

УДК: 620.22

DOI: 10.20535/iwccmm2026358156

ВПЛИВ РОЗМІРУ ЧАСТИНОК НЕОРГАНІЧНОЇ СКЛАДОВОЇ НА РЕОЛОГІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ГІДРОКСИПАТИТ/ХІТОЗАН

Синиця А.О.¹, Іванченко С.Е.², Сич О.Є.³

¹PhD, старший науковий співробітник відділу функціональних матеріалів медичного призначення, Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, Київ, Україна

²Кандидат технічних наук, старший науковий співробітник відділу фізико-хімії і технології наноструктурної кераміки та нанокомпозитів, Інститут проблем матеріалознавства ім.

І.М. Францевича НАН України, Київ, Україна

³Кандидат технічних наук, завідувач відділу функціональних матеріалів медичного призначення, Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, Київ, Україна

e-mail: 1. synytsia.ann@gmail.com; 2. s.ivanchenko@ipms.kyiv.ua; 3. lena_sych@ukr.net

Анотація. Робота присвячена дослідженню реологічних властивостей композиційних матеріалів гідроксиapatит/хітозан (вміст хітозану 30 %) в залежності від розміру неорганічної складової. Встановлено, що незалежно від розміру наночастинок неорганічної складової, композити проявляють тиксотропну поведінку. Збільшення розміру частинок гідроксиapatиту від 9 до 40 нм сприяють збільшення в'язкості і зниження ступеня тиксотропії біокомпозитів.

Ключові слова: гідроксиapatит, хітозан, реологічні властивості, біокомпозит

Останніми роками спостерігається активний розвиток інноваційних композитних матеріалів на основі гідроксиapatиту (ГА), в яких керамічна фаза поєднується з полімерними матрицями для досягнення оптимального поєднання біологічних та механічних властивостей [1]. Такий інтерес зумовлено тим, що кісткова тканина людини – це природний біокомпозит, що складається з ~ 70% з неорганічної мінеральної фази (ГА) та ~ 30% з органічної матриці (колаген та інші біополімери) [2]. Таке поєднання відкриває широкий спектр можливостей щодо створення не лише скафордів для інженерії кісткової тканини, але і ін'єкційних матеріалів для малоінвазивного лікування в ортопедії та травматології [3]. Саме при створенні останніх важливу роль відіграють дослідження їх реологічних властивостей.

Тому метою даної роботи було дослідити вплив розміру частинок на реологічні властивості біокомпозитів ГА/хітозан.

Вихідними матеріалами був синтетичний ГА трьох типів з різним розміром частинок (Т1 – 9 ± 1 нм, Т3 – 16 ± 3 нм та Т6 – 42 ± 4 нм), отриманий гідротермальним мікрохвильовим синтезом різної тривалості [4], та комерційний хітозан Chitosan-50 ($(C_6H_{11}NO_4)_n$, $M=500.000$, Wako Pure Chemical Industries Ltd), який є природним полімером і може розглядатись як аналог колагену. Гелеподібний композит отримували гомогенізацією ГА в розчиненому хітозані.

Реологічні дослідження проводили за допомогою роторного віскозиметра Rheotest RN 4.1 (Rheotest Medingen, Німеччина) та вимірювальної системи циліндр-циліндр із зазором 1 мм між циліндрами. Для підтримки постійної температури 20 °С під час вимірювань використовували термостат Ministat 125 (Hauber, Німеччина).

Реологічні дослідження показали, що всі композити незалежно від дисперсності ГА мають сильну тиксотропну поведінку на початку вимірювань з певною точкою розриву, після якої плинність змінюється (рисунок 1). Тиксотропна поведінка течії зазвичай вказує на наявність розвиненої мережі полімерного ланцюга, елементи якої (клубки) розділяються, деформуються, а в деяких випадках розпадаються на дрібніші елементи під дією механічної сили. Для композиту ГА Т1/хітозан тиксотропна поведінка течії спостерігається до швидкості зсуву 280 c^{-1} , а від 280 до 550 c^{-1} зразок демонструє псевдопластичну поведінку течії, що вказує на розділення та зменшення взаємодії структурних елементів. В інтервалі $550-900 \text{ c}^{-1}$ спостерігається реопектична поведінка течії, що вказує на посилену взаємодію структурних

елементів, можливі зіткнення та незначне кластеризування, що дещо зменшує плинність. Від 900 до 1000 с⁻¹ матеріал повертається до псевдопластичної течії, що, ймовірно, вказує на повторне руйнування або деформацію структурних елементів.

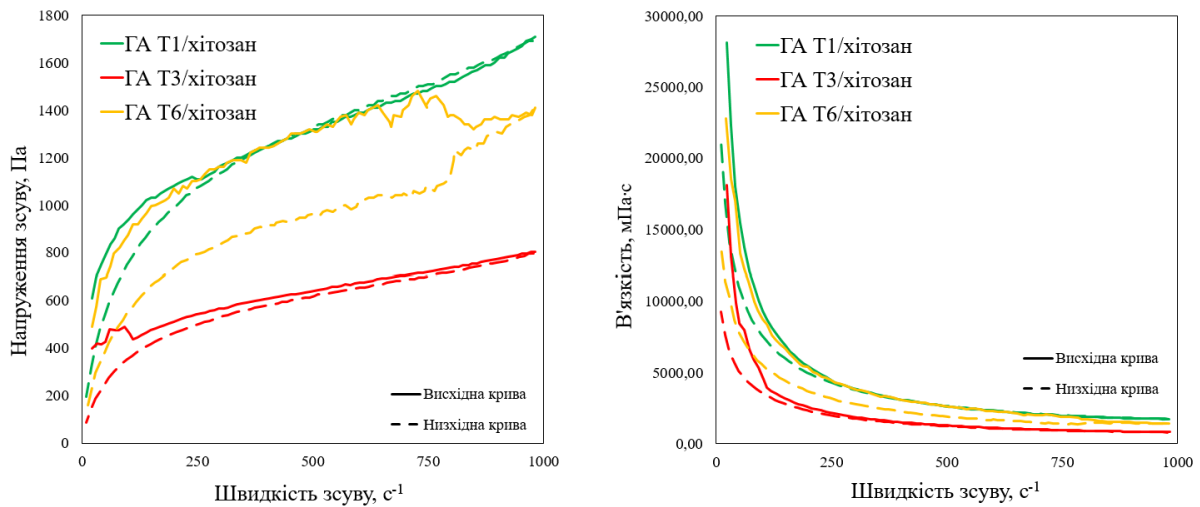


Рисунок 1 – Криві плинності та в'язкості біокompatитів на основі гідроксиапатиту та хітозану

Композит ГА Т3/хітозан демонструє тиксотропну поведінку протягом усього циклу вимірювання зі значним зниженням ступеня тиксотропії при 120 с⁻¹. ГА Т6/хітозан має подібну поведінку, але з вищою в'язкістю та зниженням ступеня тиксотропії при 850 с⁻¹. Крім того, саме останній демонструє найбільш розвинену структуру запутаного ланцюга, що потребує більшої частини зсуву для руйнування. Також крива плинності демонструє раптові сплески напруження зсуву, що, ймовірно, може вказувати на нерівномірність структури.

ВИСНОВКИ

Встановлено, що незалежно від розміру наночастинок неорганічної складової, композити гідроксиапатит/хітозан (вміст хітозану 30 %) проявляють тиксотропну поведінку. Збільшення розміру частинок гідроксиапатиту від 9 до 40 нм сприяє збільшенню в'язкості і зниженню ступеня тиксотропії композиційних матеріалів.

Подяка. Автори висловлюють щирю подяку Лабораторії наноструктур Інституту фізики високих тисків ПАН за проведення досліджень в рамках Договору про наукову співпрацю.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ielo, I., Calabrese, G., De Luca, G., Conoci, S. (2022) Recent advances in hydroxyapatite-based biocomposites for bone tissue regeneration in orthopedics. *Int J Mol Sci.* 23(17), 9721. <https://doi.org/10.3390/ijms23179721>
2. Dixon, D.T., Landree, E.N., Gomillion, C.T. (2024) 3D-Printed demineralized bone matrix-based conductive scaffolds combined with electrical stimulation for bone tissue engineering applications. *ACS Appl Bio Mater.* 7(7), 4366-4378. <https://doi.org/10.1021/acsabm.4c00236>
3. Piszko, P.J., Piszko, A., Kiryk, S., et al (2024) Bone regeneration capabilities of scaffolds containing chitosan and nanometric hydroxyapatite—systematic review based on in vivo examinations. *Biomimetics.* 9, 503. <https://doi.org/10.3390/biomimetics9080503>
4. Kuśnieruk, S., Wojnarowicz, J., Chodara, A., et al. (2016) Influence of hydrothermal synthesis parameters on the properties of hydroxyapatite nanoparticles. *Beilstein J. Nanotechnol.* 7, 1586–1601. <https://doi.org/10.3762/bjnano.7.153>