

УДК:678.067:662.613.1

DOI: 10.20535/iwccmm2025325774

## ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИТІВ З ДОДАВАННЯМ ЗОЛИ ВІНОСУ ТЕС

**Любов МЕЛЬНИК,**

К.т.н., доц.,

КПІ ім. Ігоря Сікорського,

[luba\\_xtkm@ukr.net](mailto:luba_xtkm@ukr.net)

**Тарас БЕРЕГОВИЙ,**

Аспірант,

КПІ ім. Ігоря Сікорського,

[pro100taras.beregovoi@gmail.com](mailto:pro100taras.beregovoi@gmail.com)

**Влада ЛАЗАРЕНКО,**

Студент

КПІ ім. Ігоря Сікорського,

[lazarenko.vlada@lil.kpi.ua](mailto:lazarenko.vlada@lil.kpi.ua)

**Вероніка МАКСИМЧУК,**

Студент

КПІ ім. Ігоря Сікорського

[maksymchuk.veronika@lil.kpi.ua](mailto:maksymchuk.veronika@lil.kpi.ua)

***Анотація.** У статті розглянуто перспективи використання золи виносу теплових електростанцій як мінерального наповнювача для полімерних композиційних матеріалів. Обґрунтовано доцільність застосування водних дисперсій полімерів для покращення сумісності з гідрофільною поверхнею золи та забезпечення її рівномірного розподілу в полімерній матриці. Метою дослідження є вивчення впливу концентрації золи на формування порової структури, водопоглинання, питомої поверхні та середнього розміру пор у композитах на основі латексів бутадієн-стирольного марки Latex 2012 та акрилового марки Policril 590. Експериментальні результати показали, що введення золи сприяє утворенню мезопористої структури, з високим рівнем відкритої пористості, особливо у зразках із Latex 2012. Отримані композити мають потенціал застосування в екологічно безпечних конструкційних матеріалах.*

***Ключові слова:** зола виносу, полімерний композит, латекс, пористість, мікроструктура, наповнювач, техногенні відходи.*

Зола теплових електростанцій, що утворюється як побічний продукт при спалюванні вугілля, є одним із найбільш поширених техногенних відходів у світі. Її накопичення спричиняє значне екологічне навантаження, оскільки потребує великих площ для зберігання і може призводити до забруднення

ґрунтів, підземних вод та атмосфери. У зв'язку з цим останніми роками спостерігається зростаючий інтерес до вторинного використання золи, зокрема в галузі створення полімерних композитів, де зола може виконувати функцію наповнювача, забезпечуючи не лише зменшення обсягу відходів, а й поліпшення властивостей кінцевого матеріалу. Хімічний склад золи ТЕС зазвичай включає переважно аморфний діоксид кремнію ( $\text{SiO}_2$ ), оксид алюмінію ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) та оксид заліза ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), що забезпечує її хімічну активність та потенціал для взаємодії з полімерними матрицями. Типовою формою частинок золи є сферична, а густина залежно від фракції може коливатися від 500 до 900  $\text{кг/м}^3$ , особливо для ценосфер. Такі фізичні властивості сприяють зменшенню ваги композитів та полегшують їх переробку, забезпечуючи рівномірний розподіл частинок у полімері.

Оскільки зола ТЕС має гідрофільну природу, це безпосередньо впливає на її взаємодію з полімерною матрицею. Гідрофільні частинки золи мають схильність до утворення водневих зв'язків, легко змочуються водою, але погано диспергуються в гідрофобних полімерних середовищах, що призводить до агломерації частинок, нерівномірного розподілу в об'ємі композиту та поганої адгезії. Для подолання цих недоліків оптимальним рішенням є використання водних полімерних дисперсій–латексів, зокрема на основі стирол-акрилових, стирол-бутадієнових або чисто акрилових полімерів. Використання саме водних дисперсій має кілька ключових переваг. По-перше, водне середовище є природно сумісним із гідрофільною поверхнею золи, що сприяє кращому змочуванню та стабільнішій дисперсії твердих частинок без потреби в складних фізико-хімічних модифікаціях. По-друге, це дозволяє забезпечити рівномірний розподіл наповнювача по всьому об'єму полімерної плівки або шару, що значно покращує механічні, теплові та діелектричні властивості готового композиту. По-третє, водні дисперсії є екологічно безпечними, оскільки не містять летких органічних розчинників, а сам процес їх нанесення чи змішування може здійснюватися за відносно низьких температур і без використання токсичних реагентів. Таким чином, враховуючи

гідрофільність золи та властивості водних полімерних дисперсій, їх поєднання є логічно обґрунтованим і технологічно доцільним рішенням для створення високоефективних, екологічно безпечних композитних матеріалів.

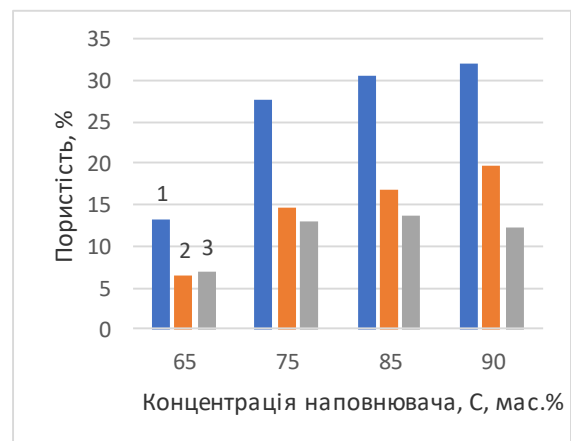
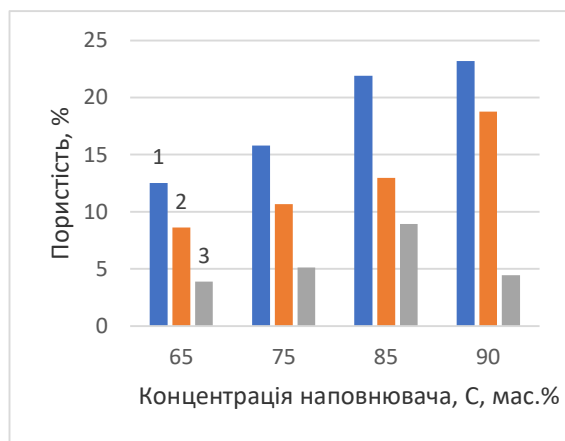
**Мета дослідження** – встановити структурно-функціональні особливості полімерних композитів на основі водних латексних дисперсій із золою Курахівської ТЕС (зола К) як наповнювачем, зокрема вивчити вплив концентрації золи на формування порової структури, водопоглинання, питому поверхню та мікропористість, а також обґрунтувати доцільність використання таких систем для створення екологічно безпечних композиційних матеріалів з регульованими теплофізичними властивостями.

У контексті різноманітних полімерних матриць, дослідження показують, що зола ТЕС може бути ефективним наповнювачем у композитах на основі епоксидних смол, поліетилену високої щільності (HDPE), поліуретанів, а також інших термопластів та термореактивних полімерів. Кожен тип матриці має свої особливості взаємодії з зольним наповнювачем, що впливає на оптимальну концентрацію золи, необхідні методи модифікації поверхні та очікувані експлуатаційні характеристики матеріалу. Зокрема, у випадку епоксидної смоли введення золи в концентраціях 1, 3, 5, 7 і 10 phr (частин наповнювача на 100 частин смоли) сприяє підвищенню модуля пружності, міцності на розтяг та діелектричних характеристик. Найбільш виражений ефект спостерігається при 10 phr, коли енергоефективність зберігання зростає до 30 разів порівняно з незаповненою матрицею [1]. Для ПЕНТ оптимальною є концентрація золи на рівні 15 мас.%, що забезпечує зростання модуля Юнга приблизно на 200% без значного погіршення інших характеристик. Навіть після 20 тижнів старіння матеріалу зниження міцності становить лише 5–9% [2], що свідчить про високу стабільність властивостей зольних композитів. У жорстких поліуретанових пінопластах додавання золи до 10 мас.% покращує як теплову, так і механічну стійкість, роблячи такі композити придатними для застосування в теплоізоляційних системах [3].

Зола ТЕС, завдяки здатності поглинати сонячне випромінювання в широкому спектрі, забезпечує додатковий захист полімерів від фотодеструкції. Цей ефект важливий для матеріалів, що експлуатуються на відкритому повітрі протягом тривалого часу. Однак, незважаючи на значний потенціал, застосування золи пов'язане з низкою технологічних викликів. Головною проблемою є гідрофільна природа золи, що ускладнює її сумісність із гідрофобними полімерними матрицями. Це потребує застосування попередньої обробки частинок золи. Найпоширенішими методами є використання силанових сполучних агентів, які хімічно зв'язуються як із поверхнею золи, так і з полімером, створюючи стабільну інтерфазну зону [4]. Крім того, перспективними є методи фізичної модифікації, такі як ультразвукова обробка або плазмохімічне травлення, які покращують дисперсність і зменшують ступінь агломерації.

Щоб краще зрозуміти специфіку взаємодії золи Курахівської ТЕС із водними дисперсіями, було проведено дослідження порової структури композитів на основі латексів Latex 2012 і Policril 590 із введенням золи в концентраціях від 65 до 90 мас.%. Аналіз пористості показав, що система з Latex 2012 сприяє утворенню більш розвиненої порової структури. Зокрема, при 90 мас.% золи загальна пористість досягала 32,01%, відкрита – 19,79%, а водопоглинання – 12,7%, що значно перевищує відповідні показники для Policril 590. При цьому густина залишалася в межах 1,36–1,56 г/см<sup>3</sup>, що є прийнятним для теплоізоляційних матеріалів.

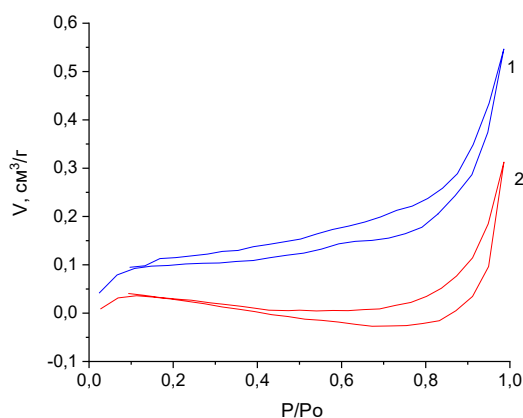
Ізотерми адсорбції азоту, побудовані для систем із золою К, відповідають типу II за класифікацією IUPAC, що свідчить про мезопористу структуру матеріалу. Система «Latex 2012 + зола» має ширший розподіл пор за радіусом із домінуванням пор близько 2 нм, тоді як Policril 590 формує щільнішу й одноріднішу структуру.



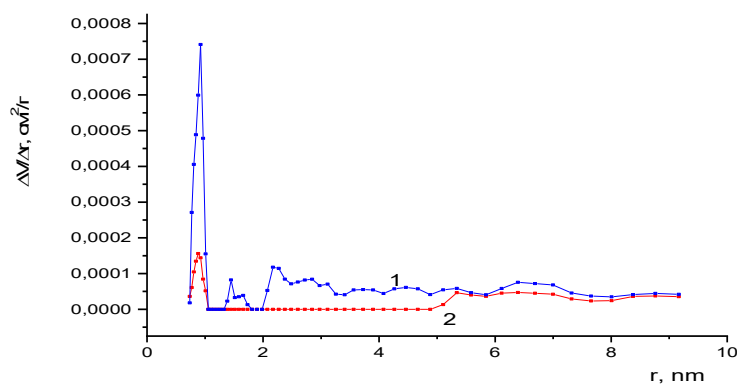
Policril 590+ Зола К

Latex 2012+ Зола К

**Рис. 1. Залежність загальної (1), відкритої (2) та закритої (3) пористості від концентрації золи в композитах на основі Latex 2012 і Policril 590**



**Рис. 2. Ізотерми сорбції азоту для зразків з Latex 2012 (1) і Policril 590 (2)**



**Рис. 3. Розподіл пор за радіусом для зразків з Latex 2012 (1) і Policril 590 (2)**

Таблиця 1–Характеристика порової структури

| Зразки               | Питома<br>поверхня<br>БЕТ, м <sup>2</sup> /г | Загальний об'єм<br>пор при P/P <sub>0</sub> = до<br>1, см <sup>3</sup> /г | Об'єм<br>мікропор,<br>см <sup>3</sup> /г | Середній<br>розмір пор,<br>нм |
|----------------------|----------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------|
| Зола К               | 0,68                                         | $1,10 \cdot 10^{-3}$                                                      | 0                                        | 2,93                          |
| Зола К+ Policril 590 | 0,61                                         | $0,48 \cdot 10^{-3}$                                                      | $3,64 \cdot 10^{-4}$                     | 1,58                          |
| Зола К + Latex 2012  | 0,57                                         | $0,79 \cdot 10^{-3}$                                                      | $1,09 \cdot 10^{-4}$                     | 2,98                          |

За даними БЕТ-аналізу, композит Latex 2012 + зола, має питому поверхню 0,57 м<sup>2</sup>/г, об'єм мікропор –  $1,09 \cdot 10^{-3}$  см<sup>3</sup>/г і середній розмір пор – 2,98 нм. Введення латексу дещо знижує питому поверхню порівняно з нативною золою, але покращує мікропористу організацію структури, що особливо цінно для функціональних матеріалів.

## ВИСНОВКИ

Надмірна концентрація золи у композиті (понад 15%) може призводити до агломерації частинок, утворення порожнин і зниження міцності, однак у латексних дисперсіях ці ефекти частково нівелюються за рахунок високої дисперсійної здатності системи. Застосування золи в композитах на основі водних дисперсій дозволяє не лише зменшити навантаження на довкілля, а й отримати матеріали з регульованими структурними та експлуатаційними характеристиками. Композити на основі Latex 2012 виявили кращі показники розвиненості порової структури порівняно з Policril 590. Отримані матеріали є перспективними для застосування у будівництві, фасадних елементах, акустичних панелях та екологічній упаковці.

## Список літератури:

1. Patsidis, A. C., & Souliotis, M. (2023). End-Of-Use Fly Ash as an Effective Reinforcing Filler in Green Polymer Composites. *Polymers*, 15(16), 3418. <https://doi.org/10.3390/polym15163418>
2. Alghamdi M. N. (2022). Performance for Fly Ash Reinforced HDPE Composites over the Ageing of Material Components. *Polymers*, 14(14), 2913. <https://doi.org/10.3390/polym14142913>

3. Kuźnia, M., Magiera, A., Zygmunt-Kowalska, B., Kaczorek-Chrobak, K., Pielichowska, K., Szatkowski, P., Benko, A., Ziabka, M., & Jerzak, W. (2021). FlyAshasanEco-FriendlyFillerforRigidPolyurethaneFoamsModification. *Materials (Basel, Switzerland)*, 14(21), 6604. <https://doi.org/10.3390/ma14216604>
4. Tiwari, S., Srivastava, K., CL, G., & Srivastava, D. (2020). Epoxy/FlyashfromThermalPowerPlant/NanofillerNanocomposite: StudiesonMechanicalandThermalProperties: A Review. *InternationalJournalofWasteResources*, 10(01). <https://doi.org/10.35248/2252-5211.20.10.375>
5. Kasar, A. K., Gupta, N., Rohatgi, P. K., & Menezes, P. L. (2020). A BriefReviewofFlyAshasReinforcementforCompositeswithImprovedMechanicalandTribologicalProperties. *JOM*, 72(6), 2340–2351. <https://doi.org/10.1007/s11837-020-04170-z>
6. Hegde, S., Padmaraj, N. H., Siddesh, V., Sunaya, T. S., AdithyaKini, K., & Sanil, V. K. (2021). Experimentalinvestigationofmechanicalsustainabilityandacousticperformanceoffly ashcenosphere/epoxypolymercomposites. *JournalofKingSaudUniversity - EngineeringSciences*. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2021.11.002>.

#### References:

1. Patsidis, A. C., & Souliotis, M. (2023). End-Of-UseFlyAshasanEffectiveReinforcingFillerinGreenPolymerComposites. *Polymers*, 15(16), 3418. <https://doi.org/10.3390/polym15163418>
2. Alghamdi M. N. (2022). PerformanceforFlyAshReinforced HDPE CompositesovertheAgeingofMaterialComponents. *Polymers*, 14(14), 2913. <https://doi.org/10.3390/polym14142913>
3. Kuźnia, M., Magiera, A., Zygmunt-Kowalska, B., Kaczorek-Chrobak, K., Pielichowska, K., Szatkowski, P., Benko, A., Ziabka, M., & Jerzak, W. (2021). FlyAshasanEco-FriendlyFillerforRigidPolyurethaneFoamsModification. *Materials (Basel, Switzerland)*, 14(21), 6604. <https://doi.org/10.3390/ma14216604>
4. Tiwari, S., Srivastava, K., CL, G., & Srivastava, D. (2020). Epoxy/FlyashfromThermalPowerPlant/NanofillerNanocomposite: StudiesonMechanicalandThermalProperties: A Review. *InternationalJournalofWasteResources*, 10(01). <https://doi.org/10.35248/2252-5211.20.10.375>
5. Kasar, A. K., Gupta, N., Rohatgi, P. K., & Menezes, P. L. (2020). A BriefReviewofFlyAshasReinforcementforCompositeswithImprovedMechanicalandTribologicalProperties. *JOM*, 72(6), 2340–2351. <https://doi.org/10.1007/s11837-020-04170-z>
6. Hegde, S., Padmaraj, N. H., Siddesh, V., Sunaya, T. S., AdithyaKini, K., & Sanil, V. K. (2021). Experimentalinvestigationofmechanicalsustainabilityandacousticperformanceoffly ashcenosphere/epoxypolymercomposites. *JournalofKingSaudUniversity - EngineeringSciences*. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2021.11.002>.

## FORMATION OF THE STRUCTURE OF POLYMER COMPOSITES WITH THE ADDITION OF FLY ASH

**Lubov MELNYK**  
PhD, Associate professor  
**Taras BEREGOVYI**  
PhD student

**Vlada LAZARENKO**

Student

**Veronika MAKSYMCHUK**

Student

Igor Sikorsky Kyiv Politechnic Institute

**Abstract.** *This article explores the prospects of using fly ash from thermal power plants as a mineral filler for polymer composite materials. The feasibility of applying aqueous polymer dispersions is substantiated to improve compatibility with the hydrophilic surface of fly ash and to ensure its uniform distribution within the polymer matrix. The aim of the study is to investigate the effect of fly ash concentration on the formation of pore structure, water absorption, specific surface area, and average pore size in composites based on butadiene-styrene latex (Latex 2012) and acrylic latex (Policril 590). Experimental results demonstrated that the addition of fly ash promotes the formation of a mesoporous structure with a high level of open porosity, particularly in samples containing Latex 2012. The obtained composites show potential for application in environmentally friendly structural materials.*

**Keywords:** *fly ash, polymer composite, latex, porosity, microstructure, filler, industrial waste.*