

П.П. Мельничук, д.т.н., проф.
О.Л. Мельник, асист.

Житомирський державний технологічний університет

ВПЛИВ НЕІОНОГЕННОЇ ПОВЕРХНЕВО АКТИВНОЇ РЕЧОВИНИ ТРИТОН Х-305 НА ОСНОВНІ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ КЕРАМІКА–НАНОПЛАСТИНКИ ГРАФІТУ

Проаналізовано теоретичні аспекти створення композитних матеріалів (КМ) на основі вихідного каоліну та полідисперсних нанопластинок графіту (НПГ). На основі аналізу літературних джерел встановлено, що при вологому змішуванні каоліну та НПГ має місце утворення гетерофазної гідрофільно-гідрофобної системи каолін-НПГ. Гомогенний розподіл НПГ в каоліновій матриці для такої системи залежить від параметрів, що регулюють внесок різних типів міжчастинкових взаємодій. Для регулювання міжчастинкової взаємодії каоліну та НПГ, було використано неіоногенну поверхнево активну речовину (НПАР) Тритон Х-305 та зміну значення рН дисперсійного середовища. НПГ були виготовлені ультразвуковою обробкою термічно розширеного графіту (ТРГ). Досліджено основні властивості отриманих НПГ та їх кореляцію з технологічними режимами виготовлення. Способом напісного пресування та подальшого спікання виготовлено КМ на основі вихідного каоліну та НПГ. Експериментально досліджено вплив стабілізації системи каолін-НПГ за допомогою НПАР Тритон Х-305 на основні функціональні властивості КМ. Встановлено, що застосування НПАР Тритон Х-305 за інших рівних умов призводить до зниження пористості на 1,5–2 %, підвищення електропровідності на 20 % та підвищення межі міцності на стиск в середньому на 9 %.

Ключові слова: композитні матеріали; нанопластинки графіту; поверхнево активні речовини; міжчастинкова взаємодія; електрична провідність.

Вступ. У галузях народного господарства гостро постає необхідність використання електропровідних композиційних матеріалів з покращеними функціональними властивостями. Електропровідні КМ використовуються для виготовлення електродів, електричних контактів із мінімальною схильністю до електроерозії та покращеними комутативними властивостями (стійкість до електричних розрядів, гасіння дуги тощо), високочутливих тензометричних елементів, терморезисторів, нагрівних елементів з ефектами самостабілізації тощо. Поєднання у композицію вуглецевих наповнювачів як електропровідного наповнювача та кераміки як несівного елемента матеріалу надає певні переваги перед композитами з металевим наповнювачем, наприклад, низька вартість, широкий діапазон зміни електричної провідності до $100 \text{ (Ом}\cdot\text{м)}^{-1}$, відносно високі міцнісні властивості при значно меншій питомій вазі, значна корозійна стійкість та інертність по відношенню до багатьох хімічно агресивних середовищ, висока термостійкість [1].

Використання нанорозмірних електропровідних наповнювачів дозволило отримати КМ з покращеними властивостями: вищою електро- та теплопровідністю, вищою механічною міцністю та більшою чутливістю резистивних властивостей до зовнішніх факторів впливу (зміни температури, напружено-деформованого стану тощо) [2].

Електрофізичні властивості КМ на основі полімерних матриць вивчені досить детально [3], а властивості композитів на основі мінеральних матриць вивчені значно менше [4]. Хоча КМ на основі мінеральних (керамічних) матриць мають ряд переваг: високу термостійкість, міцність, жорсткість, хімічну стійкість в агресивних середовищах, екологічність та економічність [1].

Тому одним із перспективних напрямків досліджень є розробка та вивчення властивостей керамічних електропровідних КМ з нанорозмірними вуглецевими наповнювачами.

Постановка проблеми. На сьогодні за тенденції до зменшення відсоткового вмісту електропровідних наповнювачів та покращення функціональних властивостей КМ значна кількість робіт присвячена розробці нанокомпозитних матеріалів. Така тенденція викликана здебільшого негативним впливом електропровідного наповнювача на механічні властивості композиту. Використання нанорозмірних наповнювачів, що мають велику питому площу поверхні ($\sim 70 \text{ м}^2/\text{г}$), а також значним співвідношенням розмірів, дозволило суттєво зменшити відсотковий вміст наповнювача при збереженні основних функціональних властивостей.

Слід зазначити, що властивості КМ з нанорозмірними наповнювачами залежать не лише від властивостей індивідуальних компонентів, але також від морфології фаз та міжфазних поверхонь. Велика поверхня контакту матриці та нанорозмірних наповнювачів є ключовим моментом в розробці нанокомпозитів з покращеними властивостями [3]. Зокрема ключовим чинником нанокомпозитів є міжчастинкова взаємодія нанорозмірних електропровідних та діелектричних частинок. З урахуванням

того, що наноматеріали мають значну питому площу поверхні ($\sim 70 \text{ м}^2/\text{г}$) і має місце значна міжчастинкова взаємодія, для забезпечення якісного змішування компонент КМ використовують різні прийоми. Зокрема у ряді робіт для отримання наноккомпозитів на основі різних матриць і НПП з більш однорідною структурою дослідники пропонують [5] застосування таких способів, як попередня модифікація нанонаповнювача органічними сполуками, застосування полімерів з щепленими полярними групами та отримання концентратів, для подальшого введення їх в матрицю композиту. Модифікація частинок нанонаповнювача призводить до зниження їх поверхневої енергії, що сприяє дезагрегації наночасток.

Варто зазначити, що ліофобні (гідрофобні) колоїди (НПП) є термодинамічно нестабільними і схильними до агрегації. Швидкість процесів агрегації та стабільність композиційних колоїдних систем може регулюватися різними фізико-хімічними факторами, такими, як температура, концентрація електроліту, рН, наявність поверхнево активних речовин, полімерів тощо. Особливе значення має рН середовища, з огляду на особливості диспергування каоліну.

Міжчастинкові гетерозв'язки суттєво впливають на протікання процесів агрегації, реструктуризації, коагуляції колоїдних частинок в дисперсних системах, а також на структуру, фрактальні і перколяційні властивості осадів, що утворюються під час таких процесів.

Таким чином постає проблема якісної диспергації НПП в керамічній матриці (вихідний каолін $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) при виготовленні КМ.

Метою роботи є теоретичне обґрунтування та експериментальне дослідження впливу стабілізації поверхнево-активними речовинами системи каолін-НПП на основні фізико-механічні властивості КМ.

Аналіз літературних джерел. В ряді робіт [1, 6, 7] були досліджені основні фізико-механічні властивості графіт-керамічних КМ, сформованих напівсухим пресуванням на основі керамічної матриці (вихідного каоліну $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) та термічно розширеного графіту (ТРГ). Аналіз отриманих результатів показав, що матеріали мають значну анізотропію властивостей вздовж та впоперек осі пресування, що пов'язано з формуванням плоских спресованих шарів ТРГ в напрямку, перпендикулярному осі пресування. В роботі [8] обґрунтована доцільність покращення основних фізико-механічних властивостей КМ на основі керамічної матриці (вихідного каоліну $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) та ТРГ шляхом заміни останнього на НПП. Але для забезпечення якісного змішування каоліну та НПП необхідно враховувати міжчастинкову взаємодію та агрегацію частинок в колоїдній системі каолін-НПП. Тобто, успішне змішування можливе за умов відсутності процесів агрегації та «злипання» складових компонентів КМ.

Міжчастинкові гетерозв'язки виникають внаслідок присутності у композиційній системі частинок різного розміру і типу, ступеня анізотропії форми, різного ступеня ліофілізації поверхні. Каолін-НПП являє собою дисперсну колоїдну гідрофільно-гідрофобну систему. Така система була досліджена в [5], де для регулювання агрегації гідрофобних частинок колоїдного графіту у водній дисперсії та стабілізації системи використовували неіоногенну ПАР (Тритон X-305, $\text{CH}_3\text{-C}(\text{CH}_3)_2\text{-CH}_2\text{-C}(\text{CH}_3)_2\text{-C}_6\text{H}_5\text{-O-(CH}_2\text{CH}_2\text{O)}_n\text{H}$, де $n = 30$, Rohm & Haas, USA) з концентрацією $C = 0,00001\text{-}0,0005$ моль/л. Після змішування компонентів, суспензії обробляли на ультразвуковому диспергаторі (УЗДН-2Т, Росія) продовж 60 с. Частота обробки складала 22 кГц, вихідна потужність – 350 Вт.

Значення рН каоліну регулювалося за допомогою добавок HCl та Na_2SiO_3 . Для вивчення ефекту рН частка кожного диспергованого компонента в бінарній графіт каолінової суспензії була 0,1 % (масовий).

В області високих концентрацій НПАР агрегація частинок практично відсутня і відбувається осадження окремих частинок графіту (рис. 1) [5].

При додаванні невеликої кількості НПАР агрегація в суспензії послаблена, компактність осаду збільшується, а електропровідність осаду при седиментації змінюється слабо, оскільки частинки графіту починають вкриватися шаром з електронепровідних молекул.

Таким чином, в роботі [5] вдалося досягти якісного змішування каоліну та колоїдного графіту за рахунок стабілізації системи за допомогою НПАР.

Для якісної диспергації НПП в каолінової матриці при вологому змішуванні необхідно враховувати електричні заряди частинок. Також необхідно враховувати заряд частинок НПП та каоліну у водному розчині. Заряд поверхонь каоліну визначає тип і інтенсивність міжчастинкових взаємодій, іонного обміну й адсорбцію. У водному середовищі пластинки каоліну мають негативно заряджені базальні поверхні. Більшість дослідників [9, 10] вказують на те, що заряд базальних площин не залежить від рН. Найчастіше негативний заряд базальних площин пов'язаний з ізоморфним заміщенням в тетраедричній сітці Si^{4+} на M^{3+} . Заряд бічних граней залежить від рН і є позитивним при низьких значеннях рН [9]. Це пов'язано з тим, що залежно від значення рН може відбуватися протонація чи депротонація. Бічні грані є крайовими ділянками кристалів у місцях розривів зв'язків Si-O-Si та $\text{OH-Al}^{\text{IV}}\text{-OH}$ при

недонасичених крайових атомів кисню або гідроксилу відповідно кремнієм і алюмінієм. Тому обмінні реакції у часток каолініту відбуваються лише по сколах кристалічної решітки.

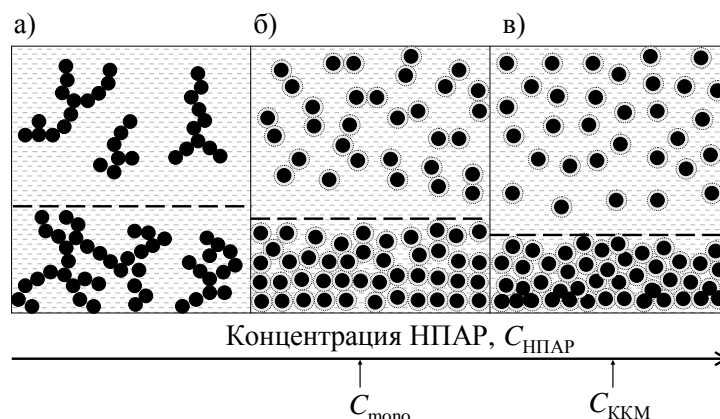
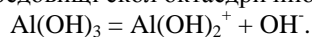
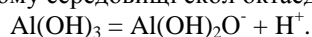


Рис. 1. Модель зміни структури осаду при збільшенні концентрації НПАР $C_{\text{НПАР}}$ [5]

Через кристалохімічні особливості будови глинистих мінералів при зміні рН розчину спостерігається перезарядка торцевих ділянок глинистих частинок. Даний ефект пов'язаний з амфотерними властивостями бокового відколу октаедричної сітки, який веде себе подібно до гідроокису алюмінію. У кислому середовищі скол октаедричної сітки дисоціює за лужним типом [9]:



У лужному середовищі скол октаедричної сітки дисоціює за кислотним типом:



У результаті цього процесу бічний скол глинистої частинки в кислому і нейтральному середовищах заряджається позитивно, а в лужному – негативно. Зміна заряду на торцевих ділянках глинистих частинок призводить до формування в лужних умовах однойменно заряджених, а в кислих і нейтральних – знакозмінних ПЕШ [9]. Тобто, при низькому значенні рН (кисле середовище) надлишок протонів може компенсувати негативний заряд базальтових поверхонь глинистих частинок.

Викладене вище добре узгоджується з загальною теорією прилипання, розвитою Б.В. Дерягінін, згідно з якою коагуляційне зчеплення часток здійснюється по окремих ділянках найменшої гідрофільності, якими є місця найбільшої кривизни – кути та ребра часток.

Варто також зазначити, що каоліни збагачені мокрим способом часто містять залишкові хімічні реагенти, що використовуються в процесі збагачення. Адсорбція останніх структуроутворюючими інгредієнтами керамічних мас призводить до її непрогнозованої поведінки в технологічному процесі та суттєво погіршує експлуатаційні властивості напівфабрикату [9]. Тому в даній роботі використовувався каолін сухого збагачення марки П1.

Викладення основного матеріалу. Експериментальна частина.

Виготовлення НПП

Виготовлення НПП здійснювалося обробкою ультразвуком ТРГ в середовищі води та ізопропілового спирту у співвідношенні 65:35 відповідно. Обробка ультразвуком здійснювалася на ультразвуковому дисперсаторі УЗД-500.

Обробка ультразвуком здійснювалася при 100, 250 та 350 Вт з часом обробки 4, 8 та 16 годин. Після годин обробки ультразвуком ТРГ був ефективно фрагментований на НПП. Результати скануючої електронної мікроскопії (СЕМ) виготовлені при 16 год. і 350 Вт показані на рисунку 2. Структурний аналіз НПП здійснювався скануючою електронною мікроскопією, виконаною на LEO-SEM 1530 при 10 kV.

Результати аналізу мікроскопії показують, що товщина отриманих частинок НПП варіює від 10 до 300 нм, а середній діаметр частинок знаходиться в діапазоні від 0,3 до 2 мкм. Розподіл розмірів НПП визначався за допомогою Centrifugal Particle Size Analyzer Model SA-CP3 (Shimadzu, Японія). Результати сидементаційного аналізу НПП, виготовлених за різних умов, показані на рисунку 3. Диференціальний та інтегральний розподіл показують явне зміщення експериментальних кривих в область малих діаметрів частинок зі збільшенням потужності ультразвуку і часу.

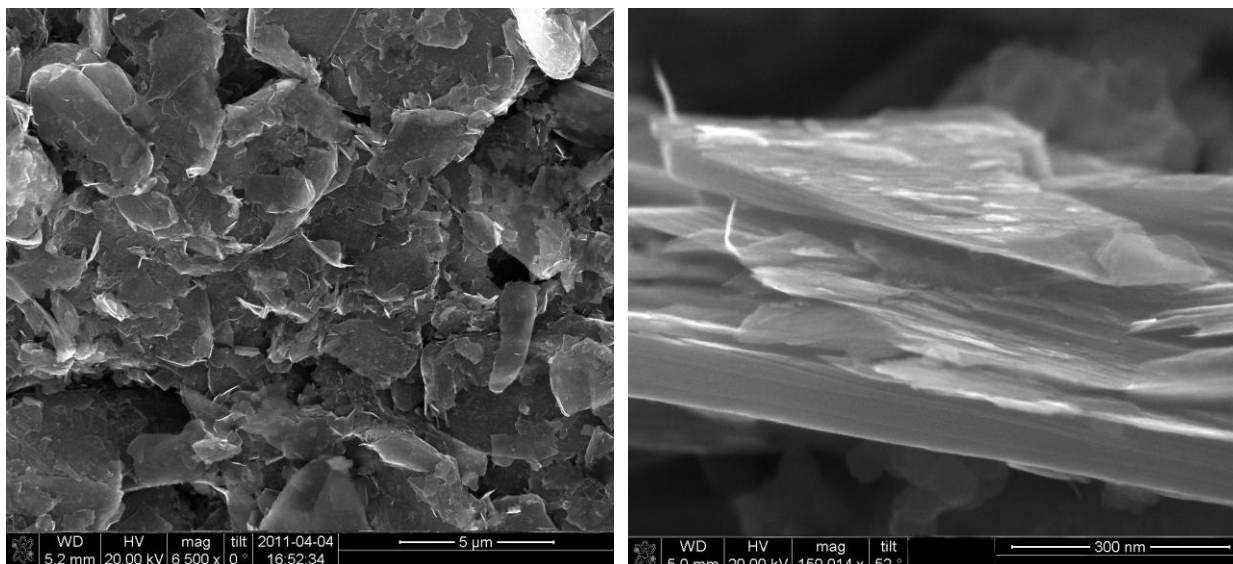


Рис. 2. СЕМ мікрознімки отриманих НПП

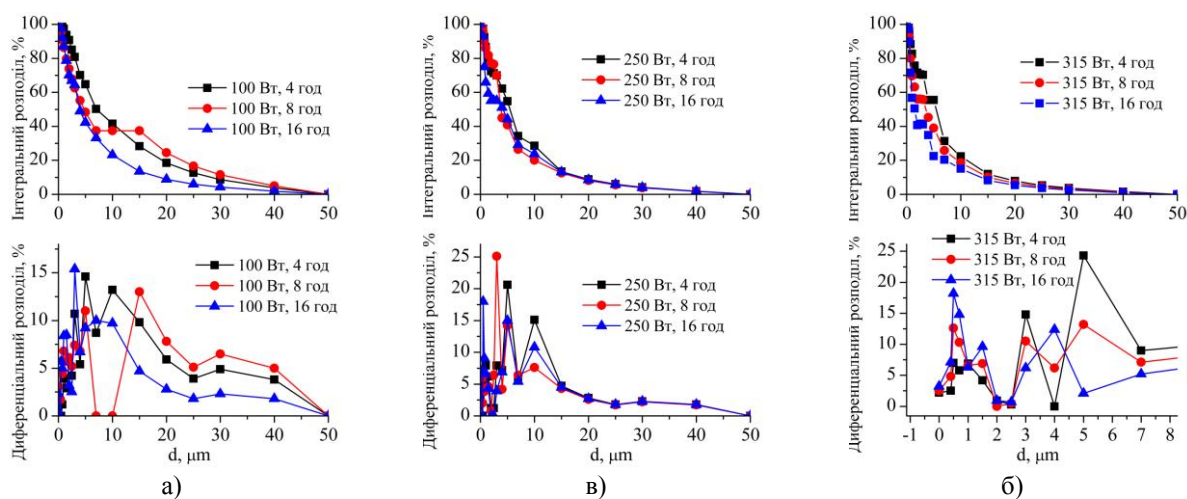


Рис. 3. Розподіл частинок НПП після обробки ультразвуком за різних параметрах (час, потужність)

Оціночне визначення питомої площі поверхні здійснювалося за допомогою SA-CP3. В цілому питома площа поверхні знаходиться в межах 20–75 м²/г і зростає зі збільшенням тривалості обробки та потужності обробки.

Підсумовуючи, слід зазначити, що отримані в даній роботі НПП мають основні структурні характеристики на рівні отриманих матеріалів провідними дослідниками в цій сфері [11–13].

Вихідні матеріали та виготовлення зразків

За вихідну сировину для виготовлення електропровідних композиційних матеріалів в даній роботі використовували каолін та НПП. Був використаний каолін марки П-1 Глухівського гірничо-збагачувального комбінату. НПП виготовлені при 315 Вт та 16 год. ультразвукової обробки.

Подальша підготовка суміші полягала у дозуванні НПП та каоліну у межах концентрацій НПП 3–5 % (мас.). Змішування проводилося із додаванням дистильованої води ~20 %. Стабілізація гідрофільно-гідрофобної системи каолін-НПП здійснювалася введенням неіоногенною ПАР (Тритон X-305, CH₃-C(CH₃)₂-CH₂-C(CH₃)₂-C₆H₅-O-(CH₂CH₂O)_nH, де n = 30, Rohm & Haas, USA) з концентрацією C = 0,0005 моль/л. Отриману суміш висушували у електричній шафі при температурі 110 °С протягом 20 год.

Формування виробів здійснювалося напівсухим пресуванням при тиску 75 МПа. Пресування проводилося ступінчасто – 10, 30, 50 та 100 % від максимального тиску з метою зменшення запресовування повітря

Спикання проводилося із розміщенням зразків у спецформі в муфельній електропечі за температури 1150 °С у захисній атмосфері. Тривалість спикання 2 год.

Результати експериментальних досліджень КМ

Пористість

Визначення значення пористості проводилося згідно з ГОСТ 7025-91. Отримані результати представлені на рисунку 4 (а).

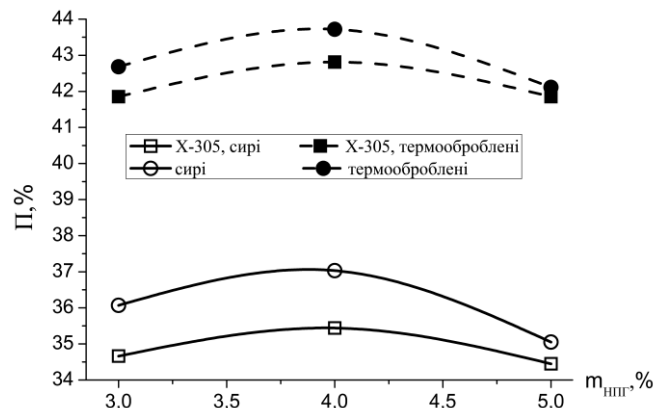


Рис. 4. Залежність пористості КМ від вмісту НПП до та після термообробки

З аналізу рисунку 4 можна зробити наступні висновки:

– зразки до термообробки мають пористість в межах 34–36 % при відсотковому вмісті НПП 3–5 % (мас.). Застосування ПАР Тритон X-305 призводить до зниження пористості як до, так і після спікання (~1,5–2 %), що вказує на формування щільнішої структури;

– залежність пористості від вмісту НПП є складною: до 4 % (мас.) висхідна залежність, а з 4 % (мас.) до 5 (мас.) – низхідна;

– зростання пористості після термообробки склало ~8 %, а максимальне значення становить ~44 %. Порівнюючи отримані результати з результатами робіт [1] можна констатувати, що заміна ТРГ на НПП дозволила отримати матеріали з вищою щільністю та меншим на 7–8 % зростанням пористості після термообробки.

Електрична провідність отриманих КМ

Вимірювання проводили за допомогою аналогового перетворювача HM8118 LCR Measurement Bridge.

Результати експериментального дослідження електропровідності зразків, сформованих напівсухим пресуванням, представлені на рисунку 5.

З аналізу графічної залежності (рис. 5) очевидно, що питома електрична провідність зразків до та після термообробки змінюється незначно (зростає на ~7 %) для всіх концентрацій НПП. Зі збільшенням вмісту НПП електропровідність зразків, виготовлених без НПАР, зростає. В той же час НПАР нелінійно діє на електропровідність, збільшення вмісту НПП з 3,3 до 4,7 % (об'єм) призводить до зростання провідності на ~82 %, подальше збільшення $V_{\text{НПП}}$ (%) до 5,5 призводить до незначного зростання провідності на ~20 %. Такі результати пов'язані з впливом НПАР та значення рН дисперсійного середовища на седиментаційні процеси у композитній дисперсії графіту і каолініту на електропровідність осадів і процеси їх реструктуризації. Слід зазначити, що введення НПАР Тритон X-305 з концентрацією $C = 0,0005$ моль/л здійснювали у колоїдний розчин НПП, де НПП є дисперсною фазою системи, а дисперсійним середовищем є суміш 35 % ізопропилового спирту і 65 % дистильованої води. Після додавання неіоногенних НПАР відбувалась диспергація на УЗД-500 протягом 15 хв. при 315 кВт. Основна функція НПАР в даному випадку полягає в адсорбції на частинках НПП. Згідно з результатами [5] концентрація НПАР $C = 0,0001$ моль/л має забезпечити покриття частинок графіту моношаром НПАР, а концентрація $C = 0,0003$ моль/л відповідає критичній концентрації міцелоутворення НПАР у водному розчині. В роботі [5] використовували природний графіт Завальєвського родовища (Україна) марки С-0 з розміром частинок 1–10 мкм, вміст основного продукту 99,98 % та питомою поверхнею 20 м²/г. Оскільки в даному випадку дисперсність графіту після ультразвукової роботи значно більша (~70 м²/г), було використано збільшену концентрацію – $C = 0,0005$ моль/л.

З аналізу графічної залежності (рис. 5) можна зробити висновки:

– введення НПАР підвищує електропровідність, в середньому, на 20 %. Причина такого ефекту в тому, що при збільшенні концентрації великих або малих частинок у системі відбувається зростання розміру зв'язних кластерів для частинок певного сорту, а додавання НПАР сприяє диспергуванню НПП і тим самим забезпечує формування більш електропровідної структури;

– найбільший ефект від введення НПАР Тритон X-305 при низьких значеннях вмісту НПП (вміст 3,3 %);

– застосовані заходи (підвищення тиску формування, підвищення рН та введення НПАР) дозволили досягти значно вищих значень провідності композиційних матеріалів, порівняно з КМ без використання НПАР.

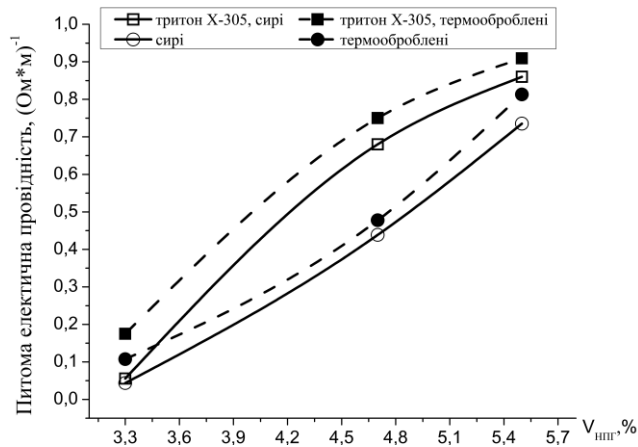


Рис. 5. Залежність та питомої електричної провідності КМ від вмісту НПП до та після термообробки

Механічні властивості отриманих КМ

Результати визначення залежностей межі міцності на стискання $\sigma_{ст}$ зразків КМ залежно від вмісту від вмісту НПП представлено на рисунку 6. Межу міцності на стиск визначали за ДСТУ Б.В. 2.7. – 61:2008. Границю міцності на стиск визначали на цілому виробі. Вирівнювання опорних поверхонь зразків здійснювалося шліфуванням. Зразок розташовували в центрі пресу та притискали верхньою плитою машини. Швидкість наростання навантаження 5–10 кН/с. Границю міцності при стиску $R_{ст}$, МПа ($\text{кгс}/\text{см}^2$) визначали так:

$$R_{ст} = \frac{P}{F}, \quad (1)$$

де P – максимальне навантаження, за якого зразок руйнується, кгс; F – середнє арифметичне значення площі поверхні верхньої та нижньої граней зразка, см^2 .

З аналізу отриманих залежностей (рис. 6) можна зробити висновки:

- порівнюючи $\sigma_{ст}$, розроблені КМ, з $\sigma_{ст}$ зразків, розроблених в роботах [6, 14], можна констатувати, що заміна ТРГ нанопластинками графіту при інших рівних умовах дозволяє отримати матеріали з підвищеною на 20–30 % границею міцності на стиск;
- зростання $\sigma_{ст}$ при заміні ТРГ нанопластинками графіту пов'язане з тим, що для забезпечення відповідного рівня електропровідності достатньо меншого відсоткового вмісту НПП, порівняно з відсотковим вмістом ТРГ;
- НПП більш рівномірно дисперегуються в керамічній матриці та не утворюють великих агрегатів, що дозволяє отримати матрицю з меншими і більш рівномірно розподіленими пустотами;
- зростання відсоткового вмісту НПП призводить до зниження $\sigma_{ст}$, що пов'язано зі зростанням пористості при збільшенні вмісту НПП.

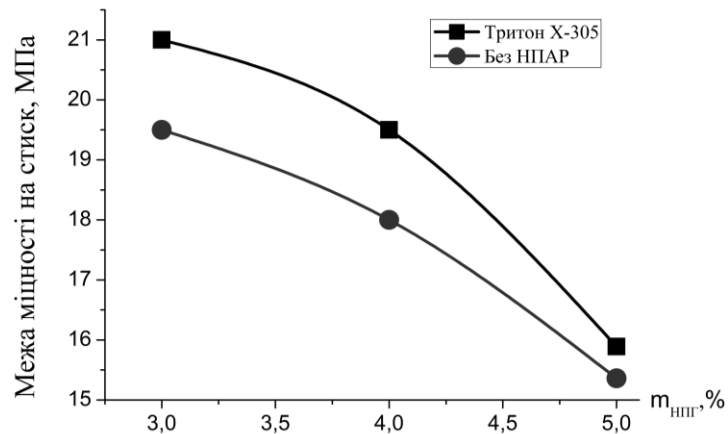


Рис. 6. Залежність межі міцності на стискання КМ від вмісту НПП

Висновки:

1. Використання нанорозмірних вуглецевих наповнювачів дозволяє отримати КМ з покращеними властивостями, що пов'язано з масштабними ефектами та значним співвідношенням розмірів частинок наноматеріалів. Перспективним напрямком є створення нанокомпозитів на основі керамічної матриці та НПП. Для створення таких композитів були виготовлені НПП ультразвуковою обробкою ТРГ. Результати скануючої електронної мікроскопії та седиментаційного аналізу показують, що товщина отриманих частинок НПП варіює від 10 до 300 нм, а середній діаметр частинок знаходиться в діапазоні від 0,3 до 2 мкм. Диференціальний та інтегральний розподіл частинок НПП показують явне зміщення експериментальних кривих в область малих значень діаметрів зі збільшенням потужності ультразвуку і часу обробки. Отримані НПП мають основні характеристики на рівні НПП [11–13].

2. Виготовлення КМ з нанорозмірними вуглецевими наповнювачами, зокрема з НПП, пов'язано з труднощами диспергування НПП в матриці, а саме:

- проблема диспергування частинок каоліну у водних дисперсіях глинистого мінералу з метою їх якісного змішування з наповнювачами, що визначатиме ефективність використання останніх;
- проблема міжчастинкової взаємодії каоліну та нанопластинок графіту з позиції уникнення злипання частинок для забезпечення якісного змішування.

В зв'язку з цим в даній роботі для забезпечення гомогенний розподілу НПП в каоліновій матриці було забезпечено слабо лужне середовище для диспергації частинок каоліну, та стабілізовано гідрофільно-гідрофобну систему каолін-НПП за допомогою НПАР Тритон Х-305.

3. Стабілізація системи каолін-НПП за допомогою НПАР дозволила отримати зразки з нижчою на 1,5–2 % пористістю, вищою на 20 % електропровідністю та підвищеною межею міцності на стиск в середньому на 9 %. Причина такого ефекту пов'язана з тим, що при збільшенні концентрації великих або малих частинок у системі каолін-НПП відбувається зростання розміру зв'язних кластерів для частинок певного сорту, а додавання НПАР сприяє диспергуванню НПП і тим самим забезпечує формування більш щільної структури з включеннями меншого розміру, що рівномірно розподілені по об'єму.

Список використаної літератури:

1. Перколяційно-фрактальні матеріали: властивості, технології, застосування / *І.Г. Грабар, О.І. Грабар, О.А. Гутніченко та ін.* – Житомир : ЖДТУ, 2007. – 354 с.
2. Temperature dependence of electrical resistivity for carbon black filled ultra-high molecular weight polyethylene composites prepared by hot compaction / *Z.Cheng, M.Chun-An, W.Ping at oll.* // *Carbon.* – 2005. – № 12. – С. 2544–2553.
3. Electrical Properties of CNT-Based Polymeric Matrix Nanocomposites / *A.Chiolerio, M.Castellino, P.Jagdale at oll.* // *Carbon Nanotubes – Polymer Nanocomposites.* – 2011. – № 11. – С. 215–230.
4. Электропроводящие композиты на основе термически расширенного графита / *И.М. Афанасов, В.А. Морозов, А.Н. Селезнев и др.* // *Неорганические материалы.* – 2008. – С. 689–693.
5. *Старченко В.Ю.* Вплив міжчастинкових взаємодій на процеси агрегації, структуру та перколяційні властивості композиційних колоїдних систем : автореф. дис. ... канд. фіз.-мат. наук : спец. 01.04.24 "Фізика колоїдних систем" / *В.Ю. Старченко.* – К., 2009. – 17 с.

6. Гутніченко О.А. Вплив формообмежуючого фактора при спіканні на структуру та властивості графіт-керамічних композиційних матеріалів / О.А. Гутніченко, О.Л. Мельник // Вісник УМТ. – 2011. – № 4. – С. 92–101.
7. Гутніченко О.А. Діелектричні властивості графіт-керамічних композитів спечених у закритих формах / О.А. Гутніченко, О.Л. Мельник // Вісник ЖДТУ. – 2011. – № 5. – С. 13–18.
8. Мельник О.Л. Обґрунтування можливості покращення електричних властивостей графіт-керамічних композитів введенням нанорозмірних частинок / О.Л. Мельник, О.А. Гутніченко // XXXVII наук.-практ. міжвуз. конф., присв. Дню науки. – Житомир, 2012. – С. 21.
9. Соколов В.Н. Глинистые породы и их свойства / В.Н. Соколов // Соросовский образовательный журнал. – 2000 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.pereplet.ru/obrazovanie/stsoros/1073.html>.
10. Banu Z. AAS, XRPD, SEM/EDS, and fir studies of the effect of calcite and agnesite on the uptake of PB^{2+} and ZN^{2+} ions by natural kaolinite and clinoptilolite : дис. ... канд. Banu Zünbül. – Izmir, 2005. – 129 с.
11. Preparation and characterization of graphite nanosheets from ultrasonic powdering technique / C.Guohua, W.Wengui, W.Dajun at oll. // Carbon. – 2004. – № 4. – С. 753–759.
12. Preparation and characterization of graphite nanosheets from detonation technique / S.Guilei, L.Xiaojie, Q.Yandong at oll. // Materials Letters. – 2008. – № 4. – С. 703–706.
13. Low energy pure shear milling : A method for the preparation of graphite nano-sheets / M.Vittori Antisari, A.Montone, N.Jovic at oll. // Scripta Materialia. – 2006. – № 11. – С. 1047–1050.
14. Гутніченко О.А. Розробка електропровідної композиційної кераміки на основі каоліну та терморозширеного графіту : автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.02.01 "Матеріалознавство" / О.А. Гутніченко. – К., 2007. – 20 с.

МЕЛЬНИЧУК Петро Петрович – доктор технічних наук, професор, ректор Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

– новітні процеси в технології машинобудування.

E-mail: rector@ztu.edu.ua.

МЕЛЬНИК Олександр Леонідович – асистент кафедри металорізальних верстатів і систем Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

– електропровідні композиційні матеріали;

– вуглецеві наноматеріали.

E-mail: o.l.melnyk@ukr.net.

Стаття надійшла до редакції 12.11.2014