

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

Є. А. КОЛОБОВНИКОВА

студентка кафедри хімічної технології композиційних матеріалів
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0009-0002-9645-8114

ПОЛІМЕРНІ КОМПОЗИТИ З ВИКОРИСТАННЯМ ВІДСІВІВ АНДЕЗИТУ: СТРУКТУРНІ ТА МЕХАНІЧНІ АСПЕКТИ

У даній роботі досліджували полімерні композиційні матеріали на основі відсівів андезиту – мінерального наповнювача, що утворюється як побічний продукт видобутку вулканічних порід та водних дисперсій полімерів, таких як акрилова Policril 590 і бутадієн-стирольна Latex 2012, що використовуються як матриця. Метою роботи було вивчення впливу андезиту на фізико-механічні властивості композитів за умов високого вмісту мінерального наповнювача. Основну увагу приділено аналізу взаємодії між полімерною матрицею і наповнювачем, що дозволило детально дослідити процеси формування порової структури матеріалів.

Дослідження показало, що використання різних типів полімерних зв'язуючих дає можливість ефективно керувати властивостями матеріалів, змінюючи їх водопоглинання, пористість та механічні характеристики. Встановлено, що водопоглинання варіюється в межах від 2,2 до 6,4 % залежно від типу полімерного зв'язуючого та концентрації наповнювача. Відкрита пористість матеріалів коливалася від 3,14 до 12,34 %, що дозволяє контролювати внутрішню структуру композитів під різні сфери використання. Модуль Юнга також зазнавав значних змін і варіювався від 2,5 до 56,6 МПа, що свідчить про можливість регульованої зміни жорсткості композитів залежно від складу. Так використання Policril 590 забезпечувало меншу жорсткість та більшу пластичність, тоді як Latex 2012 демонстрував вищу жорсткість та менше водопоглинання. При максимальній концентрації наповнювача (90 мас.%) з використанням Latex 2012 композит досягав модуля Юнга 56,6 МПа, що значно перевищувало показники аналогічного композиту при заміні зв'язуючого на Policril 590, де цей показник становив 14,1 МПа.

Отримані результати дозволяють ефективно керувати структурою композитів і їхніми фізико-механічними властивостями через варіювання концентрації наповнювача та типу полімерної матриці.

Ключові слова: композит, наповнювач, андезит, латекс, склад, структура, пористість.

L. I. MELNYK

PhD,
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

Y. A. KOLOBOVNIKOVA

Student at the Department of Chemical Technology of Composite Materials

National Technical University of Ukraine

"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

ORCID: 0009-0002-9645-8114

POLYMER COMPOSITES USING ANDESITE FIVES: STRUCTURAL AND MECHANICAL ASPECTS

In this work, polymer composite materials based on andesite screenings – a mineral filler formed as a by-product of volcanic rock mining and water dispersions of polymers, such as acrylic Policril 590 and butadiene-styrene Latex 2012, used as a matrix – were studied. The aim of the work was to study the influence of andesite on the physical and mechanical properties of composites under the conditions of a high content of mineral filler. The main attention was paid to the analysis of the interaction between the polymer matrix and the filler, which made it possible to investigate in detail the processes of formation of the pore structure of materials.

The study showed that the use of different types of polymer binders makes it possible to effectively control the properties of materials by changing their water absorption, porosity and mechanical characteristics. It was established that the water absorption varies from 2,2 to 6,4% depending on the type of polymer binder and the concentration of the filler. The open porosity of the materials ranged from 3,14 to 12,34%, which makes it possible to control the internal structure of composites for different areas of use. The Young's modulus also underwent significant changes and varied from 2,5 to 56,6 MPa, which indicates the possibility of an adjustable change in the stiffness of the composites depending on the composition. Thus, the use of Policril 590 provided lower stiffness and greater plasticity, while Latex 2012 showed higher stiffness and less water absorption. At the maximum concentration of the filler (90 wt.%) with the use of Latex 2012, the composite reached a Young's modulus of 56,6 MPa, which significantly exceeded the indicators of a similar composite when the binder was replaced with Policril 590, where this indicator was 14,1 MPa.

The obtained results make it possible to effectively control the structure of composites and their physical and mechanical properties by varying the concentration of the filler and the type of polymer matrix.

Key words: composite, filler, andesite, latex, composition, structure, porosity.

Постановка проблеми

У сучасному світі постійно зростає попит на матеріали з підвищеними показниками ефективності, екологічності та інноваційності. У цьому контексті полімерні композиційні матеріали (ПКМ) стають все більш актуальними завдяки їх унікальному поєднанню властивостей, таких як легкість, міцність, стійкість до корозії та хімічних впливів. Проте процес удосконалення ПКМ стикається з певними труднощами, серед яких – необхідність зниження ваги, поліпшення теплоізоляційних властивостей та зменшення негативного впливу на довкілля під час виробництва.

Перспективним шляхом вирішення цих завдань є залучення природних матеріалів. Полімерні матриці можуть бути представлені різноманітними полімерними матеріалами: термопластами, реактопластами або еластомерами [1]. Попри численні переваги полімерної матриці, такі як простота формування, низьке енергоспоживання у процесі виготовлення ПКМ, відмінні структурні властивості та довговічність, основна проблема полягає в тому, що більшість цих матеріалів є розчинними в органічних розчинниках, що створює загрозу для довкілля через викиди парникових газів. У зв'язку з цим, використання вододисперсійних полімерних матриць (ВДПМ) стає перспективним напрямком завдяки ряду переваг. Найважливіша з них – це зниження викидів летких органічних сполук, що робить ВДПМ більш екологічною та безпечною альтернативою для створення ПКМ. Крім того, процес змішування ВДПМ з іншими компонентами ПКМ є простим і тверднення відбувається за кімнатної температури, що забезпечує економію енергії.

Що стосується наповнювачів, використання природних компонентів є перспективним шляхом до створення біокомпозитів, які допомагають вирішити екологічні проблеми на етапах виробництва та експлуатації. Згідно з сучасними уявленнями в матеріалознавстві, взаємозв'язок між складом, структурою та властивостями композитів є ключовим фактором, що визначає їх характеристики. Ці показники залежать від типу наповнювача та матриці, технології виготовлення та параметрів процесу. Ступінь взаємодії компонентів, їх концентрація та рівномірність розподілу в об'ємі впливають на структуру, загальні фізико-механічні та спеціальні властивості композитів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Як дисперсні наповнювачі, зазвичай застосовують природні матеріали, такі як крейда, каолін і графіт. Однак, останнім часом зростає інтерес до вивчення і використання супутніх продуктів видобутку нерудних матеріалів [2, 3]. Особливої уваги набули дослідження, що стосуються застосування вулканічних порід, таких як андезит, який поширений як у світі, так і в Україні [4].

У дослідженні [5] частинки андезиту були інтегровані в поліпропіленову матрицю для оцінки їхнього впливу на механічні й термічні властивості композиту. Результати показали помітне підвищення твердості, термічної стабільності та міцності на розрив, хоча андезит надав жорсткості композиту.

У роботі [6] досліджували андезит як наповнювач для епоксидних композитів. Було встановлено, що додавання андезиту не лише покращує міцність на розрив та зносостійкість, а й підвищує термічну стабільність композиту, особливо коли частинки добре дисперговані в епоксидній матриці.

Дослідники [7] вивчали вплив андезиту на композити на основі каучуку. Було виявлено, що андезит суттєво підвищив стійкість до стирання, що робить такі композити придатними для використання в автомобільній промисловості, зокрема для виготовлення шин. Крім того, андезит забезпечив хімічну стійкість, що продовжило термін служби композиту в агресивних умовах.

У дослідженні [8] було запропоновано модифікацію поверхні андезиту силанами. Автори підкреслили, що функціоналізація таким чином поверхні андезиту значно покращила розподілення часток наповнювача в полімерній матриці та покращила їх взаємодію, що призвело до підвищення механічних характеристик композиту та зменшення його крихкості.

Застосування наповнювачів різного походження дозволяє комплексно вирішувати питання якості композитів та економії ресурсів. Водночас при розробці нових наповнювачів важливо враховувати їхній фізико-хімічний склад, адже це суттєво впливає на кінцеві властивості композитів.

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

Об'єктом даного дослідження стали композиційні матеріали на основі системи андезит – сополімер при підвищеному вмісті наповнювача концентрація якого змінювалась в межах 65–90 мас.%. Дослідження включали поєднання фізико-хімічних методів аналізу відсівів андезиту та композитів з його використанням. Зокрема, гранулометричний склад визначався за допомогою ситового аналізу; поверхню зразків аналізували за допомогою скануючого електронного мікроскопа JSM. ІЧ-спектри записувалися на спектрофотографі Specord IR-75 (виробництва Carl Zeiss, Німеччина); термічний аналіз з використанням дериватографа системи F. Paulik, I. Paulik, L. Erdey; абразивну стійкість за допомогою круга Беме; механічні властивості у відповідності до [9].

Технологія виготовлення композиту з використанням водних дисперсій стирол-бутадієнової марки Latex 2012 та акрилової марки Policril 590 як зв'язуючих, а також андезиту (Хустського кар'єру Закарпаття) як наповнювача описана в нашій попередній роботі [10]. Хімічний і мінералогічний склад поверхні, а також характеристики зв'язуючих матеріалів були детально описані в наших попередніх дослідженнях [11, 12].

Відсів андезиту, що використовувались в цьому дослідженні, відзначалися високим вмістом SiO_2 , а співвідношення $\text{SiO}_2:\text{Al}_2\text{O}_3$ складало 3,5. Оцінку енергетичного стану поверхні частинок андезиту проводили шляхом зчужування при натіканні полярною та неполярною рідинами (вода і ксилол) [13].

Отримані експериментальні дані (табл. 1) свідчать про те, що частинки андезиту краще змочуються полярною рідиною, демонструючи вищий коефіцієнт фільтрації, ніж при змочуванні неполярною. При цьому коефіцієнт ліофільності склав 1,97. Частинки відсівів андезиту мають розвинену поверхню, що складає 10,1 та 5,0 m^2/g відповідно по воді та ксилолу.

Таблиця 1

Властивості поверхні андезиту

Змочування при натіканні Коефіцієнт фільтрації, $\text{K} \cdot 10^{-6} \text{ cm}^3 \cdot \text{c} / \text{g}$		Коефіцієнт ліофільності	Питома ефективна поверхня, m^2/g		Умовний tg δ
вода	ксилол		вода	ксилол	
0,69	0,35	1,97	10,1	5,0	0,027
1,35	0,63				

Методом ІЧ-спектроскопічного аналізу, виявлено наявність простих сполук, функціональних груп і хімічних зв'язків (рис. 1). Найбільш значущими є коливання структуроутворюючих зв'язків Si–O–Si (діапазон коливань 913–1100 cm^{-1}) та зв'язків Si–O–Al з максимумом при 773 cm^{-1} .

Щодо адсорбованої води, найширший діапазон її хвильових чисел спостерігався в межах 3433–3560 cm^{-1} . Валентні коливання зв'язків C–H відмічені в інтервалі частот 2847–2980 cm^{-1} .

Смуга з максимумом при 3433 cm^{-1} асоціюється з валентними коливаннями O–H вільних силанольних або силандіольних груп, а смуга при 3560 cm^{-1} , ймовірно, відповідає за коливання, пов'язані з адсорбованою водою.

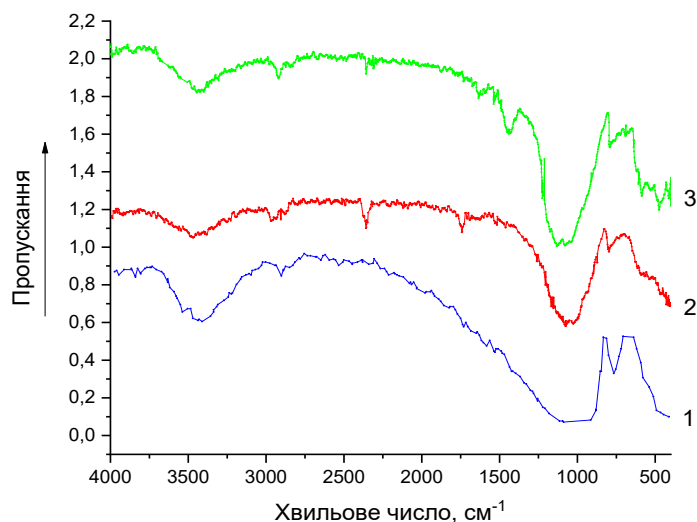


Рис. 1. ІЧ спектр систем: 1 – частинок відсівів андезиту, 2 – Policril 590 + андезит; 3 – Latex 2012 + андезит

Аналіз ДТА-ТГ відсівів природного андезиту показав втрату маси 4,4 %, інтенсивність якої припадає на температуру 100–750 °С, що відповідає виходу поверхневої та поглиненої води (рис. 2).

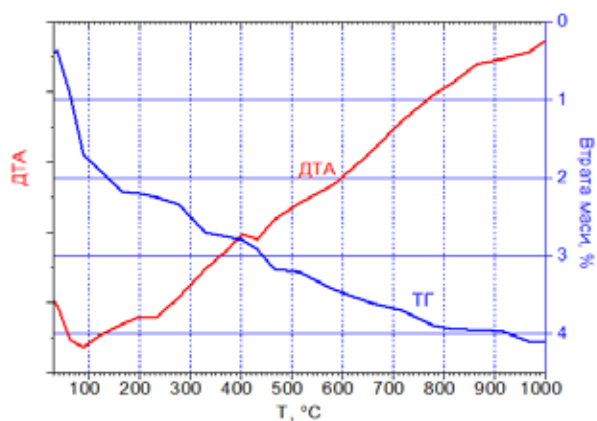


Рис. 2. ДТА-ТГ аналіз відсівів природного андезиту

Оскільки розмір і форма частинок наповнювача суттєво впливають на технологічні й експлуатаційні характеристики композитів, було проведено гранулометричний та електронно-мікроскопічний аналіз відсівів андезиту. Згідно з результатами досліджень (рис. 3), отримана крива розподілу частинок за розміром виявила бімодальний характер. Близько 5% частинок мають розмір менше 63 мкм, тоді як понад 40 % частинок мають діаметр більше 630 мкм.

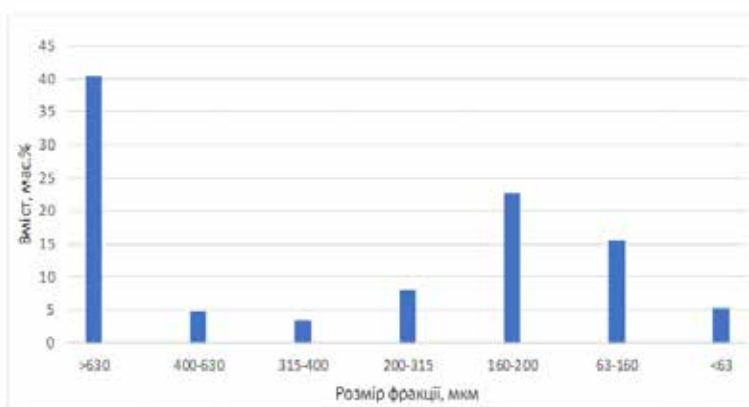


Рис. 3. Гранулометричний склад досліджуваного зразку андезиту

За даними електронної мікроскопії (рис. 4) частинки відсівів андезиту мають неправильну скольчатую форму, а їх розміри корелюються з наведеними даними гранулометрії. При цьому спостерігається певна кількість частинок, близьких до нанорозмірів.

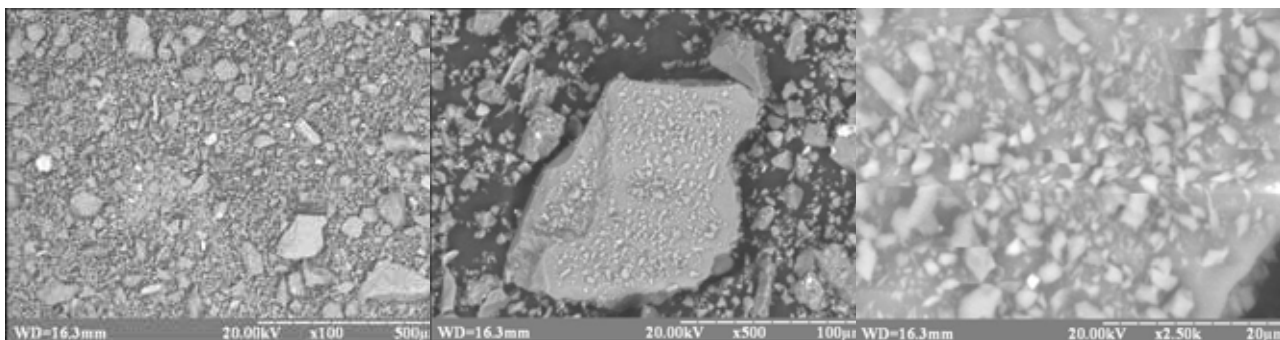


Рис. 4. Електронна мікроскопія зразку відсівів природного андезиту

Під час дослідження взаємодії між наповнювачем і зв'язуючим методом ІЧ-спектроскопії було враховано, що акрилова дисперсія Policril 590 має характерні смуги поглинання: при 1670 см^{-1} , що відповідає симетричним валентним коливанням $\text{C}=\text{O}$ у карбоксильній групі; при 1435 см^{-1} – вібраційним коливанням зв'язку $\text{C}=\text{C}$; при 1100 см^{-1} – коливанням зв'язку CH - [14]. У системі Policril 590 + андезит (рис. 1, крива 2) хід кривої більше відповідає кривій поглинання, характерній для андезиту, але з деякими відмінностями: з'явилася слабка смуга поглинання при 2250 см^{-1} , що відповідає зв'язку $\text{C}=\text{C}$, і при 1720 см^{-1} , що характерно для зв'язку $\text{C}=\text{O}$ у полімері. Проте інтенсивність цих смуг є незначною порівняно з вихідним Policril 590, а їхнє зміщення свідчить про наявність взаємодії у системі.

У дослідженнях композитів на основі бутадієн-стирольної дисперсії Latex 2012 (рис. 1, крива 3) враховано, що для Latex 2012 характерні смуги поглинання: при 2980 см^{-1} – для зв'язків CH - в ароматичному кільці; при 1525 см^{-1} – для самого кільця; при 2852 см^{-1} – для групи CH_2 ; і при 1500 см^{-1} – для подвійного зв'язку стиролу [14]. На отриманій кривій відмічено зниження інтенсивності піку при 2980 см^{-1} і зміщення піку при 1720 см^{-1} , що свідчить про міжмолекулярну взаємодію.

Використання методу повного термічного аналізу дозволило отримати більш детальні дані в поєднанні з ІЧ-спектроскопією щодо процесів взаємодії в системі Latex 2012 + андезит (рис. 5 а). Поєднання андезиту зі зв'язуючим суттєво змінює термічну поведінку системи. Дані диференційного термічного аналізу показують ендотермічні ефекти з максимумами при температурах 90, 120, 320 і $550\text{ }^\circ\text{C}$, що корелюються зі змінами маси (ТГ) і можуть бути пов'язані з видаленням води та структурними змінами органічних компонентів матриці. Загальна втрата маси системи склала 19,6 мас. %.

Для системи Policril 590 + андезит (рис. 5 б) загальна втрата маси склала 20,2 мас. %, що відповідає структурним змінам, які відбуваються під час нагрівання. Відзначено ендотермічні ефекти при температурах 150, 245, 420 та $570\text{ }^\circ\text{C}$.

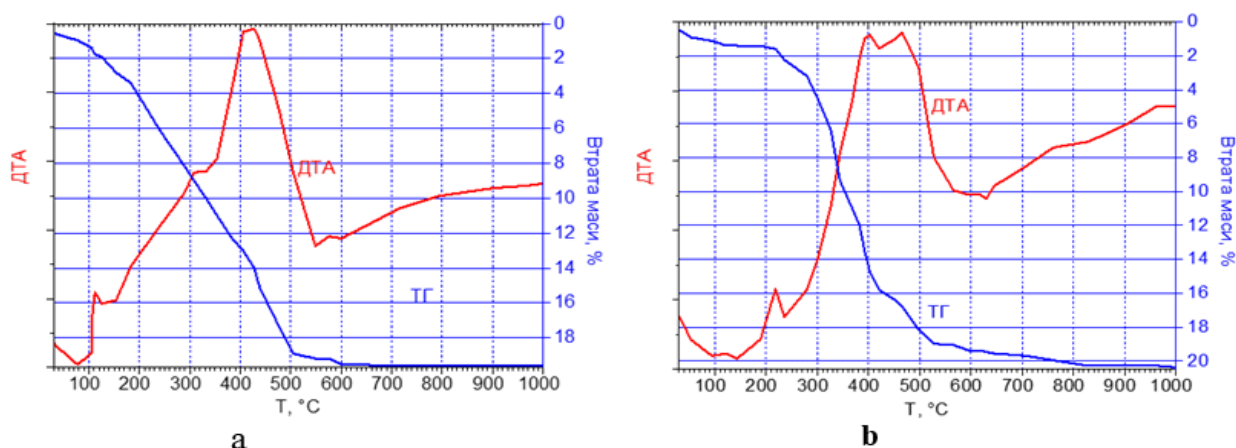


Рис. 5. ДТА-ТГ аналіз системи системи Latex 2012 + андезит (а), та Policril 590 + андезит (б)

Як свідчать результати випробувань показники фізико-механічних властивостей композиту суттєво залежать від концентрації наповнювача – андезиту: із її збільшенням спостерігається зростання водопоглинання та середньої густини. Разом із тим, ступінь зміни цих показників у вказаному інтервалі концентрацій наповнювача досить близькі: водопоглинання для системи Policril 590 + андезит зростає в 1,22 рази, а середня густина – в 1,45 рази. Для системи Latex 2012 + андезит цей приріст відповідно склав: 1,36 та 1,25 рази. Це вказує на деякі відмінності порової структури досліджуваних композитів.

Так, аналіз структури зразків показав (рис. 6), що при зміні співвідношення концентрацій наповнювача та зв'язуючого загальна пористість зростає для системи Policril 590 + андезит у 4,4 рази, для Latex 2012 + андезит у 2,3 рази. При цьому питома частка закритих пор збільшується з 6,8 до 38,2 % – в 5,7 рази для системи на основі Policril 590, для бутадієн-стирольної дисперсії частка закритих пор збільшується з 11,7 до 29,9 % – в 2,6 рази.

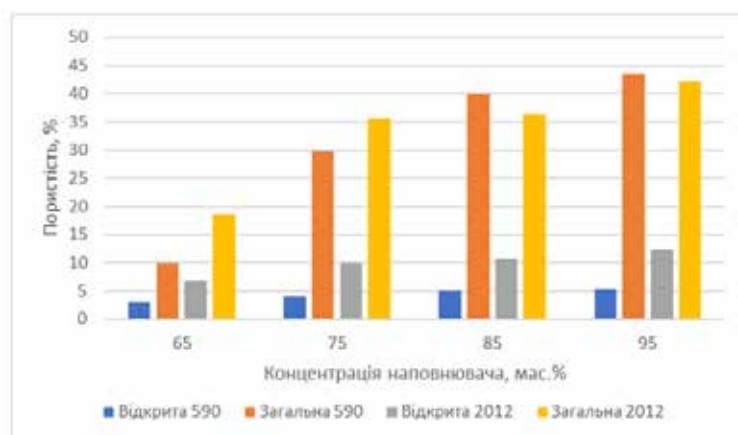


Рис. 6. Залежність пористості від концентрації андезиту (умовні позначення 590 – для системи на основі Policril 590; 2012 – для системи на основі Latex 2012)

Що стосується механічних властивостей, то вони суттєво залежать як від концентрації наповнювача так і густини композиту (рис. 7).

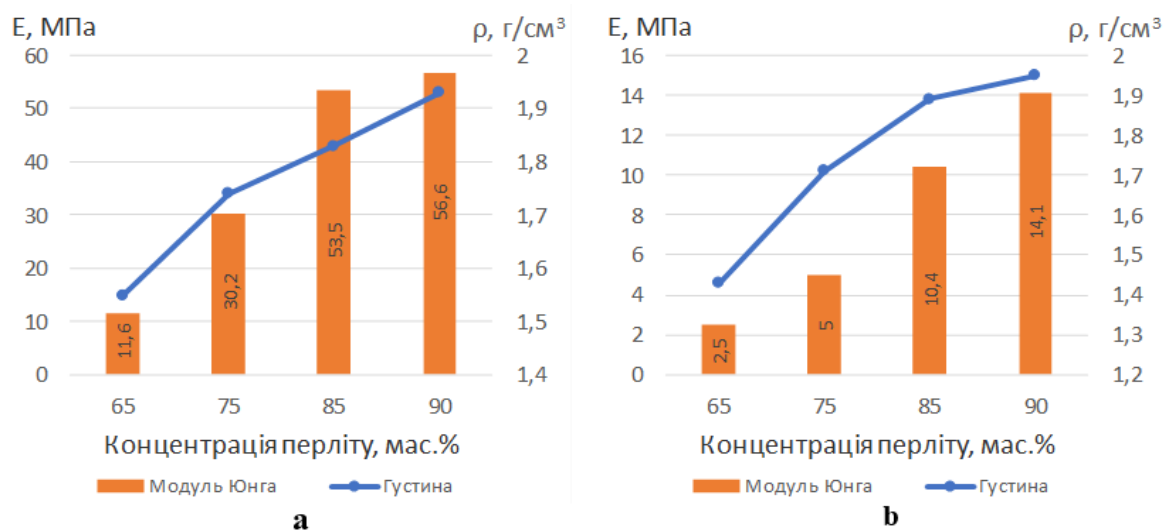


Рис. 7. Залежність густини та модуля Юнга від концентрації наповнювача для системи Latex 2012 + андезит (а), та Policril 590 + андезит (б)

Серед експлуатаційних характеристик досліджуваних композитів відзначаються показники стираності (не перевищують 0,09 г/см²), що вказують на підвищену абразивну стійкість матеріалу.

Висновки

1. У ході дослідження виявлено специфіку структурування полімерних композитів із застосуванням відсівів андезиту як наповнювача. Було проаналізовано зміну його концентрації в межах 65–90 мас. % при використанні бутадієн-стирольного сополімеру Latex 2012 та акрилової матриці Policril 590.

2. Проведено аналіз гранулометричних характеристик та форми частинок відсівів андезиту, та визначено ступінь їх ліофільності та енергетичний стан поверхні, що впливає на взаємодію з полімерною основою.

3. Окремо розглянуто процеси формування структури композитів та вивчено залежність їх фізико-механічних властивостей від концентрації наповнювача. Показано можливості підвищення міцності, деформаційної та абразивної стійкості створених матеріалів.

Список використаної літератури

1. Hamid Essabir, Marya Raji, Sana Ait Laaziz, Denis Rodrique, Rachid Bouhfid, Abou el Kacem Qaiss. Thermo-mechanical performances of polypropylene biocomposites based on untreated, treated and compatibilized spent coffee grounds. *Composites Part B: Engineering*. 2019. № 149. P. 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.05.020>.
2. Melnyk L. I., Chernyak L. P., Sviderskyi V. A., Dorogan N.A. Aspects of making of a composite material when using red mud. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol 2. № (6-92). P. 23-28. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.125702>.
3. Melnyk L., Myronyuk O., Ratushnyi V., Baklan D. The feasibility of using red mud in coatings based on glyptal. *French-Ukrainian Journal of Chemistry*. 2020. Vol. 08. P. 88-94. <https://doi.org/10.17721/fujcV8I1P88-94>.
4. Мельник Л. І., Черняк Л.П., Свідерський В.В. Особливості вулканічних порід як матеріалів для полімерних композитів. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2022. № 1. Т. 305. С. 14-19. <https://www.doi.org/10.31891/2307-5732-2022-305-1-14-19>.
5. Aydın M., et al. Effect of Andesite Powder on the Mechanical and Thermal Properties of Polypropylene Composites. *Journal of Materials Science*, 2017. Vol. 52. № 5, P.2351-2362.
6. Soydal Ulku, Kocaman Suheyla, Marti Mustafa Esen, Ahmetli Gulnare. Study on the reuse of marble and andesite wastes in epoxy-based composites. *Polymer Composites*. 2018. Vol. 39. № 9. P. 3081-3091, <https://doi.org/10.1002/pc.24313>.
7. Kumar S., Patel R. Abrasion Resistance of Rubber-Andesite Composites: Performance in Industrial Applications. *Elastomer Technology Journal*. 2020. Vol. 34. № 6. P. 89-97.
8. Nguyen H., Zhang T. Innovative Approaches in Andesite-Polymer Composite Fabrication. *Composite Materials Science*. 2022. Vol. 13. № 2. P. 278-287.
9. 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.jpcs.2006.01.042>.
10. 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).
11. Мельник Л.І., Черняк Л.П., Пахомова В.М., Шнирук О.М. Керамічний композит на основі вулканічних порід. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2023. Т. 34(73). № 2. С. 52-57. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.2.2/10>.
12. 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>.
13. Myronyuk O., Baklan D., Nudchenko L. Evaluation of the Surface Energy of Dispersed Aluminium Oxide Using Owens-Wendt Theory. *Technology Audit and Production Reserves*. 2020. Vol. 2. № 1(52). С. 25-27. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2020.200756>.
14. Liubov Melnyk1, Lev Chernyak1, Valentin Sviderskyi1, Ludmila Vovchenko, Viktoria Yevpak. Comparative Study of Various Volcanic Materials as Fillers in Polymer Composites. *Zastita Materijala*. 2024. Vol. 65. № 3. <https://doi.org/10.62638/ZasMat1171>.

References

1. Essabir, H., Raji, M., Laaziz, S. A., Rodrique, D., Bouhfid, R., & Qaiss, A. e. k. (2018). Thermo-mechanical performances of polypropylene biocomposites based on untreated, treated and compatibilized spent coffee grounds. *Composites Part B: Engineering*, vol. 149, pp. 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.05.020>.
2. Melnyk, L., Sviderskyi, V., Chernyak, L., & Dorogan, N. (2018). Aspects of making of a composite material when using red mud. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 2, № 6/92, pp. 23-28. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.125702>.
3. Melnyk, L., Myronyuk, O., Ratushnyi, V., & Baklan, D. (2020). The feasibility of using red mud in coatings based on glyptal resins. *French-Ukrainian Journal of Chemistry*, vol. 8, № 1, pp.88-94. <https://doi.org/10.17721/fujcV8I1P88-94>.
4. Melnyk L., Sviderskyi V., Chernyak L. (2022). Osoblyvosti vulkanichnykh porid yak materialiv dlia polimernykh kompozytiv. [Features of volcanic rocks as materials for polymeric cposites]. *Herald Of Khmelnytskyi National University*, vol. 305, № 1, pp. 14-19. (in Ukrainian). <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2022-305-1-14-19>.

5. Aydın, M., et al. (2017). Effect of Andesite Powder on the Mechanical and Thermal Properties of Polypropylene Composites. *Journal of Materials Science*, vol. 52, № 5, pp. 2351-2362.
6. Soydal, U., Kocaman, S., Esen Marti, M., & Ahmetli, G. (2017). Study on the reuse of marble and andesite wastes in epoxy-based composites. *Polymer Composites*, vol. 39, № 9, pp. 3081-3091. <https://doi.org/10.1002/pc.24313>.
7. Kumar, S., Patel, R. (2020). Abrasion Resistance of Rubber-Andesite Composites: Performance in Industrial Applications. *Elastomer Technology Journal*, vol. 34, № 6, pp. 89-97.
8. Nguyen, H., Zhang, T. (2022). Innovative Approaches in Andesite-Polymer Composite Fabrication. *Composite Materials Science*, vol. 13, № 2, pp. 278-287.
9. Vovchenko, L., Matzui, L., Zhuravkov, A., & Samchuk, A. (2006). Electrical resistivity of compacted TEG and TEG-Fe under compression. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, vol. 67, № 5-6, pp. 1168-1172. <https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2006.01.042>.
10. Melnyk, L. (2024b). Formation of composite with variation of dispersity of filler and type of binder. *Technical sciences and technologies*, vol. 1, № 35, pp. 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).
11. Chernyak, L. P., Melnyk, L. I., Pakhomova, V. M., & Shnyruk, O. M. (2023). Keramichniy kompozyt na osnovi vulkanichnykh porid. [Ceramic composite based on volcanic rocks]. *Scientific notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences*, vol. 2, № 2, pp. 52-57. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.2.2/10>.
12. 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*, vol. 2, № 1, pp. 106-112. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.1.2/18>.
13. Myronyuk, O., Baklan, D., & Nudchenko, L. (2020). Evaluation of the surface energy of dispersed aluminium oxide using owens-wendt theory. *Technology audit and production reserves*, vol. 2, № 1/52, pp. 25-27. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2020.200756>.
14. Melnyk, L., Chernyak, L., Svidersky, V., Vovchenko, L., & Yevpak, V. (2024). Comparative study of various volcanic materials as fillers in polymer composites. *Zastita Materijala*. <https://doi.org/10.62638/zasmat1171>.