

УДК 678-13:678.744

Похмурська А.В.

Національний університет «Львівська політехніка»

Гриценко О.М.

Національний університет «Львівська політехніка»

Баран Н.М.

Національний університет «Львівська політехніка»

Волошкевич П.П.

Національний університет «Львівська політехніка»

ОСОБЛИВОСТІ СИНТЕЗУ ТА СТРУКТУРА Ag(0)/пГЕМА-пр-ПВП НАНОКОМПОЗИТІВ, ОДЕРЖАНИХ ПОЛІМЕРИЗАЦІЄЮ З ОСАДЖЕННЯМ МЕТАЛУ

У статті досліджено особливості одержання Ag(0)-наповнених кополімерів 2-гідроксіетилметакрилату з полівінілпіролідом методом полімеризації з одночасним відновленням Ag⁺. Температурні умови, необхідні для хімічного відновлення, досягаються за рахунок тепла, яке виділяється під час екзотермічної реакції полімеризації. Використання комбінованої ініціювальної системи FeSO₄/ПБ дає можливість здійснювати процес за кімнатної температури, на повітрі. Підтверджено утворення полімерної матриці на основі прищепленого сітчастого кополімеру. Одержані Ag(0)-наповнені композити та гідрогелі характеризуються бактерицидними та антифунгальними властивостями.

Ключові слова: срібло, полівінілпіролідон, 2-гідроксіетилметакрилат, гідрогелі, сріблонановнені гідрогелі, наночастинки, металополімерні композити.

Постановка проблеми. Причиною широкого та різноманітного використання полімерних гідрогелів є їх унікальна пориста структура разом з присутністю гідрофільних функціональних груп, які забезпечують набрякання полімерної матриці у воді та інших полярних розчинниках, що обумовлює високу проникність для розчинених низькомолекулярних речовин [1; 2]. Завдяки сорбційній здатності, еластичності та стабільності форми у водному середовищі, сумісності з різними біологічними системами гідрогелі використовуються в різних галузях народного господарства.

Модифікація гідрогелів та створення на їх основі металонаповнених композитів забезпечують одержання матеріалів зі спеціальними характеристиками та розширюють можливості їх використання [3]. Унікальність таких матеріалів полягає в поєднанні властивостей полімерної матриці та металу-наповнювача. Введення до структури гідрогелів частинок срібла Ag(0) відкриває додаткові можливості для надання їм нових властивостей, наприклад бактерицидних та антифунгальних, та робить незамінними для використання в медичній галузі як пов'язок для лікування ран, опіків, різних виразок. Головна проблема,

яка виникає під час створення таких матеріалів, полягає у виборі оптимальних способів введення Ag(0) у полімерну матрицю, оскільки від способу наповнення залежать величина та характер розподілу частинок наповнювача в об'ємі композиту, отже, його структура та властивості.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Інтерес науковців до розроблення композиційних полімерів, особливо полімерних гідрогелів, які містять металічне срібло, постійно зростає [4]. З давніх-давен відомо про антимікробну (бактерицидну) властивість срібла, яка характерна також для гідрогельних полімерних матеріалів, наповнених його частинками [5; 6]. Через високу антимікробну дію срібла до широкого спектру мікроорганізмів Ag(0)-наповнені гідрогелі використовують для виготовлення бактерицидних та бактеріостатичних гелевих лікарських форм.

Створення металонаповнених гідрогелів внаслідок змішування попередньо одержаних компонентів на перший погляд є найбільш очевидним та простим методом, адже вихідні реагенти, полімери та частинки металу є стабільними об'єктами, які мають певні характеристики та синтезують з використанням стандартних мето-

дик і обладнання [7]. В разі гідрогелевих матеріалів фізичний метод змішування лежить в основі технології одержання композитів з розчинів полімерів [7], а також полімеризаційного наповнення [8]. Однак наповнення порошками не завжди дає бажаний результат з технологічної точки зору. Під час змішування компонентів композиції досягнення рівномірного розподілу частинок металу в гідрогелі не завжди є можливим через їх обмежену сумісність, а також можливість седиментації, яка викликає неоднорідність властивостей композиту, тому іноді для отримання гомогенних композитів синтез частинок металічного наповнювача здійснюють безпосередньо в матриці полімеру. Під час аналізування наукових джерел не виявлено конкретного домінуючого методу отримання частинок металевого наповнювача, проте спостерігається значна перевага хімічних методів перед фізичними, а саме хімічне відновлення в розчинах [3]. Процес здійснюють у присутності відновників різного типу. В разі срібла ними є формалін, гіпофосфіти калію та натрію, борогідрид натрію, гідразинборан. Використання токсичних відновників під час наповнення гідрогелів хімічним відновленням іонів металів є суттєвим недоліком, що значною мірою обмежує їх застосування, особливо в біомедичній галузі. Залежно від умов та природи окисно-відновної системи температура відновлення складає 60–140°C [9]. Більшої уваги заслуговують способи хімічного синтезу металевих частинок без застосування додаткових відновників, коли роль відновника відіграє розчинник [10] або полімер [11]. Проте наповнення відновленням іонів металів у сітці полімерної матриці потребує використання великих кількостей розчинів окисника та відновника, що вимагає додаткової стадії регенерації та супроводжується перевитратою реагентів. Крім того, цей метод, як й інші наявні методи одержання металонаповнених полімерів, є принаймні двостадійним та містить стадію синтезу полімерної матриці й стадію одержання частинок металу-наповнювача.

Таким чином, пошук та розроблення нових простих у технологічному виконанні та високопродуктивних способів одержання сріблonaповнених гідрогелевих матеріалів медичного призначення обумовлюють необхідність проведення досліджень в цьому напрямі.

Постановка завдання. Метою статті є дослідження особливостей одержання сріблonaповнених композиційних полімерних гідрогелів на основі кополімерів 2-гідроксіетилметакрилату

(ГЕМА) з полівінілпіролідом (ПВП) методом полімеризації з одночасним осадженням металу.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Матеріали й методи досліджень. Як матрицю для наповнення Ag (0) вибрано рідкоструктуровані полімери, які одержували радикальною полімеризацією ГЕМА в присутності ПВП. Для кополімеризації використовували 2-гідроксіетилметакрилат, який переганяли у вакуумі (залишковий тиск склав 130 Н/м², T_{кип.} = 351 К), полівінілпіролідон високої очистки з ММ 12000 (сушили при 338 К у вакуумі 2–3 години). Ініціатором полімеризації вибрано ініціатор радикального типу пероксид бензоїлу (ПБ), який перекристалізовували з етанолу. Неорганічні солі (феруму (II) сульфат, аргентуму нітрат) використовували марок ч. д. а.

Досліджували композиції складу ГЕМА:ПВП=90÷70:10÷30 мас. ч. з використанням 10÷100 мас. ч. розчинника (H₂O). Необхідність присутності розчинника у вихідній композиції обумовлена розчиненням у ньому прекурсорів відновлення. Для відновлення Ag⁺ використовували окисно-відновну систему (ОВС) EtOH/AgNO₃. Синтез здійснювали за початкової температури T₀=50 °C (ініціатором є ПБ) та T₀=25 °C (ініціатором є ПБ/FeSO₄). Готували полімер-мономерну композицію (ПМК) з ініціатором ПБ (0,3 мас. %), розчиняючи за кімнатної температури в ГЕМА необхідну кількість ПБ та ПВП до одержання гомогенної суміші. Окремо готували розчин ОВС (P_{ОВС}), тобто водний розчин окисника AgNO₃ (18–50 г/л) з відновником C₂H₅OH (300 мл/л) з додаванням FeSO₄ (0,01 мас. %). ПМК та ОВС змішували та дозували в полімеризаційну форму. Після формування зразки одержаних композитів промивали у дистильованій воді задля видалення непрореагованих ГЕМА, ПВП, окисника та відновника, а також продуктів реакції відновлення.

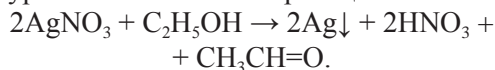
Зміну температури реакційного середовища під час реакції полімеризації досліджували термометричним методом за розробленою методикою [12]. Електронно-мікроскопічні дослідження здійснювали з використанням растрового електронного мікроскопу-мікроаналізатора РЕММА-102-02, рентгенографічні дослідження – на дифрактометрі ДРОН-4-07. Термічну стійкість композитів досліджували на дериватографі системи «Паулік-Паулік-Ердей». Бактерицидні та антифунгальні властивості зразків вивчали на тест-культурах бактерій Escherichia coli (E. coli), Staphylococcus aureus (S. aureus), Staphylococcus epidermidis (S. epidermidis), Streptococcus viridans (S. viridans)

і диплоїдного грибка *Candida albicans* (*C. albicans*) за методикою, поданою у джерелі [13].

Результати та обговорення.

Технологічні особливості одержання полімерів (вихідний склад композиції, тривалість та температура процесу) значною мірою залежать від кінетичних закономірностей полімеризації. Однак в разі здійснення одночасно двох процесів, а саме полімеризації та осадження металу, через багатоконпонентність вихідної композиції, присутність у реакційній системі прекурсорів та продуктів реакції відновлення конкретне визначення кінетичних параметрів полімеризації є ускладненим. Водночас полімеризація ГЕМА в присутності ПВП відбувається за радикальним механізмом через стадію утворення комплексу з перенесенням заряду (КПЗ) [2] та є процесом екзотермічним, тобто відбувається з гель-ефектом, що викликає саморозігрівання системи [14]. З огляду на це кінетичні закономірності полімеризації оцінювали термометричним методом за отриманими термометричними кривими, на яких були виділені характерні параметри, що відповідають часу початку гелеутворення ($\tau_{п.г.}$), часу досягнення максимальної температури екзотермії ($\tau_{макс.т.}$), області гель-ефекту ($\tau_{о.г.}$) та максимальній температурі екзотермії ($T_{макс.}$).

На основі аналізу попередніх досліджень [10] та з огляду на медичне призначення сріблосодержачого гідрогелю осадження срібла здійснювали з його нітрату у водно-етанольному розчині. Процес відновлення інтенсивно відбувається за температури 60–70°C за такою реакцією:



Термометричними дослідженнями доведено, що тепло, яке виділяється внаслідок екзотермії, є

достатнім для забезпечення перебігу реакції відновлення Ag^+ (рис. 1). В разі ГЕМА/ПВП композицій полімеризація в присутності ПБ відбувається з високою швидкістю вже за температури 50°C з $T_{макс.}=97^\circ C$, яка досягається через 34 хвилини з $\tau_{о.г.}=27$ хвилин (рис. 1, а).

Швидкість полімеризації залежить від складу ПМК: зі збільшенням у композиції вмісту ПВП зростає її полімеризаційна здатність, отже, зменшується час початку гелеутворення (рис. 1, б). Збільшення у ПМК кількості ПВП прискорює початок настання екзотермії, однак приводить до зменшення $T_{макс.}$ Зменшення $T_{макс.}$ в цьому разі можна пояснити зменшенням вмісту у ПМК мономеру, який викликає інтенсивне тепловиділення.

Підвищення T_0 полімеризації (рис. 1, а), звичайно, сприяє зростанню швидкості процесів полімероутворення, максимальної температури екзотермії, отже, швидкості осадження срібла. Однак через високу швидкість тепловиділення та погану теплопровідність полімеру відбуваються теплове розширення та виникнення внутрішніх напружень, що є причиною появи тріщин в об'ємі зразка [12]. Одним з методів здійснення полімеризації ГЕМА/ПВП композицій за низьких температур є полімеризація в присутності $FeSO_4$ [15]. Під дією іонів металів змінного ступеня окиснення процес відбувається з високою швидкістю за кімнатної температури, на повітрі, а залежно від складу композиції завершується через 10–60 хвилин. Завдяки дослідженню кінетики кополімеризації ГЕМА з ПВП в присутності іонів металів змінного ступеня окиснення встановлено, що процес відбувається за іон-радикальним механізмом з чітко вираженим гель-ефектом та мінімальним індукційним періодом [15]. Результати термометричних досліджень (табл. 1, поз. 1) підтверджують

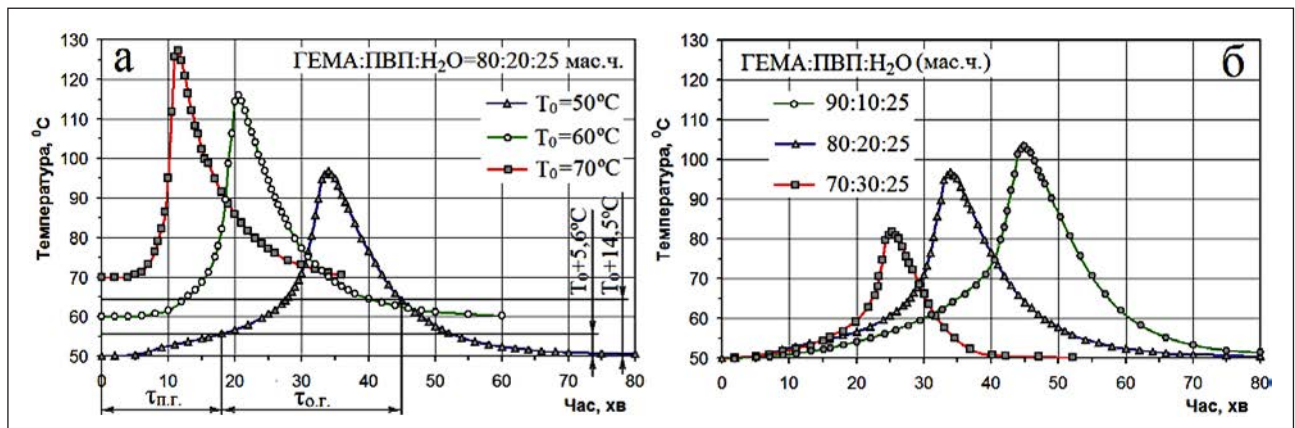


Рис. 1. Термометричні криві полімеризації залежно від початкової температури T_0 (а) та складу вихідної композиції (б)

Залежність параметрів гель-ефекту полімеризації від типу ініціювальної системи
(ГЕМА:ПВП:Н₂О=80:20:10 мас. ч.)

| № | Ініціювальна система | ОВС | T ₀ , °C | τ _{п.г.} , хв. | τ _{т.макс.} , хв. | τ _{о.г.} , хв. | T _{макс.} , °C |
|---|-----------------------|-------------------------|---------------------|-------------------------|----------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 1 | FeSO ₄ | – | 25 | 0,3 | 10 | 22,7 | 52 |
| 2 | ПБ | – | 50 | 12 | 26 | 27 | 121 |
| 3 | ПБ | AgNO ₃ /EtOH | 50 | 14 | 30 | 31 | 107 |
| 4 | FeSO ₄ /ПБ | – | 25 | 2 | 33 | 44 | 83 |
| 5 | FeSO ₄ /ПБ | AgNO ₃ /EtOH | 25 | 18 | 37 | 29 | 81 |

екзотермічну природу полімеризації ГЕМА/ПВП композицій під дією Fe²⁺.

Однак в конкретному випадку для ПМК складу ГЕМА:ПВП=80:20 мас. ч. максимальна температура екзотермії становить 52°C та є недостатньою для інтенсивного відновлення Ag⁺, хоча й настає через 10 хвилин, а полімеризація відбувається без індукційного періоду. Водночас встановлено можливість полімеризації ГЕМА/ПВП композицій за кімнатної температури в присутності комбінованої ініціювальної системи FeSO₄/ПБ. Полімеризація ГЕМА в присутності ПВП під дією ПБ за T₀=50°C характеризується максимальною температурою екзотермії 121°C, яка настає через 26 хвилин від її початку (табл. 1, поз. 2). В присутності ОВС швидкість процесу полімеризації є дещо меншою, адже зменшується T_{макс.}, зростають τ_{п.г.}, τ_{макс.т.}, τ_{о.г.}. За використання комбінованої ініціювальної системи FeSO₄/ПБ для полімеризації ГЕМА/ПВП композицій досягнуто T_{макс.}=83°C за порівняно короткий проміжок часу 33 хвилини та в умовах початкової кімнатної температури (табл. 1, поз. 3). Отриманий ефект використано для полімеризації ГЕМА/ПВП композиції у присутності окисно-відновної системи EtOH/AgNO₃

(табл. 1, поз. 4). Максимальна температура екзотермії в цьому разі становить 81°C.

Забарвлення зразків, одержаних методом полімеризації з одночасним відновленням Ag⁺, змінюється від срібно-сірого до коричневого залежно від умов формування, складу вихідної ПМК та концентрації AgNO₃. Така зміна кольору, вочевидь, пов'язана з появою у структурі полімеру металічного срібла. Одержані зразки відрізняються високою якістю поверхні та гомогенною структурою полімерної матриці. В цьому разі не спостерігається виникнення макропор, а частинки срібла мають однаковий розмір у межах 100 нм (рис. 2, а).

Рівномірність розподілу частинок срібла в об'ємі полімерної матриці забезпечується ще на стадії змішування компонентів вихідної композиції завдяки комплексоутворенню [2; 15], яке супроводжується утворенням міжмолекулярних контактів між мономером, іоном металу та карбаматними групами ланцюга ПВП, отже, фіксації Ag⁺ в сітці полімеру.

Результати, отримані за допомогою СЕМ, не дають можливості стверджувати про одержання Ag(0) внаслідок хімічного відновлення Ag⁺ під час полімеризації. Для додаткового підтвердження утворення металічного наповнювача здійснено

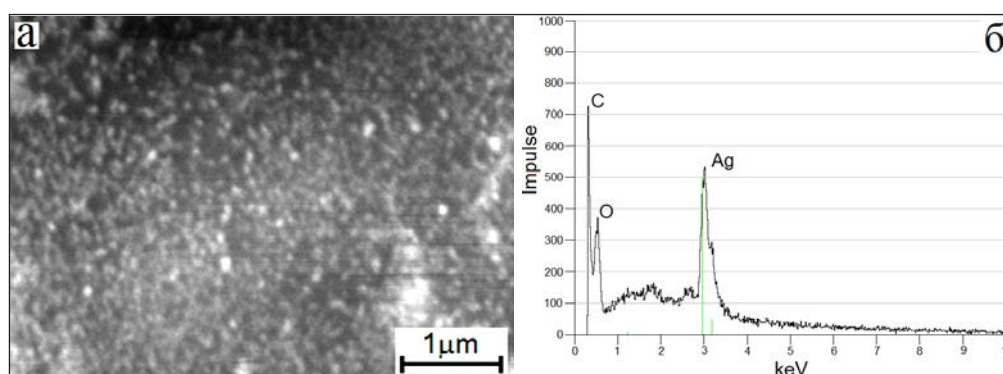


Рис. 2. СЕМ-зображення зламу зразка Ag(0)/пГЕМА-пр-ПВП композита (а) та спектр ЕДА поверхні наповнювача (б) (ГЕМА:ПВП:Р_{ОВС}=80:20:100 мас. ч.; [AgNO₃] = 0,11 моль/л, T₀=25°C)

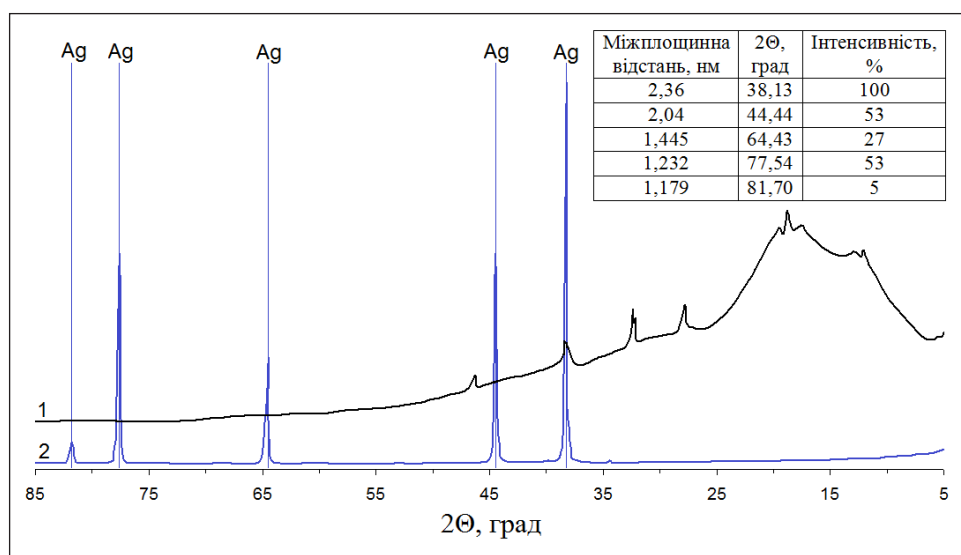


Рис. 3. Дифрактограми Ag(0)/пГЕМА-пр-ПВП композитів: 1 – до термообробки; 2 – після термообробки

рентгеноструктурний аналіз одержаних композитів (рис. 3, крива 1).

Однак, аналізуючи отриману рентгенограму, можемо зауважити, що на кривій відсутні піки, які відповідають нуль-валентному металу. Можна припустити, що під час синтезу утворюється рентгеноаморфне срібло, яке не проявляється на рентгенограмах. Для підтвердження висунутого припущення проведено рентгеноструктурний аналіз зразка після його термообробки (рис. 3, крива 2). Як бачимо, після рекристалізації з'являються піки, характерні Ag(0). Враховуючи той факт, що зразки для аналізу використовувалися відмитими від залишків окисника, відновника та продуктів реакції відновлення, можемо зробити висновок, що піки, характерні Ag(0), з'явилися після рекристалізації рентгеноаморфного металу, одержаного хімічним відновленням Ag⁺ під час полімеризації.

Задля підтвердження перебігу реакції з передачею кінетичного ланцюга на макромолекулу ПВП та утворення прищепленого кополімеру під час полімеризації ГЕМА в присутності ПВП з одночасним хімічним відновленням Ag⁺ були отримані й проаналізовані ІЧ-спектри ПВП, Ag(0)/пГЕМА-пр-ПВП композиту та Ag(0)/пГЕМА-пр-ПВП композиту, екстрагованого водою до повного видалення не прореагованого ПВП. Аналіз ІЧ-спектрів показує, що характеристичні смуги ПВП в областях 650 см⁻¹, 1 415 см⁻¹, 1 480 см⁻¹ присутні в спектрі композиту, екстрагованого водою. Цей чинник вказує на наявність у кополімері ланцюгів ПВП.

Здатність набрякати й не розчинятись у воді та інших розчинниках, а також результати термогравіметричних досліджень свідчать про формування сіт-

частої просторовозшитої структури в одержаних композитах. Прищеплення ГЕМА до ПВП з утворенням сітчастого кополімеру підтверджене порівнянням результатів термогравіметричного (ТГ) та диференційного термічного (ДТА) аналізів суміші гомополімерів поліГЕМА та ПВП у співвідношенні 80:20 з попередньо отриманим хімічним осадженням Ag(0) (зразок 1) та кополімеру із співвідношенням вихідної композиції ГЕМА:ПВП:Р_{овс}=80:20:100, одержаного полімеризацією з одночасним відновленням Ag⁺ (зразок 2).

Аналізуючи криву ТГ суміші гомополімерів, можемо зробити висновок, що втрата маси зразка починається приблизно при температурі 423К, тоді як композит починає втрачати масу приблизно при 463К, що свідчить про його більш щиту структуру. На кривій ДТА для суміші спостерігається пік екзотермічного ефекту при 423–513К, який зі зростанням температури змінюється ендоефектом в області 513–573К, а в інтервалі температур 598–693К знову настає екзотермічний ефект. Термоокиснення полімеру при 423–513К відбувається за місцем третинних воднів ПВП, які найслабше пов'язані з макромолекулярними ланцюгами внаслідок відтягування електронної густини на атом азоту. На кривій ДТА кополімеру екзоефект в температурному інтервалі 423–513К майже відсутній, що вказує на те, що кополімер окислюється повільніше, ніж суміш.

Однак ендоефект в інтервалі температур 513–598К та екзоефект при 633–723К мають місце. Зміщення інтервалу екзотермічного ефекту на кривій ДТА в область високих температур пояснюється його більшою термічною стійкістю.

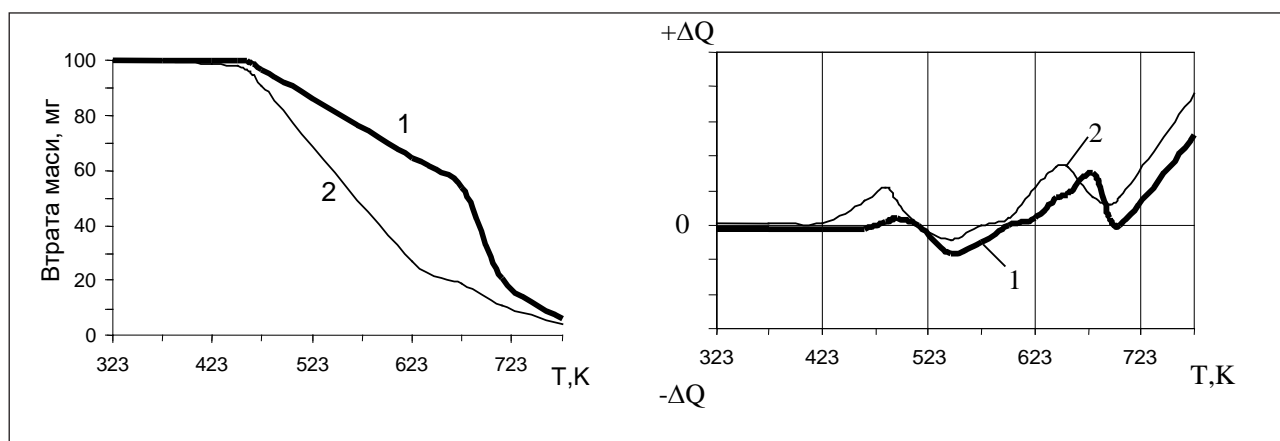


Рис. 4. ТГ (а) та ДТА (б) аналізи (ко)полімерів: 1 – Ag/пГЕМА-пр-ПВП композит (ГЕМА:ПВП:Р_{овс} = 80:20:10 мас.ч. [Ag] = 1,5 мас.%); 2 – суміш полі-ГЕМА/ПВП/Ag (полі-ГЕМА:ПВП = 80:20 мас.ч., [Ag] = 1,5 мас.%)

Таблиця 2

Бактерицидна та антифунгальна активність сріблорозповнених гідрогелів, одержаних на основі кополімерів ГЕМА з ПВП

| Тривалість зберігання гідрогелевих плівок | Величина зони затримки росту мікроорганізмів, мм | | | | |
|---|--|-----------------------|----------------------|----------------|--------------------|
| | <i>S. aureus</i> | <i>S. epidermidis</i> | <i>Str. viridans</i> | <i>E. coli</i> | <i>C. albicans</i> |
| 1 місяць | 12, 10, 9 | 12, 8, 9 | 11, 11, 9 | 3, 3, 0 | 11, 11, 7 |
| 18 місяців | 5, 4, 8 | 5, 4, 5 | 11, 8, 8 | – | 0, 4, 2 |

В лабораторних умовах кафедри мікробіології Львівського національного медичного університету імені Данила Галицького виконані медико-біологічні дослідження одержаних Ag(0)/пГЕМА-пр-ПВП композитів. Внаслідок порівняльного аналізу бактерицидних та антифунгальних властивостей ненаповнених та Ag(0)-наповнених гідрогелів щодо використаних мікроорганізмів встановлено, що ненаповнені гідрогелі не мають бактерицидних та антифунгальних властивостей. Водночас матеріали, які містять Ag(0), блокують ріст бактерій та грибів (табл. 2).

Встановлено, що бактерицидні та антифунгальні властивості сріблорозповнених гідрогелів за умови зберігання в дистильованій воді з часом погіршуються та зникають відносно бактерій *Escherichia coli*.

Висновки. Встановлено можливість одержання Ag(0)/пГЕМА-пр-ПВП-композитів та їх гідрогелів

полімеризацією з одночасним хімічним відновленням Ag⁺ за використання екзо ефекту реакції полімеризації. Запропонований метод забезпечує осадження срібла без попереднього нагрівання полімер-мономерної композиції. Розроблені композиції відзначаються високою реакційною здатністю й можуть отверджуватись на повітрі за кімнатної температури протягом 10–40 хвилин з максимальною температурою екзотермії 70–121°C. Одержані матеріали характеризуються гомогенністю структури, наповнені наночастинками Ag(0), розмір яких перебуває в межах 100 нм. Підтверджено утворення полімерної матриці на основі прищепленого сітчастого кополімеру ГЕМА з ПВП. На прикладі тест-культур бактерій *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, *Staphylococcus epidermidis*, *Streptococcus viridans* та диплоїдного грибка *Candida albicans* підтверджено бактерицидні та антифунгальні властивості одержаних сріблорозповнених гідрогелів.

Список літератури:

1. Enas M.A. Hydrogel: Preparation, characterization, and applications. *Journal of Advanced Research*. 2015. № 6. P. 105–121.
2. Suberlyak O., Skorokhoda V. Hydrogels Based on Polyvinylpyrrolidone Copolymers. *Hydrogels. InTechOpen*. 2018. P. 136–214.
3. Nicolais L., Carotenuto G. Metal-Polymer Nanocomposites. John Wiley & Sons, 2004. 320 p.

4. Garcia-Astrain C., Chen Ch., Burón M. et al. Biocompatible hydrogel nanocomposite with covalently embedded silver nanoparticles. *Biomacromolecules*. 2015. Vol. 16. № 4. P. 1301–1310.
5. Franci G., Falanga A., Galdiero S. et al. Silver nanoparticles as potential antibacterial agents. *Review. Molecules*. 2015. Vol. 20. № 5. P. 8856–8874.
6. Skorokhoda V., Semenyuk N., Dziaman I., Suberlyak O. Mineral filled porous composites based on polyvinylpyrrolidone copolymers with bactericidal properties. *Chemistry & Chemical Technology*. 2016. Vol. 10. № 2. P. 187–192.
7. Булатова Р.Р., Бакеева И.В. Нанокompозитные гели. *Вестник МИТХТ*. 2011. Т. 6. № 1. С. 3–21.
8. Suberlyak O., Grytsenko O., Hischak Kh. Influence of the metal surface of powder filler on the structure and properties of composite materials based on the co-polymers of methacrylates with polyvinylpyrrolidone. *Materials Science*. 2016. № 52 (2). P. 155–164.
9. Гресь О.В., Лебедєв Є.В., Матюшов В.Ф. Срібловмісні полімерні нанокompозити. *Полімерний журнал*. 2008. Т. 30. № 3. С. 186–191.
10. Shmakov S.N. Synthesis and properties of silver nanoparticles stabilized by polymers. *Abstr. III Int. Specialty polymers for environmentprotection, bio-, nanotechnology and medicine*. Almaty, 2008. P. 14.
11. Reactive Hydrogel Networks for Fabrication of Metal-Polymer Nanocomposites / I. Tarnavchyk, A. Voronov, A. Kohut, N. Nosova, S. Varvarenko et al. *Macromolecular Rapid Communications*. 2009. Vol. 30. № 18. P. 1564–1569.
12. Коваль Ю.Б., Гриценко О.М., Суберляк О.В., Волошкевич П.П. Встановлення температурного режиму одержання металогідрогелів полівінілпіролідону на стадії полімеризації. *Вісник НУ «Львівська політехніка»*. 2015. № 812. С. 372–378.
13. Grytsenko O., Pokhmurska A., Suberliak S. et al. Technological features in obtaining highly effective hydrogel dressings for medical purposes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 6. No. 6 (96). P. 6–13.
14. Суберляк О.В., Курило М.С., Шекета М.Л. Термометрические исследования блочной трехмерной полимеризации композиций на основе 2-ОЭМА. *Вестник Львовского политехнического института*. 1982. № 163. С. 41–43.
15. Suberlyak O., Skorokhoda V., Grytsenko O. Complex PVP-Meⁿ⁺ – active catalyst of vinyl monomers polymerization. *Materialy polimerowe i ich przetworstwo*. 2004. № 1. P. 140–145.

ОСОБЕННОСТИ СИНТЕЗА И СТРУКТУРА Ag(0)/ПГЕМА-ПР-ПВП НАНОКОМПОЗИТОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ПОЛИМЕРИЗАЦИЕЙ С ОСАЖДЕНИЕМ МЕТАЛЛА

В статье исследованы особенности получения Ag(0)-наполненных сополимеров 2-гидроксиэтилметакрилата с поливинилпирролидоном методом полимеризации с одновременным восстановлением Ag⁺. Температурные условия, необходимые для химического восстановления, достигаются за счет тепла, которое выделяется при экзотермической реакции полимеризации. Использование комбинированной иницирующей системы FeSO₄/ПБ позволяет осуществлять процесс при комнатной температуре, на воздухе. Подтверждено образование полимерной матрицы на основе привитого сетчатого сополимера. Полученные Ag(0)-наполненные композиты и гидрогели характеризуются бактерицидными и антифунгицидными свойствами.

Ключевые слова: серебро, поливинилпирролидон, 2-гидроксиэтилметакрилат, гидрогели, серебрянонаполненные гидрогели, наночастицы, металлополимерные композиты.

SYNTHESIS FEATURES AND STRUCTURE OF Ag(0)/PHEMA-GR-PVP NANOCOMPOSITES OBTAINED BY POLYMERIZATION WITH METAL DEPOSITION

In the article, the features of obtaining Ag (0)-filled co-polymers of 2-hydroxyethylmethacrylate with polyvinylpyrrolidone through the polymerization with simultaneous Ag⁺ reduction are investigated. Temperature conditions needed for chemical reduction are achieved due to the heat, which releases during exothermic reaction of polymerization. The use of combined initiating system of iron (II) sulfate/benzoyl peroxide makes it possible to carry out the process at room temperature, in the open air. It is confirmed the formation of polymer matrix based on grafted net copolymer. Ag(0)-filled composites and hydrogels obtained are characterized by antibacterial and antifungal properties

Key words: silver, polyvinylpyrrolidone, 2-hydroxyethylmethacrylate, hydrogels, silver-containing hydrogels, nanoparticles, metal-polymeric composites.