглезабагачення; будівельний 3D-друк

BINDERS FROM SECONDARY RAW MATERIALS OF COAL ENRICHMENT WASTE FOR CONSTRUCTION OBJECT ERECTION USING THE 3D PRINTING METHOD

RUDIN A.A., *Postgrad. Stud.*

Department of Construction Technology, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-34-76, e-mail: aconicus@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-4215-3884

Abstract. Formulation of the problem. The 3D printing construction technology is one of the modern methods of rapid construction, which allows for a significant automation of the building process while achieving high precision in the fabrication of complex configurations using equipment (3D printers) controlled by software to define precise coordinates of the printed structure model. The main materials for construction 3D printing technology are composite mixtures based on binders. Cement or composite binders can be used as binders [1]. The cement production technology involves the firing of its components at 1 450 °C, which requires significant energy resources and affects its final cost and the overall mixture. The utilization of coal enrichment waste, which contains clay minerals, quartz, pyrite, and a small amount of carbonates, impurities, and combustible substances, allows for reducing the consumption of technological fuel and the firing temperature of the binder by harnessing the heat-generating properties of coal inclusions. Thus, coal enrichment waste can be used as a fuel component in obtaining the binder. **The purpose.** Based on the conducted research, it can be concluded that the use of component binders derived from coal enrichment waste shows promise in the construction of buildings using 3D printing technology. By harnessing the heat-generating properties of these waste materials, it is possible to reduce the consumption of technological fuel and firing temperature required for binder production, consequently lowering CO₂ emissions into the atmosphere and reducing the final cost of the construction mixture for 3D printing.

Keywords: inorganic building materials; coal enrichment waste; 3D concrete printing

Постановка проблеми. Враховуючи, що згідно із статистичними даними вартість будівельних матеріалів та робочої сили у світі постійно зростає, їх ефективне використання у будівництві, а саме зменшення термінів будівництва та зменшення залучення людських ресурсів через автоматизацію будівельних процесів дають значні перспективи для розвитку технології будівництва методом 3D-друку та удосконаленню властивостей будівельних матеріалів за її використання.

Для 3D-друку широко застосовуються композиційні в'язучі з регульованими реологічними характеристиками.

Композиційні суміші для будівельного 3D-друку із включенням вторинної сировини підлягають подальшому дослідженню для можливого зменшення їх вартості з урахуванням дотримання вимог до їх механічних, реологічних властивостей та особливостей технології їх укладання.

Видобуток та переробка мінеральної сировини стали причиною утворення великої кількості відходів, які займають значні за площею земельні ділянки та погіршують екологічний стан регіону їх зберігання. До таких відходів у тому числі належать відходи вуглезабагачувальної промисловості, які зберігаються в шламовідстійниках та накопичувачах. Це значний техногенний ресурс корисних копалин, кількість яких щорічно значно збільшується. З одного боку, шламові відходи – вуглецемістка сировина, яка може бути використана у виробництві будівельних матеріалів, а з іншого – джерело забруднення навколишнього середовища.

Щорічно для зберігання відходів вуглезабагачення фабрики виділяють значні території. Тому в районах розташування таких територій складається несприятлива екологічна ситуація, зумовлена, головним чином, забрудненням атмосферного повітря, ґрунту, водоносних горизонтів та виведенням земель із господарського використання.

У світовій практиці відходи вуглезабагачення застосовуються для виробництва керамзиту.

Аналіз публікацій. З останніх публікацій на тему адитивних технологій будівництва

відомо, що матеріалом для будівельного 3D-друку застосовуються суміші, які містять у своєму складі цемент та дрібний заповнювач розміром зерен від 0,16 до 5 мм. З метою зниження вартості будівельного матеріалу використовується композиційне в'язуче із цементу та шлаку [1], оскільки виробництво цементу – матеріало- та енерговитратний процес, а шлак – це відходи виробництва. У виробництві цементу як паливозберігальну добавку використовують відходи вуглезабагачення [2]. Вони містять у своєму складі паливні компоненти, глинисті мінерали і також використовуються як добавки у виробництві безклінкерних в'язучих. Після обпалу сумісно з доломітом, вапняком вони стають в'язучими [3].

У статтях [3; 4] зазначається, що використання відходів вуглезабагачення в шихті для обпалу в'язучого знижує витрати технологічного палива і витрати на помел сировини.

Використання як шихти тільки вапняку та шлаків знижує температуру обпалу приблизно на 500 °С [4]. Однак вміст вуглецю у відходах вуглезабагачення не має перевищувати 30 % для запобігання утворенню відновлювального середовища.

Мета роботи – оцінення можливості отримання в'язучого з вапняку та відходів вуглезабагачення для будівельного 3D-друку із зниженням температури обпалу та витрат технологічного палива під час виробництва матеріалу.

Результати досліджень. Для отримання в'язучого як сировини використано вапняк та відходи вуглезабагачення у вигляді шламу.

У дослідженні використано відходи вуглезабагачення Павлоградської ЦЗФ, а саме шлам вологістю 60 %, який містить у своєму складі частинки розміром до 5 мкм.

Мінералогічний склад твердої фази шламу визначено рентгенофазовим аналізом (рис. 1).

Установлено, що найбільшу інтенсивність мають дифракційні максимуми d , нм: 0,42; 0,33; 0,24; 0,23; 0,21. Вони належать оксиду кремнію, який є основною фазою. До основних фаз також належать: гідрослюда (d , нм: 0,969; 0,462; 0,363; 0,226; 0,207; 0,166), каолінит (d , нм: 0,69; 0,38;

0,247; 0,23; 0,226; 0,198; 0,178; 0,148), хлорит (d , нм: 0,77; 0,462; 0,35; 0,287; 0,26; 0,253; 0,141; 0,13), польові шпати (d , нм: 0,42; 0,316; 0,295; 0,28; 0,144; 0,134). У складі твердої фази шламу також присутні карбонат кальцію (d , нм: 0,302; 0,207; 0,19; 0,16; 0,153), пірит (d , нм: 0,277; 0,243; 0,222; 0,19; 0,163).

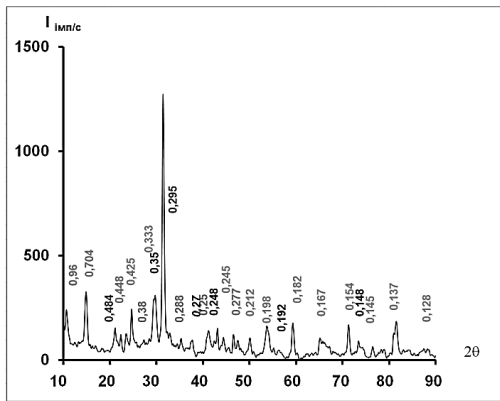


Рис. 1. Дифрактограма відходів вуглезбагачення

Хімічний склад відходів вуглезбагачення наведено у таблиці.

Таблиця

Хімічний склад відходів вуглезбагачення

Вміст оксидів, мас. частка %							
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃
49,6	18,82	7,82	1,62	1,24	3,2	1,6	1,1
Втрати при пропалюванні: 15 %							

Відомо, що домішки Mg, K, Na, які входять до складу твердої фази шламу, можуть впливати на процеси мінералоутворення із зниженням температури та утворення кінцевого складу в'язучого. Враховуючи викладене в [4], можливе зниження температури обпалу на 500 °С порівняно з температурою обпалу цементу за 1 500 °С. Тому проведено обпал в'язучого за 1 000 °С та 1 200 °С з метою виявлення можливого утворення необхідних силікатів та алюмінатів кальцію.

Обпалу підлягала суміш карбонату кальцію у кількості 70 % і шламу вуглезбагачення у кількості 30 % в перерахунку на суху речовину. У дослідженні вапняк підлягав помелу і подальшому гранулюванню разом із вугільним шламом.

Витримка за максимальної температури складала 30 хвилин. Після обпалу гранули в'язучого помололи в кульовому млині до

питомої поверхні 3 500 см²/г, що була визначена приладом ПСХ-2. Отриманий після обпалу мінералогічний склад в'язучого визначено методом рентгенофазового аналізу (рис. 2). Установлено, що найбільшу інтенсивність мають максимуми d , нм: 0,275; 0,238; 0,17, які належать до кремнезему і є основними фазами. Також ідентифікується β-двокальцієвий силікат (d , нм: 0,278; 0,275; 0,217), трикальцієвий алюмінат (d , нм: 0,27; 0,19; 0,154), але у значно меншій кількості.

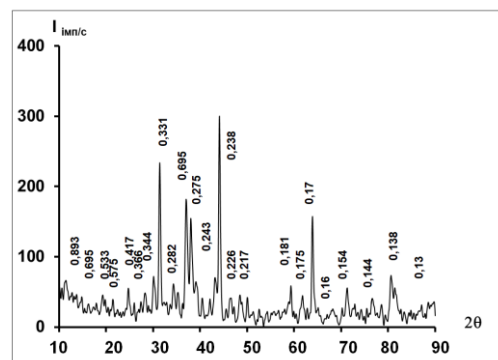


Рис. 2. Дифрактограма в'язучого, обпаленого за 1 000 °С

Суттєво кращі результати отримано обпалом суміші з карбонату кальцію і суміші відходів вуглезбагачення за 1 200 °С (рис. 3).

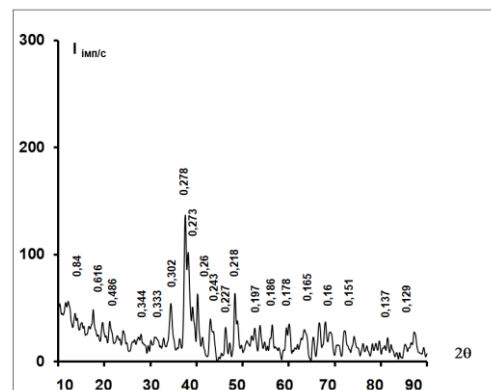


Рис. 3. Дифрактограма в'язучого, обпаленого за 1 200 °С

Позитивний ефект від збільшення температури обпалу до 1 200 °С базується на тому, що мінералогічний склад в'язучого містить у своєму складі значну кількість двокальцієвого силікату (d , нм: 0,278; 0,273; 0,26; 0,218), а також трикальцієвий силікат (d , нм: 0,302; 0,227; 0,273; 0,261; 0,218; 0,186; 0,178; 0,163), браунмілерит (d , нм: 0,277; 0,263; 0,192) і дуже в незначній кількості

кварц (d , нм: 0,424; 0,333; 0,243; 0,181; 0,151; 0,137).

Отже, дослідженням процесу формування мінералогічного складу у в'язучому з карбонату кальцію і шламу відходу вуглезабагачення за обпалу їх суміші в інтервалі 1 000–1 200 °С з використанням рентгенофазового аналізу встановлено: випал суміші за температури 1 000 °С забезпечує розклад глинистих мінералів, присутніх у твердій фазі шламу і карбонатів, а також проведення твердофазових реакцій синтезу в незначній кількості двокальцієвого силікату і трикальцієвого алюмінату.

Випал сировинної суміші за температури 1 200 °С інтенсифікує твердофазові реакції синтезу двокальцієвого силікату і браунмілериту, а також утворення трикальцієвого силікату. При цьому утворення трикальцієвого силікату можливе за рахунок мінералізаторів, які присутні у відходах вуглезабагачення.

Виходячи з вищенаведеного, можна зробити висновок, що для отримання в'язучого з карбонату кальцію і шламу вуглезабагачення сировинну суміш необхідно обпалювати за температури 1 100–1 200 °С. При цьому отримане в'язуче може бути використане в матеріалах для будівельного 3D-друку і самостійно як в'язуче і в поєднанні з цементом.

Висновки

Установлено можливість отримання в'язучого із вмістом вторинної сировини, а саме відходів вуглезабагачення із зниженням температури його обпалу. Використання вторинної сировини дає можливість одночасно досягти позитивних ефектів щодо зменшення впливу на навколишнє середовище та зменшення вартості будівельних робіт за рахунок зниження собівартості матеріалів із застосуванням технології 3D-друку.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Дворкін Л. Й., Марчук В. В., Зятюк Ю. Ю. Цементно-шлакові суміші для 3D принтеру. *Будівельні матеріали та вироби*. 2021. Вип. 1–2 (102). С. 14–19.
2. Бабушкін В. І., Винниченко В. І., Шульга І. В. Ефективність використання відходів вуглезабагачення при випалі цементного клінкеру. *Науковий вісник будівництва*. 1998. Вип. 2. С. 128–130.
3. Шпирько М. В., Бондаренко С. В., Бондаренко А. С. Отримання в'язучого з відходів вуглезабагачення відсіву доломіту з врахуванням коефіцієнту теплового енергопотенціалу. *Моделювання та оптимізація будівельних композитів*. Одеса, 2019. С. 195–199.
4. Приходченко В. Л., Слащева Е. А., Осенній В. Я., Клюєв Е. С. Основні напрямки використання відходів флотачії Червоноградської ЦЗФ в будівельній галузі. *Геотехнічна механіка*. Дніпропетровськ : ІГТМ НАНУ, 2012. Вип. 99. С. 220–227.

REFERENCES

1. Dvorkin L.J., Marchuk V.V. and Zyatyuk Yu.Yu. *Cementno-shlakovi sumishi dlya 3D printeru* [Cement slag concrete for 3D printer]. *Budivelni materialy ta virobi* [Building Materials and Products]. 2021, vol. 1–2 (102), pp. 14–19. (in Ukrainian).
2. Babushkin V.I., Vinnichenko V.I. and Shulga I.V. *Efektivnist vikoristannya vidhodiv vuglezbagachennya pri vipali cementnogo klinkeru* [The efficiency of utilizing coal enrichment waste in the clinker firing process]. *Naukoviy visnik budivnictva* [Scientific Bulletin of Civil Engineering]. 1998, vol. 2, pp. 128–130. (in Ukrainian).
3. Shpyrko M.V., Bondarenko S.V. and Bondarenko A.S. *Otrimannya v'yazhuchogo z vidhodiv vuglezbagachennya vidsivu dolomitu z vrahuvannyam koefitsiyentu teplovogo energopotencialu* [Production of binder from coal enrichment waste and dolomite residue]. *Modelyuvannya ta optimizaciya budivelnih kompozitiv* [Modeling and Optimization of Construction Composites]. Odesa, 2019, pp. 195–199. (in Ukrainian).
4. Prihodchenko V.L., Slashyeva E.A., Osennij V.Ya. and Klyuyev E.S. *Osnovni napryamki vikoristannya vidhodiv flotaciyi Chervonogradskoyi CZF v budivelnij galuzi* [The main areas of application of wash slurry wastes in building branch of industry]. *Geotekhnichna mehanika : mizhgaluz. zb. nauk. pr.* [Geotechnical Mechanics: interdisciplinary coll. of sc. pap.]. Dnipropetrovsk : IGTM NANU Publ., 2012, vol. 99, pp. 220–227. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 15.04.2024.