

УДОСКОНАЛЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТОВАРІВ

УДК 658.62:691.542.613

DOI: 10.31617/2.2022(41)07

Валентина ПОЛЮГА

к. т. н., доцент кафедри товарознавства та митної справи
Державного торговельно-економічного університету
вул. Кіото, 19, м. Київ, 02156, Україна
v.poliuha@knute.edu.ua

Valentyna POLIUHA

PhD (Technical Sciences),
Associate Professor at the Department of
Commodity Science and Customs Affairs,
State University of Trade and Economics
19, Kyoto St., Kyiv, 02156, Ukraine
ORCID: 0000-0001-7527-2236

Оксана ЗОЛОТАРЬОВА

к. т. н., доцент, доцент кафедри товарознавства та митної справи
Державного торговельно-економічного університету
вул. Кіото, 19, м. Київ, 02156, Україна
o.zolotarova@knute.edu.ua

Oksana ZOLOTARIOVA

PhD (Technical Sciences),
Associate Professor, Associate Professor
at the Department of Commodity Science
and Customs Affairs,
State University of Trade and Economics
19, Kyoto St., Kyiv, 02156, Ukraine
ORCID: 0000-0003-2534-3125

Марина ЖАЛДАК

доктор філософії (Технічні науки),
ст. викладач кафедри товарознавства та митної справи
Державного торговельно-економічного університету
вул. Кіото, 19, м. Київ, 02156, Україна
m.zhaldak@knute.edu.ua

Maryna ZHALDAK

Doctor of Philosophy (Technical Sciences),
senior lecturer at the Department
of Commodity Science and Customs Affairs,
State University of Trade and Economics
19, Kyoto St., Kyiv, 02156, Ukraine
ORCID: 0000-0002-4490-8673

ВЛАСТИВОСТІ ЗОЛЬНИХ МІКРОСФЕР ЯК НАПОВНЮВАЧІВ У СУМІШАХ ДЛЯ МУРУВАННЯ

Вступ. Зважаючи на активний розвиток будівельної промисловості, виникає потреба у будівельних матеріалах з певними теплоізоляційними властивостями, які потребують використання сучасних в'язучих із необхідним комплексом заданих властивостей.

Проблема. Розв'язання проблеми використання вітчизняних зольних мікросфер як наповнювачів будівельних матеріалів має значний науково-практичний інтерес.

PROPERTIES OF ASH MICROSPHERES AS FILLERS IN MIXTURES FOR MASONRY

Introduction. Due to the active development of the construction industry, there is a need for building materials with certain thermal insulation properties, which require the use of modern binders with the necessary set of specified properties.

Problem. Solving the problem of using domestic fly ash microspheres as fillers in building materials is of considerable scientific and practical interest.

© Валентина Полюга, Оксана Золотарьова, Марина Жалдак, 2022

Внесок авторів: Полюга В. – 50 %; Золотарьова О. – 25 %; Жалдак М. – 25 %.

Ця робота виконана в рамках НДР "Формування властивостей непродовольчих товарів" з відповідним фінансуванням.

Poljuga V., Zolotar'ova O., Zhaldak M. Vlastyvosti zol'nyh mikrosfer jak napovnjuvachiv u sumishah dlja muruvannja. *Mizhnarodnyj naukovo-praktychnyj zhurnal "Tovary i rynky"*. 2022. № 1 (41). S. 81-91. [https://doi.org/10.31617/2.2022\(41\)07](https://doi.org/10.31617/2.2022(41)07)

Метою статті є оцінка властивостей зольних мікросфер як товару, що використовується для наповнення будівельних матеріалів.

Методи. Досліджено зольні мікросфери Курахівської, Придніпровської, Криворізької, Бурштинської та Трипільської ТЕС. Визначення складу мікросфер проведено ІЧ-спектроскопічним аналізом, кристалічної структури – рентгенофазовим, гранулометричного складу – ситовим методом.

Результати дослідження. Положення максимумів смуг, відповідальних за деформаційні коливання зв'язків Si-O зольних мікросфер, перебуває в межах 444.1–463.2 см⁻¹. Ці матеріали мають показники інтенсивностей у межах 0.76–1.58. Стосовно енергетичної однорідності зв'язків Si-O мікросфери розміщуються у міру зменшення: Трипільська > Курахівська > Криворізька ТЕС. Зольні мікросфери Бурштинської та Придніпровської ТЕС мають порівняно вищий вміст адсорбованої води, ніж решта.

У складі досліджуваних мікросфер переважно є кристалофаза, за винятком Курахівської ТЕС, що представлена мулітом.

Аналіз гранулометричного складу досліджуваних зразків зольних мікросфер показав, що найбільший вміст має фракція 60–200 мкм. Найкрупніша фракція 400–630 мкм взагалі відсутня в усіх досліджуваних зразках.

Висновки. Переважними компонентами хімічного складу досліджених зольних мікросфер є оксиди кремнію та алюмінію для Трипільської ТЕС, а для Придніпровської – тільки оксиди алюмінію.

За ІЧ-спектроскопією визначено, що мікросфери Бурштинської та Придніпровської ТЕС мають порівняно вищий вміст води, а при їх використанні як наповнювача для будівельних матеріалів зменшується щільність останніх.

За гранулометричним складом зольних мікросфер доведено їхню дрібнодисперсність, що значно скорочує фінансові витрати при застосуванні їх як наповнювачів у будівельних матеріалах.

Ключові слова: зольні мікросфери, властивості, склад, ТЕС, фракція, фаза, мінералогічний склад, енергетичний склад поверхні.

The aim of the article is to evaluate the properties of fly ash microspheres as a commodity used for filling building materials.

Methods. There have been studied fly ash microspheres of Kurakhivska, Prydniprovska, Kryvyi Rih, Burshtynska and Trypilska TPPs. Determination of the composition of fly ash microspheres was performed by IR-spectroscopic analysis, crystal structure – X-ray phase, particle size distribution - sieve method.

Results. The position of the maxima of the bands responsible for the deformation oscillations of the Si-O bonds of the fly ash microspheres is in the range of 444.1–463.2 cm⁻¹. These materials have intensity values in the range of 0.76–1.58. Regarding the energy homogeneity of Si-O bonds, the fly ash microspheres are located as they decrease: *Trypilska TPP* > *Kurakhivska TPP* > *Kryvyi Rih TPP*. The fly ash microspheres of *Burshtynska* and *Prydniprovska TPPs* have a relatively higher content of adsorbed water than the rest.

In the composition of the studied fly ash microspheres, the crystal phase is predominant, with the exception of *Kurakhivska TPP*.

The analysis of the particle size distribution of the studied samples of fly ash microspheres showed that the fraction of 60–200 μm has the highest content. The largest fraction of 400–630 μm is absent in all samples.

Conclusions. It is established that the predominant components of the chemical composition of the studied fly ash microspheres are oxides of silicon and aluminum for *Trypilska TPP*, and for *Prydniprovska* – only aluminum oxides.

Studies of the properties of fly ash microspheres by IR-spectroscopy have shown that the microspheres of *Burshtynska* and *Prydniprovska TPPs* have a relatively higher water content, which when used as a filler for building materials reduces the density of the latter.

The study of the particle size distribution of fly ash microspheres proved their fineness, which allows their use as a filler in building materials without additional grinding and significantly reduces the financial costs of their production.

Keywords: fly ash microspheres, properties, composition, thermal power plant, fraction, phase, mineralogical composition, surface energy composition.

Вступ. Широке використання різноманітних будівельних матеріалів у сучасному будівництві з метою забезпечення необхідного рівня теплоізоляційних властивостей потребує використання сучасних в'язучих із необхідним комплексом заданих властивостей. Одним зі шляхів розв'язання цієї проблеми є розробка ефективних зв'язуючих

систем на основі зольних мікросфер. Останні є техногенними продуктами, що утворюються внаслідок спалювання вугілля з різним вмістом мінеральної складової [1].

Високі температури під час спалювання вугілля створюють умови для формування закритої структури так званих зольних мікросфер, тому вказані матеріали мають низькі теплопровідність та водопоглинання, а також високу стабільність до дії факторів зовнішнього середовища і потенційно можуть бути застосовані як інгредієнти будівельних матеріалів. Однак відсутність вірогідної інформації стосовно складу, структури зольних мікросфер та властивостей їхньої поверхні потребує проведення комплексу наукових досліджень з метою розробки оптимальних рецептур матеріалів з їх застосуванням [2].

На формування якості та властивостей будівельних матеріалів значною мірою впливають наповнювачі, з яких пропонується використовувати відходи теплоелектростанцій, а саме зольні мікросфери. В Україні є велика кількість цього матеріалу, оскільки це частина відходів ТЕС, що разом із золою після спалювання вугілля переміщується на золовідвали. Зольні мікросфери на порядок дешевші, ніж інші наповнювачі, що використовуються в будівельній промисловості [3].

Проблема. Розв'язання проблеми використання вітчизняних зольних мікросфер як наповнювача будівельних матеріалів з метою здешевлення та підвищення теплоізоляційних властивостей останніх має значний науковий і практичний інтерес.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Властивості зольних мікросфер розглядалися в працях вітчизняних вчених: О. Сім'ячко [4], В. Свідерського і В. Демченко [5], В. Кашковського [3], В. Токарчука [6], а також закордонних: Harry E. Martz [7], E. Haustein [8], Xueming Wang [9] та ін. Дослідження саме цих науковців спрямовані на визначення властивостей зольних мікросфер, отриманих з різних ТЕС. Зокрема, аналізуються їхні склад, структура та фізико-технічні властивості. Базуючись на напрацюваннях зазначених вище дослідників, необхідно здійснити комплексну оцінку властивостей зольних мікросфер, отриманих з українських ТЕС.

Метою статті є оцінка властивостей зольних мікросфер як товару, що застосовується для наповнення будівельних матеріалів.

Методи. Використано загальнонаукові та спеціальні методи аналізу, системного підходу, наукового узагальнення й порівняння наукових джерел вітчизняних і закордонних науковців.

Визначення складу мікросфер із кількісною оцінкою енергетичного стану проведено ІЧ-спектроскопічним аналізом на приладі *Avatar 370 FT-TR*. Метод ґрунтується на взаємодії речовин з електромагнітним випромінюванням в ІЧ-діапазоні: між червоною частиною видимого спектра (хвильове число 14000 см^{-1}) і початком коротко-

хвильового діапазону (20 см^{-1}). Зневоднений КВг використано як носій. Ступінь взаємодії оцінено за зміщенням характеристичних смуг коливань, які відповідають ОН-групам, SiO-групам, зв'язками Si-O-Al та Si-O-Si наповнювачів. Основу цього методу становлять властивості різних органічних і неорганічних функціональних груп давати певні смуги поглинання або відображення [10].

Встановлено склад зольних мікросфер рентгенофазовим аналізом на дифрактометрі ДРОН-3. Цей метод полягає у визначенні кристалічної структури зольних мікросфер і процесів, пов'язаних із перебудовою атомів, за дифракційною картиною, що виникає під час розсіювання рентгенівських променів кристалічною ґраткою [11]. Встановлення гранулометричного складу зольних мікросфер проведено ситовим методом [12].

Результати дослідження. Останніми роками інтенсивно розвивається напрям, який стосується розробки методів виділення та використання мікросферичних компонентів летючих зол ТЕС (магнітних мікросфер або магнетитових мікрокульок і мікросфер або порожнистих зольних мікросфер), що мають цінні технічні властивості [2; 13]. Особливістю досліджених матеріалів є те, що зольні мікросфери Курахівської, Придніпровської та Криворізької ТЕС отримано внаслідок спалювання вугілля Донецького кам'яновугільного басейну, а Бурштинської та Трипільської ТЕС – Львівсько-Волинського вугільного басейну.

Зольні мікросфери утворюються під час пиловугільного спалювання твердого палива, після чого вловлюються електрофільтрами та в сухому стані відбираються за допомогою золівдбірника на виробничі потреби, або ж, разом із водою і шлаком, відправляються на золівдвал. Отже, мінералогічний склад зольних мікросфер залежить від виду твердого палива, яке спалюється на ТЕС.

З метою встановлення складу мікросфер проведено ІЧ-спектроскопічний аналіз із кількісною оцінкою енергетичного стану, зв'язаного в їхній структурі за положенням максимумів поглинання, інтенсивності (I_0/I) та ширини характеристичних смуг на половині висоти ($\Delta\nu_{1/2}$, см^{-1}). Зіставлення параметрів характеристичних смуг поглинання структуроутворювальних зв'язків зольних мікросфер із різних ТЕС свідчить про наявність кількісних і якісних відмінностей для останніх. Так, положення максимумів смуг, відповідальних за деформаційні коливання зв'язків Si-O, перебуває в межах від 444.1 см^{-1} (Бурштинська ТЕС) до 463.2 см^{-1} (Трипільська ТЕС) (табл. 1; рис. 1). Згадані матеріали мають, відповідно, мінімальні (0.76) та максимальні (1.58) показники інтенсивностей (I_0/I). Стосовно енергетичної однорідності зв'язків Si-O мікросфери розміщуються у міру зменшення: Трипільська > Курахівська > Криворізька ТЕС.

Таблиця 1

Параметри ІЧ-смуг поглинання зольних мікросфер

ТЕС	Максимум смуг поглинання, cm^{-1}	Інтенсивність смуг поглинання (I_0/I) / напівширина смуги поглинання ($\Delta\nu_{1/2}$, cm^{-1})	Характер коливань зв'язків
Бурштинська	444.2	0.76	δ Si-O
	553.8	0.45	δ Si-O-Al
	828.6	1.74	ν Si-O-Al
	1028.6	6.71/928.6	ν Si-O-(Si)
Криворізька	451.7	1.19/35.7	δ Si-O
	797.6	0.13	ν Si-O-Al
	1095.6	1.17	ν Si-O-(Si)
Придніпровська	449.7	1.72	δ Si-O
	588.8	0.24	δ Si-O-Al
	790.6	1.12/785.7	ν Si-O-Al
	1040.8	5.70	ν Si-O-(Si)
Трипільська	463.2	1.58/85.7	δ Si-O
	546.2	0.81/429	δ Si-O-Al
	828.6	0.60	ν Si-O-Al
	914.3	0.67	δ AlOH
	1097	7.79/357.1	ν Si-O-(Si)
Курахівська	452.0	1.11/71.4	δ Si-O
	552.8	0.10	δ Si-O-Al
	797.8	1.06	ν Si-O-Al
	1080.2	1.25	ν Si-O-(Si)

Максимуми смуг поглинання, відповідальних за деформаційні коливання Si-O-Al, перебувають у межах частот від 546.2 до 588.8 cm^{-1} . Кількість відмічених зв'язків нижча в порівнянні з Si-O для мікросфер Придніпровської ТЕС (більше ніж у 7 разів), для Трипільської ТЕС – майже у 2 рази. Відношення I_0/I для досліджуваних матеріалів коливається в межах 0.10–0.81.

Кількісно зольні мікросфери, отримані з Бурштинської ТЕС, переважають усі інші. Значення I_0/I зольних мікросфер, отриманих з Бурштинської ТЕС, більше ніж у 13 разів перевищує значення цих матеріалів Криворізької ТЕС.

За показником I_0/I криворізькі мікросфери перевершують трипільські у 10 разів. Тільки бурштинські зольні мікросфери характеризуються півшириною смуги при 1028.6 cm^{-1} , що є абсолютним максимумом серед усіх досліджуваних матеріалів.

Наявність деформаційних коливань Si-O-Al та валентних коливань Si-O під час ІЧ-спектроскопічних досліджень зольних мікросфер свідчить про високу можливість регулювати властивості поверхні останніх. Мається на увазі доцільність направленої модифікації поверхні зольних мікросфер з метою забезпечення необхідного рівня взаємодії з в'язучою речовиною. Внаслідок цього підвищуються механічні й експлуатаційні властивості зольних мікросфер, що дає змогу використовувати останні як наповнювач будівельних матеріалів.

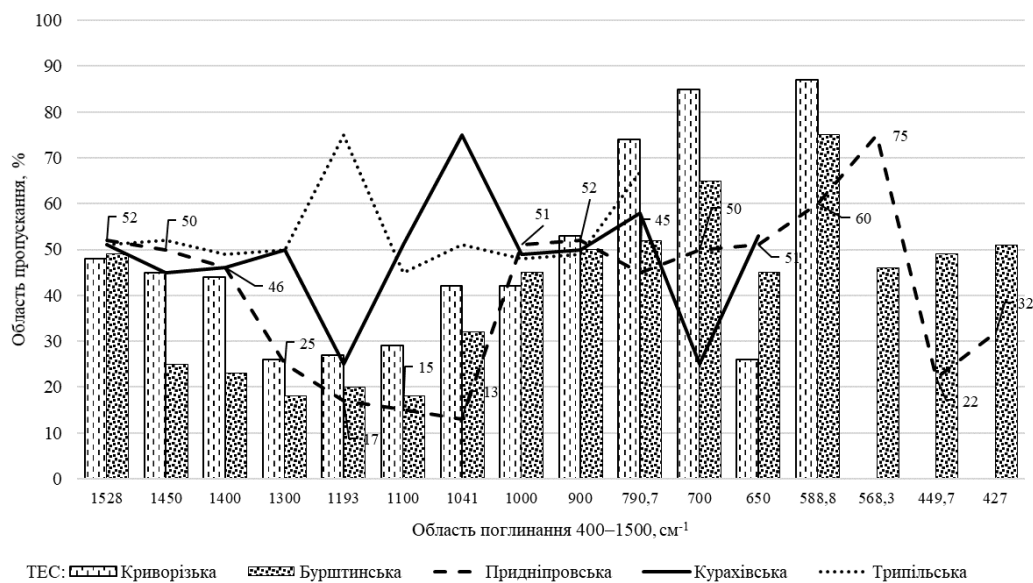


Рис. 1. ІЧ-спектри зольних мікросфер

ІЧ-спектроскопічні дослідження зольних мікросфер у частині адсорбованої води наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Характеристика ІЧ-спектрів властивостей поверхні зольних мікросфер

ТЕС	Максимум смуг поглинання, cm^{-1}	Інтенсивність смуг поглинання (I_0/I) / напівширина смуги поглинання ($\Delta\nu_{1/2}$, cm^{-1})	Характер коливань зв'язків
Бурштинська	3436.8	0.52	v адсорбованої води
Криворізька	3425.4	0.11	
Придніпровська	3403.4	0.38	δ -Al-OH δ адсорбованої води
Трипільська	914.3 3435.7	0.60 0.03	
Курахівська	1080.2 3429.8	1.25 0.08	δ -Al-OH v адсорбованої води

Очевидно, що суттєвих відмінностей між спектрами усіх досліджуваних зразків немає. В області $3600\text{--}3200\text{ cm}^{-1}$ розміщується смуга поглинання молекули H_2O . Окрім цього, в області $3000\text{--}4000\text{ cm}^{-1}$ спостерігаються деформаційні коливання гідроксильних груп, що розташовані у вершинах кремнекисневих тетраедрів (рис. 2).

За даними досліджень ІЧ-спектрів зольних мікросфер, встановлено, що в їхньому складі міститься переважна кількість оксидів кремнію й алюмінію, а також значна кількість адсорбованої води. Наявність таких сполук позитивно впливає на здатність зольних мікросфер взаємодіяти з в'язучими речовинами (наприклад цементом) у складі будівельних матеріалів. Це, своєю чергою, підвищує експлуатаційні властивості останніх.

Досліджено, що мікросфери Бурштинської та Придніпровської ТЭС мають порівняно вищий вміст води, ніж решта. Внаслідок цього за використання зольних мікросфер як наповнювача зменшується щільність теплоізоляційних будівельних матеріалів.

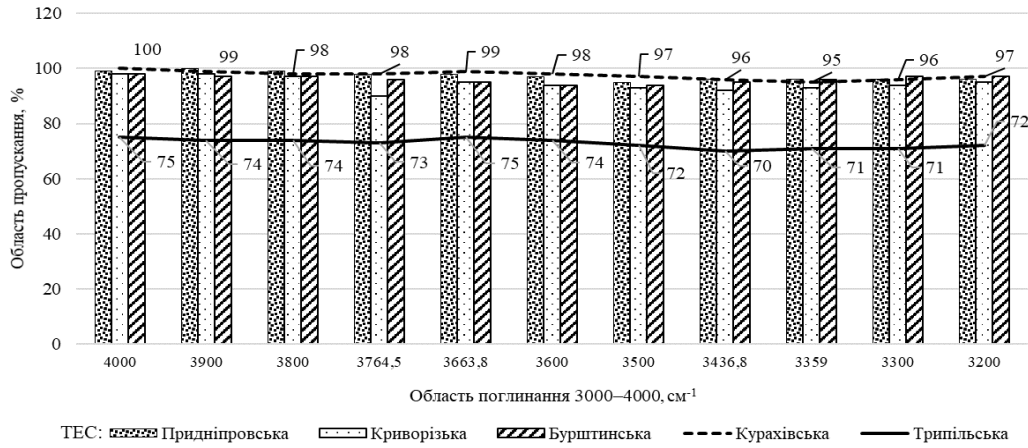


Рис. 2. ІЧ-спектри зольних мікросфер із різних ТЕС

У результаті проведеного ІЧ-спектроскопічного аналізу з кількісною оцінкою енергетичного стану встановлено, що у складі зольних мікросфер переважають SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , TiO_2 , K_2O , а також наявні MnO_2 , Pb_2O_3 , SO_2 , CuO та ін.

З використанням рентгенофазового аналізу визначено, що основними складовими мікросфер є склофаза, муліт і кварц (рис. 3а–3д; табл. 3).

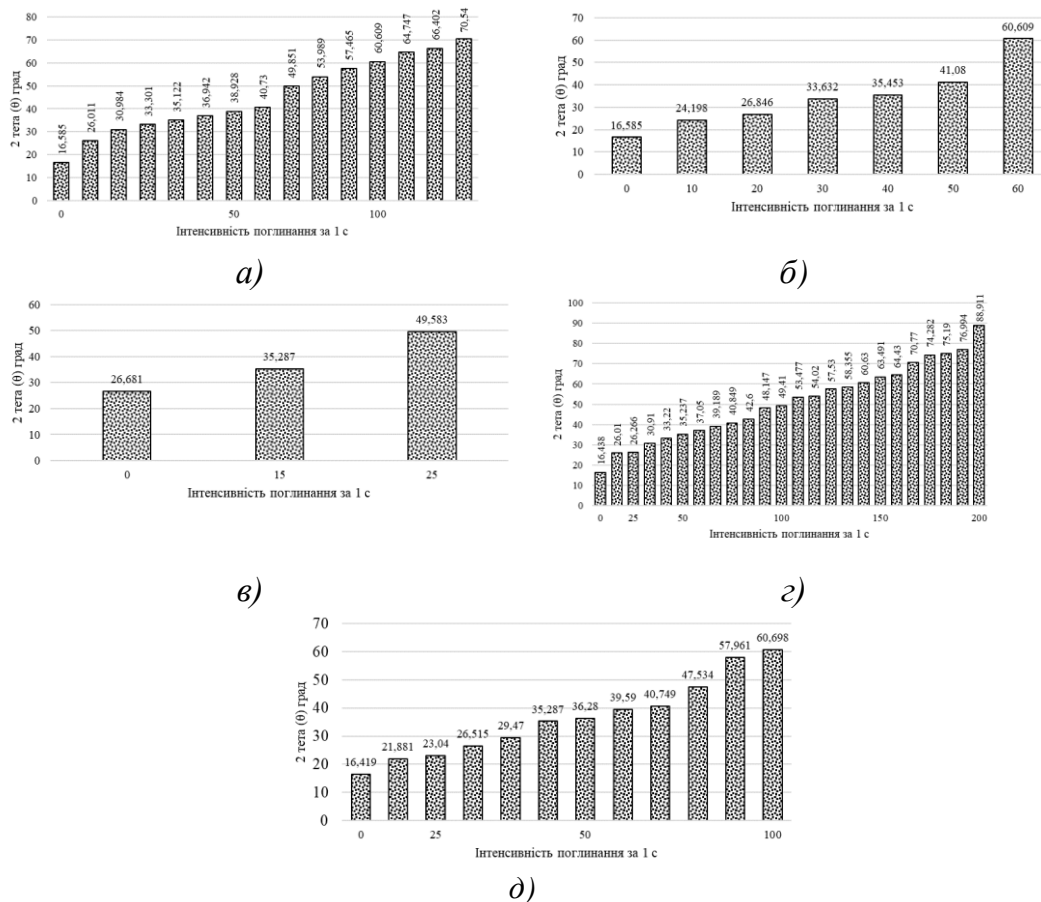


Рис. 3. Рентгенофазовий аналіз зольних мікросфер: а) Бурштинської; б) Криворізької; в) Придніпровської; г) Трипільської; д) Курахівської ТЕС

Таблиця 3

Мінералогічний склад зольних мікросфер, мас. %

ТЕС	Склофаза		Кристалфаза		Показник переломлення склофази
	скло	опал-кристобаліт	муліт	кварц	
Бурштинська	2	–	95	3	1.519
Криворізька	6	–	93	1	1.512
Придніпровська	3	1	91	5	1.512
Трипільська	1	–	98	1	1.516
Курахівська	14	37	43	6	1.518

У складі досліджуваних мікросфер переважною є кристалфаза, за винятком Курахівської ТЕС. Представлена вона здебільшого мулітом. Його мінімальна кількість виявлена саме для Курахівської ТЕС, а максимальна – для Трипільської.

Вміст кварцу у кристалофазі мікросфер коливається в межах 1–6 мас. %. На рентгенограмах зміщення рефлексів кварцу в бік його викривленої модифікації свідчить про наявність домішок.

Підвищений вміст склофази характерний для зольних мікросфер із золи-виносу ТЕС, що спалюють донецькі антрацити (Криворізька, Придніпровська, Курахівська ТЕС) – 4–51 мас. %. Вміст склофази у мікросферах, що утворюються під час спалювання кам'яного вугілля Львівсько-Волинського басейну (Бурштинська ТЕС), становить лише 2 мас. %. Встановлено, що показники переломлення склофази мікросфер перебувають в інтервалі 1.512–1.519, що відповідає склу з вмістом кремнію від 56.8 до 60.2 мас. % (див. *табл. 3*).

Важливою характеристикою зольних мікросфер, що визначає їх застосування як наповнювача для теплоізоляційних будівельних матеріалів, є розмір частинок та відсоткове співвідношення їхніх фракцій – гранулометричний склад (*табл. 4*) [11].

Таблиця 4

Розподіл частинок зольних мікросфер за фракціями, мас. %

ТЕС	Фракція, мкм					
	менше ніж 63	63–100	100–160	160–200	200–315	315–400
Бурштинська	4	15	15	59	4	3
Криворізька	4	16	10	66	2	2
Придніпровська	8	21	10	56	3	2
Трипільська	6	18	15	57	0	4
Курахівська	7	19	14	47	10	3
400	23	71	49	228	19	10

Найбільший вміст серед досліджених зольних мікросфер має фракція 160–200 мкм. Вміст фракції 100–160 мкм знижується, а далі домінівне положення займає фракція 63–100 мкм. Крупніші за зазначені вище фракції мають на порядок нижчий вміст, як і найдрібніша фракція (менше ніж 63 мкм). Найкрупніша фракція 400–630 мкм взагалі відсутня в досліджуваних зразках зольних мікросфер.

Окремо слід відмітити зольні мікросфери Трипільської ТЕС. Гранулометричний склад цього зразка відрізняється від решти повною відсутністю фракції 200–315 мкм. Цей факт можна пояснити тим, що в котлах Трипільської ТЕС майже відсутній киплячий шар і перебування розплаву мінеральної фракції там значно скорочене в часі. Зниження часу на сфероутворення, а також різке охолодження золошлакових відходів позначається на крупності зольних мікросфер – вони відрізняються структурою поверхні.

В інших чотирьох матеріалів спостерігається певна закономірність у фазовому складі: середній вміст фракції 315–400 мкм становив 2.5 мас. %, вміст фракції 200–315 мкм – 4.75 мас. %. Припускається, що утворення останньої фракції відбувається на етапі локальної появи рідкої фази – розплаву з відносно високою в'язкістю і порівняно невисоким вмістом газів. Більш суттєвий середній вміст має фракція 160–200 мкм – 57.0 мас. %, що є найбільшою часткою аналізованого матеріалу. Кількісна характеристика останніх двох фракцій вказує на те, що в зольних мікросферах значну частину становлять мікросфери з діаметром близько 200 мкм. Далі спостерігається різке зниження вмісту фракції 100–160 мкм – у середньому до 12.25 мас. %. Деяку більшу частину займає фракція 63–100 мкм – 17.75 %, а фракція з розміром частинок менше ніж 63 мкм – 5.75 %.

Отримані дані показують досить чітку зміну складу зольних мікросфер зі збільшенням їхніх розмірів: знижується вміст SiO_2 , TiO_2 , MnO_2 .

Ще однією особливістю гранулометричного складу представлених зразків є те, що в зольних мікросферах, отриманих спалюванням вугілля Донецького басейну (Трипільська, Криворізька та Придніпровська ТЕС), майже відсутня фракція крупністю 200–315 мкм, чого не спостерігається у зразках з Львівсько-Волинського басейну. Ця особливість може бути пов'язана з мінеральною складовою супутньої вугільної породи: підвищений вміст карбонатів у мінеральній фракції донецького вугілля призводить до зниження розплаву, наслідком чого є підвищення крупності мікросфер, що утворюються з розплаву.

Загалом зольні мікросфери з досліджених ТЕС мають переваги щодо хімічного складу, зважаючи на високий вміст оксидів алюмінію та силіцію і незначну частку домішок, і є перспективним матеріалом як з погляду переробки відходів спалювання вугілля на теплоелектростанціях, так і з точки зору ефективної й економічної заміни іншим наповнювачам.

Висновки. Встановлено, що переважними компонентами хімічного складу досліджених зольних мікросфер є оксиди кремнію й алюмінію для Трипільської ТЕС, а для Придніпровської – тільки оксиди алюмінію.

Дослідження властивостей зольних мікросфер методом ІЧ-спектроскопії показали, що мікросфери Бурштинської та Придніпровської ТЕС мають порівняно вищий вміст води, а за їх використання як наповнювача для будівельних матеріалів зменшується щільність останніх.

Вивченням гранулометричного складу зольних мікросфер доведено їхню дрібнодисперсність, що дає змогу використовувати їх як наповнювачі для будівельних матеріалів без додаткового подрібнення і значно скорочує фінансові витрати на їх виробництво.

Конфлікт інтересів. Автори заявляють, що вони не мають фінансових чи нефінансових конфліктів інтересів щодо цієї публікації; не мають відносин із державними органами, комерційними або некомерційними організаціями, які могли б бути зацікавлені у поданні цієї точки зору. З огляду на те, що автори працюють в установі, яка є видавцем журналу, що може зумовити потенційний конфлікт або підозру в упередженості, остаточне рішення про публікацію цієї статті (включно з вибором рецензентів та редакторів) приймалося тими членами редколегії, які не пов'язані з цією установою.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Демченко В. О. Формування споживчих властивостей вітчизняних зольних мікросфер. *Вісн. Львів. торг.-екон. ун-ту*. Серія: Технічні науки. 2016. № 17. С. 38-41.
2. Свідерський В., Демченко В. Хімічний склад і дисперсність зольних мікросфер. *Міжнар. наук.-практ. журн. "Товари і ринки"*. 2017. № 1 (21). С. 69-79.
3. Кашковський В. І., Євдокименко В. О., Каменських Д. С., Ткаченко Т. В., Вахрін В. В. Зольні та золошлакові відходи як багатофункціональна сировина. *Наука та інновації*. 2017. № 13 (4). С. 53-63. URL: https://scinn.org.ua/sites/default/files/pdf/2017/N4/KASHKOVSKY_4_2017_ukr-6.pdf
4. Сім'ячко О. Алюмосилікатні зольні мікросфери як перспективний наповнювач будівельних матеріалів і виробів. *Сталий розвиток – стан та перспективи: Матеріали Міжнародного наукового симпозиуму SDEV'2018*. (28 лютого – 3 березня 2018 року, Львів – Славське, Україна). 2018. С. 203-204. URL: http://ena.lp.edu.ua:8080/bitstream/ntb/43287/2/2018_Simiachko_O-Aliumosylikatni_zolni_203-204.pdf
5. Демченко В. О., Сім'ячко О. І., Свідерський В. А. Дослідження мінералогічного складу, структури і властивості поверхні зольних мікросфер України. *Технологічний аудит та резерви виробництва*. 2017. Т. 6. № 1 (38). С. 28-34.
6. Токарчук В. В. Вплив складу мінеральних добавок на властивості цементів. *Технологічний аудит та резерви виробництва*. 2014. № 3 (5). С. 19-22. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Tatrv_2014_3
7. Harry E. Martz. X-Ray Imaging: Fundamentals, Industrial Techniques and Applications. *Shull – CRC Press*. 2016. 439 p.
8. Hausteин E. The effect of fly ash microspheres on the pore structure of concrete. *Minerals*. 2020. No 10. P. 53-70. URL: <https://doi.org/10.3390/min10010058>
9. Xueming Wang. Effects of fly ash microspheres on sulfate erosion resistance and chlorion penetration resistance in concrete. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2020. № 139. P. 3395-3403. URL: <https://doi.org/10.1007/s10973-019-08705-8>
10. Свідерський В. А., Черняк Л. П., Сальник В. М., Сікорський О. О., Дорогань Н. О. Інструментальні методи хімічного аналізу силікатних систем: навч. посіб. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во "Політехніка", 2017. С. 91-98.
11. Мудрий С. І., Кулик Ю. О., Якимович А. С. Рентгеноструктурний аналіз у матеріалознавстві: навч. посіб. Львів: ЛНУ ім. І. Франка, 2017. С. 114.
12. ДСТУ ISO 2591-1:2004. Ситовий аналіз. Ч. 1. Методи з використанням контрольних сит з дротяної тканини і перфорованих металевих листів. Київ: Держспоживстандарт України, 2004. 24 с.
13. Орловський В. М. Нові тампонажні композиції зниженої густини. *Зб. наук. пр. УкрДГРІ*. 2016. № 4. 108 с.

REFERENCES

1. Demchenko, V. O. (2016). Formuvannja spozhyvchyh vlastyvostej vitchyznjanyh zol'nyh mikrosfer [Formation of consumer properties of domestic ash microspheres]. *Visnyk L'vivs'kogo torgovel'no-ekonomichnogo universytetu. Serija: Tehnichni nauky – Herald of Lviv University of Trade and Economics. Series: Technical Sciences*, 17, 38-41 [in Ukrainian].
2. Sviders'kyj, V., & Demchenko, V. (2017). Himichnyj sklad i dyspersnist' zol'nyh mikrosfer [Chemical composition and dispersion of ash microspheres]. *Mizhnarodnyj naukovo-praktychnyj zhurnal "Tovary i rynky" – International Scientific and Practical Journal "Commodities and Markets"*, 1(21), 69-79 [in Ukrainian].
3. Kashkovs'kyj, V. I., Jevdokymenko, V. O., Kamens'kyh, D. S., Tkachenko, T. V., & Vahrin, V. V. (2017). Zol'ni ta zoloshlakovi vidhody jak bagatofunkcional'na syrovyna [Ash and ash waste as a multifunctional raw material]. *Nauka ta innovacii' – Science and innovations*, 13(4), 53-63. https://scinn.org.ua/sites/default/files/pdf/2017/N4/KASHKOVSKY_4_2017_ukr-6.pdf [in Ukrainian].
4. Sim'jachko, O. (2018). Aljumosylikatni zol'ni mikrosfery jak perspektyvnyj napovnjuvach budivel'nyh materialiv i vyrobiv [Aluminosilicate ash microspheres as a promising filler of building materials and products]. *Stalyj rozvytok – stan ta perspektyvy – Sustainable development – state and prospects: Proceedings of the International Scientific Symposium SDEV'2018*. (pp. 203-204). L'viv – Slavs'ke. http://ena.lp.edu.ua:8080/bitstream/ntb/43287/2/2018_Simiachko_O-Aljumosylikatni_zolni_203-204.pdf [in Ukrainian].
5. Demchenko, V. O., Sim'jachko, O. I., & Sviders'kyj, V. A. (2017). Doslidzhennja mineralogichnogo skladu, struktury i vlastyvosti poverhni zol'nyh mikrosfer Ukrainy [Research of mineralogical composition, structure and surface properties of ash microspheres of Ukraine]. *Tehnologichnyj audyt ta rezervy vyrobnyctva – Technological audit and production reserves*. Vol. 6, 1(38), 28-34 [in Ukrainian].
6. Tokarchuk, V. V. (2014). Vplyv skladu mineral'nyh dobavok na vlastyvosti cementiv [Influence of mineral additives composition on cement properties]. *Tehnologichnyj audyt ta rezervy vyrobnyctva – Technological audit and production reserves*, 3(5), 19-22. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Tatrv_2014_3 [in Ukrainian].
7. Harry, E. Martz. (2016). X-Ray Imaging: Fundamentals, Industrial Techniques and Applications. *Shull – CRC Press* [in English].
8. Hausteine, E. (2020). The effect of fly ash microspheres on the pore structure of concrete. *Minerals*, 10, 53-70. <https://doi.org/10.3390/min10010058> [in English].
9. Xueming, Wang. (2020). Effects of fly ash microspheres on sulfate erosion resistance and chlorine penetration resistance in concrete. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 139, 3395-3403. <https://doi.org/10.1007/s10973-019-08705-8> [in English].
10. Sviders'kyj, V. A., Chernjak, L. P., Sal'nyk, V. M., Sikors'kyj, O. O., & Dorogan', N. O. (2017). Instrumental'ni metody himichnogo analizu sylikatnyh system [Instrumental methods of chemical analysis of silicate systems]. Kyi'v: KPI im. Igorja Sikors'kogo, Vyd-vo "Politehnika" [in Ukrainian].
11. Mudryj, S. I., Kulyk, Ju. O., & Jakymovych, A. S. (2017). *Rentgenostrukturnyj analiz u materialoznavstvi [X-ray structural analysis in materials science]*. L'viv: LNU im. I. Franka [in Ukrainian].
12. Sytovyj analiz. Ch. 1. Metody z vykorystannjam kontrol'nyh syt z drotjanoi' tkanyny i perforovanyh metalovyh lystiv [Sieve analysis. Part 1. Methods using control sieves made of wire cloth and perforated metal sheets]. (2004). *DSTU ISO 2591-1:2004*. Kyi'v: Derzhspozhyvstandart Ukrainy [in Ukrainian].
13. Orlovs'kyj, V. M. (2016). Novi tamponazhni kompozycii' znyzhenoi' gustyny [New grout compositions of low density]. *Zbirnyk naukovykh prac' UkrDGRI – Collection of scientific works of UkrSGRI*, 4 [in Ukrainian].

Надійшла до редакції 15.11.2021.

Прийнято до друку 23.01.2022.

Публікація онлайн 22.04.2022.