

Л. І. МЕЛЬНИК

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри хімічної технології композиційних матеріалів
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0000-0001-5139-3105

О. М. ШНИРУК

асистент кафедри хімічної технології композиційних матеріалів
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0000-0001-7840-6201

Ю. С. ЯНЧУК

студентка кафедри хімічної технології композиційних матеріалів
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0009-0002-0453-4213

ПОЛІМЕРНІ КОМПОЗИТИ З ЧЕРВОНИМ ШЛАМОМ: СТРУКТУРА ТА ВЛАСТИВОСТІ

У цій статті досліджено вплив типу полімерного зв'язуючого та концентрації червоного шламу (ЧШ) на пористу структуру, сорбційні характеристики та механічні властивості полімерних композитів. Як зв'язуючі використано два типи полімерів: Latex 2012 з розміром частинок 140 нм та Policril 590 з розміром частинок 200 нм. Встановлено, що розмір частинок полімеру значно впливає на взаємодію між наповнювачем і матрицею, а також на структурні характеристики композитів. Композити на основі Latex 2012 демонструють вищу загальну пористість і сорбційну здатність завдяки меншому розміру частинок полімеру, що забезпечує кращий доступ до пор і збереження мезопористої структури. У цих композитах максимальний модуль пружності досягає 93,5 МПа при концентрації ЧШ 85 мас.%, що робить матеріал перспективним для застосувань, де потрібні висока жорсткість і сорбційні характеристики, наприклад, у фільтраційних і каталітичних системах.

На відміну від них, композити на основі Policril 590 мають нижчий модуль пружності та меншу загальну пористість. Це пояснюється більшим розміром частинок полімеру, що сприяє формуванню щільнішої структури навколо частинок ЧШ і частковому блокуванню пор. Максимальне значення модуля пружності для цієї системи становить лише 13,3 МПа при 90 мас.% ЧШ, що вказує на обмежену жорсткість, але водночас підвищену щільність структури.

Оптичний аналіз підтвердив структурні зміни зі збільшенням концентрації ЧШ, зокрема збільшення загальної та відкритої пористості, яка стає менш вираженою на макрорівні через утворення дрібних мікропор. Аналіз ізотерм адсорбції азоту показав мезопористий характер композитів. Отримані результати свідчать про значний потенціал регулювання пористості та механічних властивостей композитів через вибір типу полімерної матриці та концентрації наповнювача, що дозволяє адаптувати матеріали для конкретних промислових потреб.

Ключові слова: полімерний композит, наповнювач, червоний шлам, латекс, модуль пружності, структура, пористість.

L. I. MELNYK

PhD, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Chemical Technology
of Composite Materials
National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
ORCID: 0000-0001-5139-3105

O. M. SHNYRUK

Assistant at the Department of Chemical Technology of Composite Materials
National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
ORCID: 0000-0001-7840-6201

YU. S. YANCHUK

Student at the Department of Chemical Technology of Composite Materials
National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
ORCID: 0009-0002-0453-4213

POLYMER COMPOSITES USING RED MUD: STRUCTURE AND PROPERTIES

This article investigates the impact of the type of polymer binder and the concentration of red mud (RM) on the porous structure, sorption characteristics, and mechanical properties of polymer composites. Two types of polymers were used as binders: Latex 2012 with a particle size of 140 nm and Policril 590 with a particle size of 200 nm. It was found that the particle size of the polymer significantly influences the interaction between the filler and the matrix, as well as the structural characteristics of the composites. Composites based on Latex 2012 exhibit higher total porosity and sorption capacity due to the smaller polymer particle size, which allows for better pore accessibility and retention of the mesoporous structure. In these composites, the maximum modulus of elasticity reaches 93.5 MPa at an RM concentration of 85 wt.%, making the material promising for applications requiring high rigidity and sorption characteristics, such as in filtration and catalytic systems.

In contrast, composites based on Policril 590 have a lower modulus of elasticity and reduced total porosity. This is attributed to the larger polymer particle size, which forms a denser structure around the RM particles, partially blocking the pores. The maximum modulus of elasticity for this system is only 13.3 MPa at 90 wt.% RM, indicating limited rigidity but enhanced structural density.

Optical analysis confirmed structural changes with increasing RM concentration, specifically an increase in both total and open porosity, which becomes less pronounced at the macroscopic level due to the formation of fine micropores. Nitrogen adsorption isotherm analysis revealed the mesoporous nature of the composites. The obtained results demonstrate significant potential for controlling the porosity and mechanical properties of composites by selecting the type of polymer matrix and filler concentration, allowing for the adaptation of materials to specific industrial needs.

Key words: polymer composite, filler, red mud, latex, modulus of elasticity, structure, porosity.

Постановка проблеми

Полімерні композиційні матеріали (ПКМ) широко застосовуються завдяки можливості поєднувати переваги полімерної матриці та різноманітних наповнювачів, що дозволяє отримувати матеріали з унікальними фізико-механічними властивостями. Висока вартість композитів, однак, залишається значною перешкодою для їх поширеного використання. Тому одним із перспективних напрямів розвитку ПКМ є застосування доступних та дешевих наповнювачів, що дозволяє знизити загальні витрати на виробництво та зробити ці матеріали більш конкурентоспроможними.

Одним із таких наповнювачів є червоний шлам (ЧШ) – побічний продукт переробки бокситів у процесі Байєра. Цей матеріал накопичується у великих обсягах (до 30 мільйонів тон щорічно у світі) і становить серйозну екологічну проблему, зокрема через труднощі його утилізації.

Хімічний склад червоного шламу включає силікати та оксиди заліза, алюмінію, натрію, кальцію і титану, що зумовлює його потенціал для повторного використання. Незважаючи на сприйняття червоного шламу як відходу, значний вміст заліза та алюмінію робить його цінним сировинним ресурсом, який можна використовувати у виробництві будівельних матеріалів, цементу, керамічних виробів, а також як наповнювач для композитних матеріалів [1].

Крім економічних переваг, використання червоного шламу у складі полімерних композитів може сприяти екологічній безпеці. Тести на вилуговування та еко-токсикологічні дослідження вказують на низьку токсичність червоного шламу як до, так і після його вторинного використання, що дозволяє вважати цей матеріал перспективним для інтеграції у різноманітні екологічно чисті технологічні процеси.

З огляду на вищезазначене, дослідження з використання червоного шламу як наповнювача в полімерних композитах є актуальним як з економічної, так і з екологічної точки зору. Вивчення його властивостей та можливостей використання в полімерних композиційних матеріалах на основі водних дисперсій полімерів сприятиме розвитку технологій переробки цього вторинного ресурсу та відкриватиме нові напрямки у створенні екологічно чистих та економічно вигідних композитних матеріалів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Сучасні численні дослідження підтверджують, що введення червоного шламу як наповнювача в полімерні композити може значно покращити їхні функціональні властивості. Зокрема, Chen та співавтори [2] у своїй роботі дослідили використання червоного шламу разом із кокосовим волокном у поліефірній смолі, акцентуючи на екологічну проблему утилізації червоного шламу, побічного продукту при виробництві глинозему. Їх результати продемонстрували, що додавання червоного шламу до композиту підвищує його твердість і щільність, хоч і зменшує еластичність. Це свідчить про перспективу використання червоного шламу для створення композитних матеріалів у будівництві, зокрема для легких конструкцій, завдяки високій щільності та твердості.

У роботі Wang та співавторів [3] розглянуто потенціал використання червоного шламу та інших промислових відходів, таких як зола й кислотний шлак, як наповнювачів для полімерних композитів на основі поліпропілену. Автори зазначають, що підготовка червоного шламу через його дезактивацію та застосування модифікуючого агента забезпечує оптимальний рівень адгезії з полімерною матрицею, що суттєво підвищує механічні та термічні властивості композиту. Досягнутий лімітний кисневий індекс (близько 27 %) свідчить про підвищені вогнезахисні властивості таких матеріалів.

Hendricks та Buchanan [4] досліджували вплив вмісту червоного шламу на механічні характеристики полімерних композитів на основі поліетилену високої щільності. Було встановлено, що додавання до 10 мас.% червоного шламу підвищує жорсткість композиту, однак подальше збільшення вмісту призводить до зниження його міцності. Це зумовлено порушенням зв'язку між наповнювачем та полімером, особливо при надмірній концентрації червоного шламу, що підвищує ризик утворення пор у структурі.

Значну увагу в наукових дослідженнях приділяють також підготовці червоного шламу для підвищення його сумісності з полімерною матрицею. Так, Bhat та колеги [5] розробили методику хімічної модифікації червоного шламу з використанням борної та фосфомолібденової кислот, що дозволяє підвищити адгезію між полімером і наповнювачем. За допомогою цієї методики частинки червоного шламу стають більш хімічно активними, що сприяє ефективнішому їх включенню до складу композиту. Іншим ефективним підходом є органічна модифікація шламу, яка передбачає взаємодію із аніліном та формальдегідом, що також підвищує його адгезійні властивості завдяки утворенню олігомерів.

На основі проведених досліджень можна зробити висновок, що додавання червоного шламу у полімерні композити дозволяє досягти значних покращень термічної стабільності, механічної жорсткості, вогнезахисних властивостей та щільності композитних матеріалів. Однак ці переваги можуть проявлятися тільки при оптимальних концентраціях та відповідній хімічній підготовці шламу.

Формулювання мети дослідження

Під час розробки наповнювачів різного походження виникає можливість комплексного вирішення завдань якості композитів та збереження ресурсів. Проте виготовлення нових видів наповнювачів потребує уважного врахування особливостей їхнього фізико-хімічного складу, який впливає на характеристики систем та властивості композиційного матеріалу. Це є головною метою даної роботи у контексті композитів на основі андезиту з полімерним зв'язуючим.

Викладення основного матеріалу дослідження

У цьому дослідженні було проаналізовано полімерні композити на основі водних дисперсій сополімерів із додаванням відходів червоного шламу як наповнювача. Використовувався червоний шлак від ПАТ «Запорізький алюмінієвий комбінат» (Україна), який відзначається високим вмістом Fe_2O_3 , TiO_2 та сумарним вмістом лужноземельних і лужних оксидів ($\text{RO}+\text{R}_2\text{O}$) на рівні 8,62 мас.%. Детальний хімічний і мінералогічний склад шламу в наших попередніх роботах [6].

Полімерною матрицею слугували водні дисперсії бутадієн-стирольного сополімеру Latex 2012 та полімеру Policril 590, властивості яких були предметом дослідження в наших попередніх роботах [7], а технологічний процес виготовлення зразків описано в [8].

Для аналізу отриманих композитів використовували широкий спектр фізико-хімічних методів. Огляд поверхні зразків проводили за допомогою оптичного мікроскопа з цифровою камерою H5D (Delta Optical, Китай) та програмного забезпечення «ScoreTek View» 1.0.0.1 (ScoreTek Optics Electronics, Китай). Пористі характеристики зразків визначали методом адсорбції-десорбції азоту (N_2) при -196°C на приладі Quantachrome NOVA-2200e (США). Специфічну площу поверхні (SoBET , m^2/g) розраховували багаточисловим методом BET [9], а загальний об'єм пор (VoP , cm^3/g) обчислювали за максимальним об'ємом адсорбованого азоту при відносному тиску $P/P_0 \approx 0,99$. Об'єм мікропор (Vm , cm^3/g) визначали за допомогою методу t-plot, з подальшим розрахунком відсоткового вмісту мікропор.

Абразивну стійкість зразків оцінювали згідно з ДСТУ Б.В.2.7-212:2009, використовуючи круг стирання типу Беме. Механічні властивості визначали шляхом аналізу діаграм "деформація-навантаження" під час одночасного стиснення на установці ІМАШ-20-78 з аналого-цифровим перетворювачем (АЦП) та ПК при кімнатній температурі у вакуумі 10^{-5} Торр [10].

У ході дослідження було вивчено вплив типу полімерного зв'язуючого та концентрації червоного шламу на пористу структуру та сорбційні характеристики композитів. Зокрема, важливими параметрами є питома поверхня, загальний об'єм пор, середній розмір пор, водопоглинання, загальна та відкрита пористість, а також густина композитів (табл. 1).

Приведені дані свідчать, що при збільшенні концентрації червоного шламу з 65 до 90 мас.% у матрицях як з Policril 590, так і з Latex 2012, відбувається збільшення водопоглинання, відкритої та загальної пористості. Наприклад, для композитів з Policril 590 водопоглинання зростає від 2,53 % при 65 мас.% до 3,62 % при 90 мас.%, а загальна пористість збільшується з 15,97 % до 51,59 %. Для композитів з Latex 2012 водопоглинання збільшується з 5,96 % до 10,05 %, а загальна пористість з 10,46 % до 47,56 % зі зростанням концентрації червоного шламу.

Таке збільшення пористості може бути пов'язане зі зростанням частки наповнювача в системі, що призводить до утворення більшої кількості міжчасткових пор. Однак, при цьому спостерігається зростання густини композитів зі збільшенням вмісту шламу, що можна пояснити більшою щільністю частинок червоного шламу порівняно з полімерною матрицею.

Таблиця 1

Склад і властивості композиційного матеріалу

| Наповнювач | Зв'язуюче | Концентрація, мас.% | Водопоглинання через 24 год, % | Відкрита пористість, % | Загальна пористість, % | Середня густина, г/см ³ |
|---------------|--------------|---------------------|--------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------------------|
| Червоний шлам | Policril 590 | 65 | 2,53 | 4,09 | 15,97 | 1,62 |
| | | 75 | 2,60 | 4,57 | 28,91 | 1,76 |
| | | 85 | 2,79 | 5,92 | 45,49 | 2,12 |
| | | 90 | 3,62 | 8,33 | 51,59 | 2,30 |
| | Latex 2012 | 65 | 5,96 | 9,07 | 10,46 | 1,52 |
| | | 75 | 8,64 | 15,23 | 29,17 | 1,76 |
| | | 85 | 9,40 | 18,38 | 40,84 | 1,95 |
| | | 90 | 10,05 | 21,37 | 47,56 | 2,13 |

Оптичний аналіз (рис. 1) демонструє структурні відмінності між композитами з різними концентраціями червоного шламу та типами зв'язуючого. Зображення показують, що при низькій концентрації шламу (65 мас.%) композити мають виражену пористу структуру з помітними відкритими порами, тоді як при вищих концентраціях (85 мас.%) спостерігається більш щільна структура з меншою кількістю великих пор, за рахунок більш щільного пакування частинок червоного шламу. Це узгоджується з даними із таблиці 1, де загальна та відкрита пористість зростають зі збільшенням концентрації шламу, проте оптичний аналіз показує, що пори стають менше вираженими макроскопічно, ймовірно, за рахунок утворення дрібних мікропор.

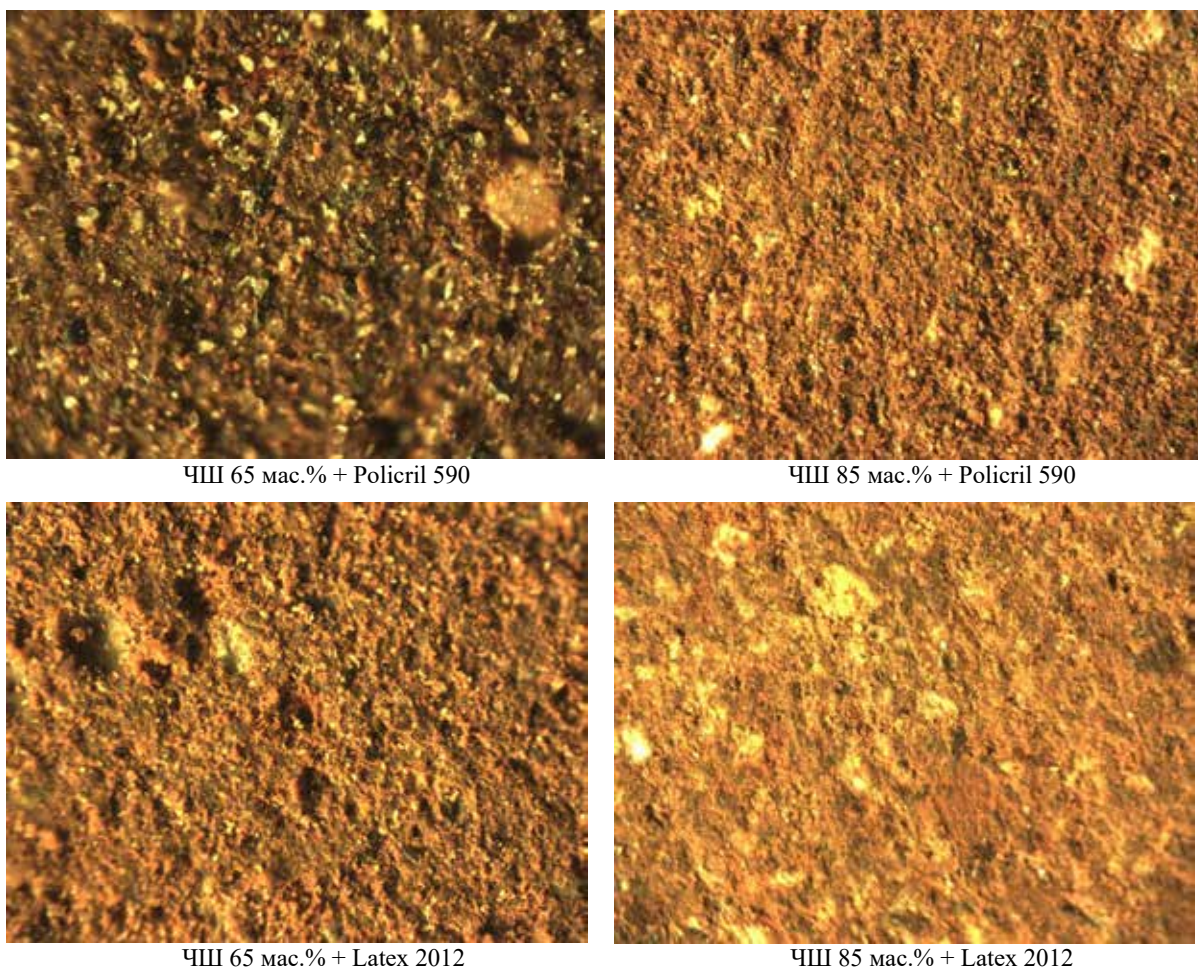


Рис. 1. Оптичний аналіз порової структури композитів

Червоний шлам як самостійний компонент має високу питому поверхню 19,63 м²/г (табл. 2) і відносно низький загальний об'єм пор 10,00 × 10⁻³ см³/г, що свідчить про його природну мікропористу структуру.

Таблиця 2

Характеристика порової структури

| Зразки | Питома поверхня BET, м ² /г | Загальний об'єм пор при P/P ₀ = до 1, см ³ /г | Середній розмір пор, нм |
|-------------------|--|---|-------------------------|
| ЧШ | 19,63 | 10,00*10 ⁻³ | 2,29 |
| ЧШ + Policril 590 | 6,83 | 12,64*10 ⁻³ | 3,56 |
| ЧШ + Latex 2012 | 1,97 | 24,22 *10 ⁻³ | 3,88 |

Введення червоного шламу у полімерні матриці призводить до значних змін у цих характеристиках, що підтверджується даними табл. 2. У композиті з Latex 2012 загальний об'єм пор зростає до 24,22 × 10⁻³ см³/г, тоді як у Policril 590 він досягає 12,64 × 10⁻³ см³/г. Це свідчить про різну взаємодію між частинками червоного шламу та полімерною матрицею в залежності від типу полімеру, що, у свою чергу, впливає на пористість і доступність поверхні композиту.

Ізотерми адсорбції азоту (рис. 2) підтверджують мезопористу структуру композитів і показують, що композити з Latex 2012 мають вищу сорбційну здатність і розвиненішу пористу структуру порівняно з системами на основі Policril 590. Гістерезисні петлі на ізотермах свідчать про мезопористий характер цих матеріалів, проте у системі з Latex 2012 спостерігається більший загальний об'єм мезопор, що відповідає збільшенню сорбційної здатності.

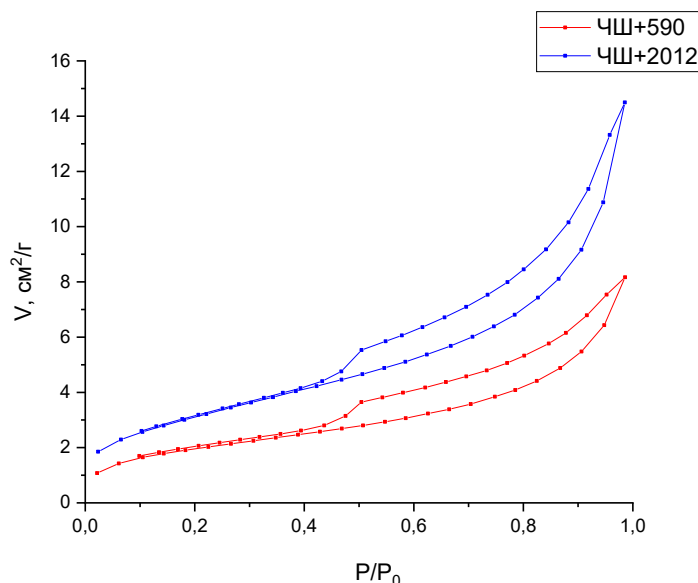


Рис. 2. Ізотерми сорбції азоту (N₂) для систем з використанням ЧШ

Це також підтверджується даними розподілу пор за радіусом (рис. 3): композити з Latex 2012 мають більш виражену кількість пор у діапазоні 2-4 нм, що забезпечує збільшення загального об'єму пор.

Це пов'язано з меншим розміром частинок полімеру в дисперсії Latex 2012 (140 нм), що сприяє кращому заповненню міжчасткових просторів без повного блокування пористої структури. Для Policril 590, з більшим розміром частинок (200 нм), спостерігається щільніше покриття частинок червоного шламу, що частково блокує пори та призводить до зменшення загального об'єму пор та питомої поверхні.

Результати аналізу порової структури композитів показують їх суттєвий вплив і на механічні властивості, що підтверджується значеннями модуля пружності який є показником жорсткості матеріалів (рис. 4).

Як видно з графіку для композитів з Latex 2012 спостерігається значно вищий модуль пружності з максимумом при 85 мас.% ЧШ і складає 93,5 МПа. Це можна пояснити тим, що в системі з Latex 2012, завдяки меншому розміру частинок полімеру (140 нм), забезпечується кращий розподіл наповнювача та утворення щільнішої матриці, що підвищує жорсткість композиту. Однак, при концентрації 90 мас.% ЧШ модуль пружності знижується, що, ймовірно, пов'язано з недостатньою зв'язністю частинок ЧШ звязуючим.

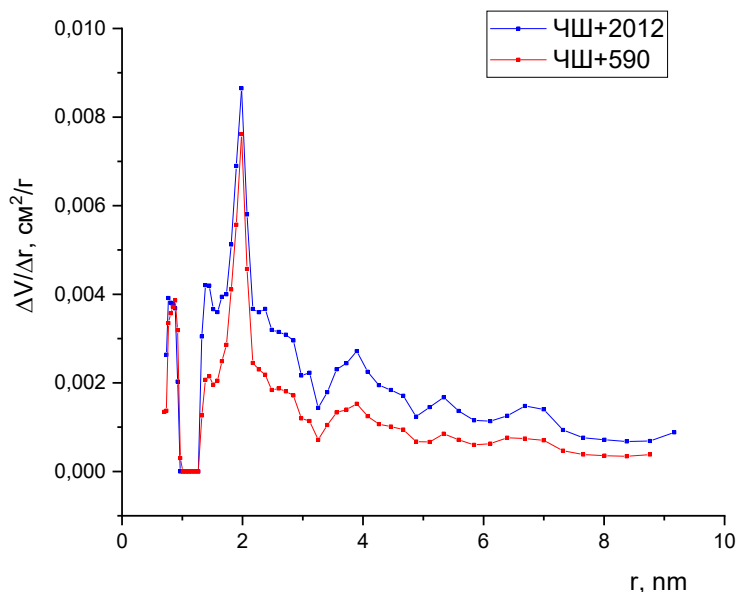


Рис. 3. Розподіл пор за радіусом для систем з використанням ЧШ

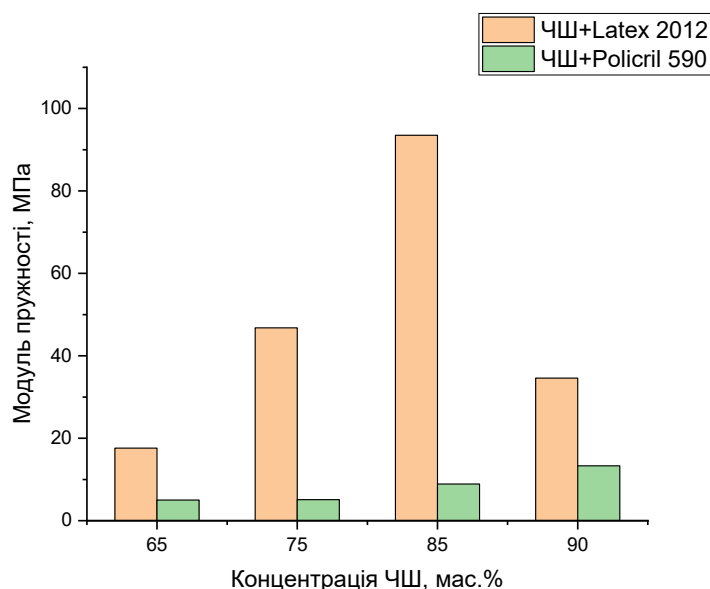


Рис. 4. Залежність модуля пружності від концентрації червоного шלאму

Композити на основі Policril 590 демонструють нижчий модуль пружності на всьому діапазоні концентрацій ЧШ порівняно з Latex 2012. Це, можливо, пов'язано з тим, що більший розмір частинок полімеру в Policril 590 (200 нм) призводить до менш щільного заповнення пор та формування пористішої структури з меншою кількістю зв'язків між наповнювачем та полімерною матрицею. Це зменшує жорсткість матеріалу, і як наслідок – модуль пружності. Максимальне значення цього показника для композитів з Policril 590 складає 13,3 МПа, а при оптимальній концентрації 85 мас.% модуль пружності для систем з Latex 2012 в 10,5 рази перевищує значення для системи з Policril 590.

Таким чином, пориста структура досліджених композитів значно впливає на модуль пружності. Композити з Latex 2012 мають більш розвинену пористість, але в межах концентрації 85 мас.% ЧШ це забезпечує оптимальну жорсткість завдяки щільному розподілу полімеру і наповнювача.

Висновки

1. Дослідження показало, що тип полімерного зв'язуючого (Latex 2012 або Policril 590) та концентрація червоного шלאму значно впливають на пористу структуру та фізико-хімічні властивості полімерних композитів.

2. Композити з Latex 2012, завдяки меншому розміру частинок полімеру (140 нм), демонструють вищу загальну пористість і збереження мезопористої структури. Це призводить до покращених сорбційних властивостей

і вищого модуля пружності, який досягає максимуму при концентрації 85 мас.% ЧШ (93,5 МПа), що робить ці композити перспективними для застосувань, де важливі сорбційні характеристики та жорсткість.

3. Композити на основі Policril 590, з більшим розміром частинок полімеру (200 нм), формують більш щільну структуру навколо частинок червоного шламу, що частково блокує пори. Це призводить до зниження загальної пористості та модуля пружності, який є значно нижчим порівняно з системою UCAR Latex 2012. Максимальне значення модуля пружності для цих композитів становить 13,3 МПа при 90 мас.% ЧШ.

Список використаної літератури

1. Grjotheim K., Welch B.J. Aluminium Smelter Technology: A Pure and Applied Approach, 2nd ed. Verlag: Dusseldorf. 1998.
2. Chen Y., Li A., Jiang S. Wettability and Mechanical Properties of Red Mud- Al_2O_3 Composites. *Materials*. 2024. Vol. 17. № 5. P. 1095. <https://doi.org/10.3390/ma17051095>.
3. Wang X., Zhang N., Zhang Y., Liu J., Wang C., Chu, P.K. Composite plates utilizing dealcalized red mud, acid leaching slag and dealcalized red mud-fly ash: Preparation and performance comparison. *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 261. P. 120495. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120495>
4. Hendricks H. L., Buchanan V. E. Effect of material parameters on the mechanical properties of chemically treated red mud HDPE composites. *Polymers and Polymer Composites*. 2020. P. 096739112095406. <https://doi.org/10.1177/0967391120954064>.
5. Bhat A. H., Abdul H. P. S., & K. A. Thermoplastic Polymer based Modified Red Mud Composites Materials. *Advances in Composite Materials – Ecodesign and Analysis*. InTech, 2011. <https://doi.org/10.5772/14377>.
6. Мельник Л.І. Композит на основі систем сополімер – червоний шлам. *Modern science: challenges of today: Collective monograph*. Bratislava, Slovakia, 2023, С. 6-38. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/67229>.
7. Melnyk L.I., Cherniak L.P., Yevpak V.V. Composites based on fly ash with different polymer matrixes. *Scientific notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences*. 2024. Vol. 2. № 1. P. 106-112. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.1.2/18>.
8. Melnyk L. Formation of composite with variation of dispersity of filler and type of binder. *Technical sciences and technologies*. 2024. Vol. 1. № 35. P. 198-203. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-1\(35\)-198-203](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-1(35)-198-203).
9. Brunauer S., Emmett P.H., Teller E. Adsorption of gases in multimolecular layers. *Journal of the American Chemical Society*. 1938. Vol. 60. № 2. P. 309. <https://doi.org/10.1021/ja01269a023>.
10. Vovchenko L.L., Matzui L.Y., Zhuravkov A.V., Samchuk A.P. Electrical resistivity of compacted TEG and TEG-Fe under compression. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 2006. Vol. 67. № 5-6. P. 1168-1172. <https://doi.org/10.1016/j.jpics.2006.01.042>.

References

1. Grjotheim, K., & Welch, B.J. (1998). Aluminium Smelter Technology: A Pure and Applied Approach, 2nd ed. Verlag: Dusseldorf.
2. Chen, Y., Li, A., & Jiang, S. (2024). Wettability and Mechanical Properties of Red Mud- Al_2O_3 Composites. *Materials*. 17(5), 1095. <https://doi.org/10.3390/ma17051095>.
3. Wang, X., Zhang, N., Zhang, Y., Liu, J., Wang, C., & Chu, P.K. (2020). Composite plates utilizing dealcalized red mud, acid leaching slag and dealcalized red mud-fly ash: Preparation and performance comparison. *Construction and Building Materials*. 261, 120495. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120495>
4. Hendricks, H.L., & Buchanan, V.E. (2020). Effect of material parameters on the mechanical properties of chemically treated red mud HDPE composites. *Polymers and Polymer Composites*, 096739112095406. <https://doi.org/10.1177/0967391120954064>.
5. Bhat, A. H., Abdul, H. P. S., & K., A. (2011). Thermoplastic Polymer based Modified Red Mud Composites Materials. *Advances in Composite Materials – Ecodesign and Analysis*. InTech. <https://doi.org/10.5772/14377>.
6. Melnyk, L.I. (2023). Composite based on copolymer systems – red mud. *Modern science: challenges of today: Collective monograph*. Bratislava, Slovakia. 6-38. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/67229>.
7. Melnyk, L.I., Cherniak, L.P., & Yevpak, V.V. (2024). Composites based on fly ash with different polymer matrixes. *Scientific notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences*. 2(1), 106-112. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.1.2/18>.
8. Melnyk L. (2024). Formation of composite with variation of dispersity of filler and type of binder. *Technical sciences and technologies*. 1(35), 198-203. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-1\(35\)-198-203](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-1(35)-198-203).
9. Brunauer, S., Emmett, P.H., & Teller, E. (1938). Adsorption of gases in multimolecular layers. *Journal of the American Chemical Society*. 60(2), 309. <https://doi.org/10.1021/ja01269a023>.
10. Vovchenko, L.L., Matzui, L.Y., Zhuravkov, A.V., & Samchuk, A.P. (2006). Electrical resistivity of compacted TEG and TEG-Fe under compression. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 67(5-6), 1168-1172. <https://doi.org/10.1016/j.jpics.2006.01.042>.