

УДК: 615.46:616-089

DOI: 10.20535/iwccmm2025326618

БІОРОЗКЛАДНІ ПОЛІМЕРИ З ГІДРОКСИПАТИТОМ ДЛЯ МЕДИЧНИХ ЦІЛЕЙ: СУЧАСНИЙ СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ

Антоніна ЛАЗЮТА,
Студентка 1 курсу магістратури, ХТФ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
antoninalazuta@gmail.com

Анотація. У роботі представлено огляд сучасних досягнень у створенні біорозкладних полімерних композитів з гідроксиапатитом (ГАП) для медичного застосування. Проаналізовано можливості поєднання синтетичних (PLA, PLGA, PCL, PEEK) та природних полімерів з гідроксиапатитом для створення матеріалів із покращеними механічними та біологічними властивостями. Особливу увагу приділено використанню наночастинок ГАП, природних джерел його синтезу, систем доставки лікарських засобів, імплантатів та 3D-друкованих каркасів для тканинної інженерії. Описано переваги модифікації полімерних матриць домішками Sr^{2+} , Zn^{2+} , Ag^+ , а також структурними добавками, такими як фтороапатит або графен. Підкреслено актуальні проблеми галузі — низька механічна стабільність деяких композитів, потреба в масштабованих технологіях 3D-друку та нестача клінічних досліджень. Матеріал буде корисним для фахівців у сфері біоматеріалів, ортопедії, регенеративної медицини та медичного матеріалознавства.

Ключові слова: біорозкладні полімери, гідроксиапатит, тканинна інженерія, імплантати, остеоінтеграція, системи доставки ліків.

У сучасній біомедичній інженерії значна увага приділяється створенню матеріалів, які є не лише біосумісними, а й біорозкладними, що особливо актуально для тимчасових імплантатів та систем доставки лікарських засобів. Поєднання біорозкладаних полімерів із гідроксиапатитом (ГАП, $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$) дозволяє розробити композитні матеріали, які імітують структуру та функції кісткової тканини, забезпечуючи одночасно міцність, остеоіндуктивність і контрольовану біодеградацію.

Метою цього огляду є узагальнення останніх наукових досягнень у створенні біорозкладних композитів на основі синтетичних і природних полімерів у поєднанні з гідроксиапатитом, із акцентом на їхню біосумісність, механічні властивості, біоактивність і перспективи клінічного застосування.

Гідроксиапатит, як головний неорганічний компонент кістки, забезпечує остеокондуктивність, остеоіндуктивність та біоактивність. У той же час, біорозкладні полімери – зокрема полі(молочна кислота) (PLA), полі(гліколева кислота) (PGA), полі(лактид-ко-гліколід) (PLGA), полі(ε-капролактон) (PCL) та поліефіретеркетон (PEEK) – широко використовуються завдяки своїй здатності до контрольованої деградації та оброблюваності. Поєднання цих двох компонентів дозволяє отримати матеріали з покращеними властивостями.

Композити на основі біорозкладних полімерів і гідроксиапатиту демонструють багатофункціональність, що дозволяє їх ефективно застосовувати в низці медичних напрямів. На рисунку 1 узагальнено основні сфери використання таких матеріалів у сучасній медицині. Зображення створено з використанням інструментів штучного інтелекту спеціально для ілюстрації цього оглядового дослідження.

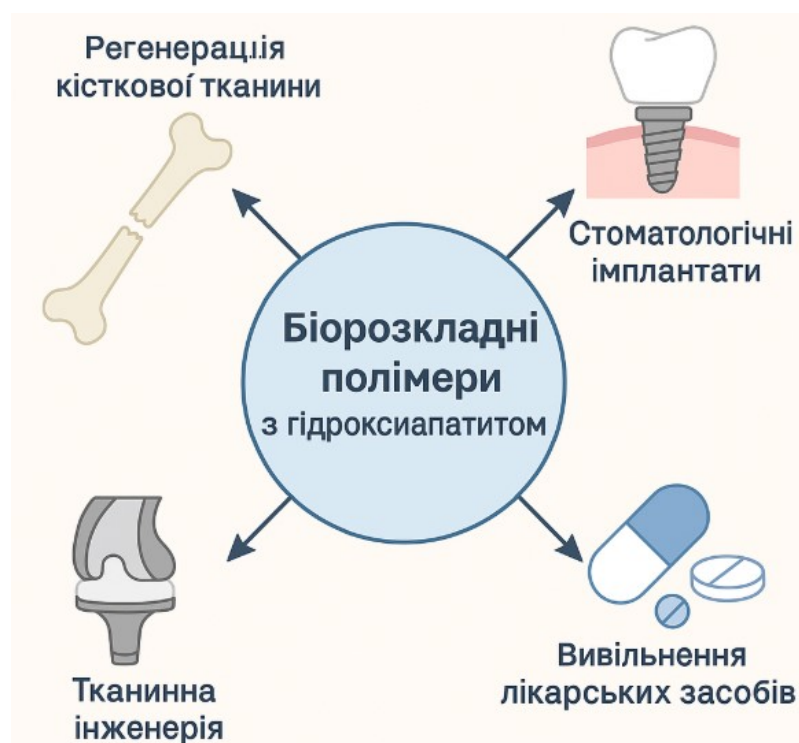


Рис. 1. Основні напрями медичного застосування біорозкладних полімерів з гідроксиапатитом (створено за допомогою ШІ)

Згідно з оглядом Oleksy et al. (2023), наночастинки гідроксиапатиту позитивно впливають на адгезію остеобластів, адсорбцію білків та покращення

механічної міцності композиту, особливо при високому аспектному співвідношенні частинок [1].

Композити на основі PLA/ГАП відзначаються високою біосумісністю *in vivo*. Наявність ГАП у матриці також нейтралізує кислі продукти деградації PLA, що дозволяє уникнути запальних процесів у тканинах [1]. Подальше вдосконалення таких матеріалів привело до створення композитів на основі PLGA з наногідроксиапатитом, легованим іонами цинку (Zn^{2+}) і стронцію (Sr^{2+}), які сприяють остеointegraції та проявляють добру механічну стабільність [2].

Окремий напрям – біорозкладні магнієві композити з наногідроксиапатитом і фторапатитом (FA). Такі системи демонструють покращену біоактивність, зменшену корозійну чутливість, формування апатитного шару, збагаченого фтором, а також високу цитосумісність *in vivo* [3].

Поряд із PLA та PLGA, велике значення має PEEK – термостійкий полімер із високою механічною міцністю, який, проте, має обмежену біоактивність через гідрофобність. Введення гідроксиапатиту, оксиду графену (GO), TiO_2 або MgO дозволяє значно покращити адгезію клітин та біоактивність матеріалу [4-6]. Наприклад, у композиті PEEK/ГАП/GO, обробленому лазером для створення макропористої поверхні (60–200 мкм), було досягнуто суттєвого покращення інтеграції з кістковою тканиною без втрати механічної стабільності [6].

Останні тенденції також передбачають використання природного гідроксиапатиту, отриманого з риб'ячих лусок, шкаралупи яєць або кісток морських організмів. Такий біогенний ГАП зберігає іони Mg^{2+} і Sr^{2+} , що є важливими для остеогенезу та забезпечує високу біоактивність [1].

У сфері систем доставки ліків ГАП використовують як матрицю для контрольованого вивільнення антибіотиків (наприклад, гентаміцину, ванкоміцину). Було встановлено, що ступінь вивільнення досягає 94–96% за 10 днів, що є позитивним показником пролонгованої дії [1]. Також ГАП

демонструє високу ефективність як носій ДНК у генній терапії: рівень трансфекції перевищує 80%, а енкапсуляція – 85% [1].

У тканинній інженерії активно розробляються 3D-друковані каркаси на основі PCL/ГАП та PLGA/ГАП. Наприклад, PCL/ГАП (70/30 мас.%) використовується для створення пористих решіток із високою біомеханічною ефективністю, а PLGA/ГАП – для отримання матеріалів із високою пористістю та остеоіндуктивністю [1].

Не менш важливою є антибактеріальна активність гідроксиapatиту, модифікованого іонами срібла. Концентрація срібла 0,5 мас.% забезпечує виражену бактерицидну дію без проявів цитотоксичності, що критично для імплантаційних виробів [1].

Отже, біорозкладані полімери з гідроксиapatитом демонструють високий потенціал як структурно-функціональні матеріали для медицини. Вони забезпечують сумісність із тканинами, остеокондуктивність, керовану деградацію та можливість доставки лікарських речовин.

ВИСНОВКИ

Огляд свідчить, що значні досягнення вже зроблені у сфері створення біоактивних, біорозкладаних полімерних композитів з гідроксиapatитом. Водночас залишаються певні наукові прогалини:

- необхідність підвищення механічної стабільності матеріалів при тривалій експлуатації;
- потреба в оптимізації методів синтезу природного ГАП;
- удосконалення 3D-друку складних багатошарових конструкцій;
- розвиток тераностичних систем на основі ГАП (поєднання діагностики та терапії);
- дослідження довготривалої біосумісності та імунної відповіді в організмі.

Подальші міждисциплінарні дослідження дадуть змогу створити нове покоління матеріалів для регенеративної медицини, що поєднуюватимуть екологічність, функціональність і клінічну ефективність.

Список літератури:

1. Oleksy, M., Dynarowicz, K., & Aebisher, D. (2023). Advances in biodegradable polymers and biomaterials for medical applications—A review. *Molecules*, 28(17), 6213. <https://doi.org/10.3390/molecules28176213>
2. Hassan, M., Sulaiman, M., Rehman, I. U., et al. (2022). Biomimetic PLGA/Strontium-Zinc Nano hydroxyapatite composite scaffolds for bone regeneration. *Journal of Functional Biomaterials*, 13(1), 13. <https://doi.org/10.3390/jfb13010013>
3. Vidal, C., Alves, P., Carmezim, M. J., et al. (2022). Fabrication of a biodegradable and cytocompatible magnesium/nanohydroxyapatite/fluorapatite composite by upward friction stir processing. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 129, 105137. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2022.105137>
4. Zheng, J., Kang, J., Sun, C., et al. (2021). Effects of printing path and material components on mechanical properties of 3D-printed polyether-ether-ketone/hydroxyapatite composites. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 118, 104475. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2021.104475>
5. Chakraborty, T., Das, A., Biswas, B., et al. (2022). Hydroxyapatite dispersed sulphonated PEEK composite membrane: Synthesis, structural and mechanical characterization. *Journal of Process Mechanical Engineering*, 236(5), 1869–1876. <https://doi.org/10.1177/09544089221076799>
6. Huang, Z., Wan, Y., Zhu, X., et al. (2021). Simultaneous engineering of nanofillers and patterned surface macropores of graphene/hydroxyapatite/polyetheretherketone ternary composites for potential bone implants. *Materials Science and Engineering: C*, 123, 111967. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2021.111967>

References:

1. Oleksy, M., Dynarowicz, K., & Aebisher, D. (2023). Advances in biodegradable polymers and biomaterials for medical applications—A review. *Molecules*, 28(17), 6213. <https://doi.org/10.3390/molecules28176213>
2. Hassan, M., Sulaiman, M., Rehman, I. U., et al. (2022). Biomimetic PLGA/Strontium-Zinc Nano hydroxyapatite composite scaffolds for bone regeneration. *Journal of Functional Biomaterials*, 13(1), 13. <https://doi.org/10.3390/jfb13010013>
3. Vidal, C., Alves, P., Carmezim, M. J., et al. (2022). Fabrication of a biodegradable and cytocompatible magnesium/nanohydroxyapatite/fluorapatite composite by upward friction stir processing. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 129, 105137. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2022.105137>
4. Zheng, J., Kang, J., Sun, C., et al. (2021). Effects of printing path and material components on mechanical properties of 3D-printed polyether-ether-ketone/hydroxyapatite composites. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 118, 104475. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2021.104475>
5. Chakraborty, T., Das, A., Biswas, B., et al. (2022). Hydroxyapatite dispersed sulphonated PEEK composite membrane: Synthesis, structural and mechanical characterization. *Journal of Process Mechanical Engineering*, 236(5), 1869–1876. <https://doi.org/10.1177/09544089221076799>

6. Huang, Z., Wan, Y., Zhu, X., et al. (2021). Simultaneous engineering of nanofillers and patterned surface macropores of graphene/hydroxyapatite/polyetheretherketone ternary composites for potential bone implants. *Materials Science and Engineering: C*, 123, 111967. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2021.111967>

BIODEGRADABLE POLYMERS WITH HYDROXYAPATITE FOR MEDICAL PURPOSES: CURRENT STATUS AND PROSPECTS OF APPLICATION

Antonina LAZYUTA

PhD student, Chemical technologies Faculty,
Igor Sikorsky Kyiv Politechnic Institute

Abstract. *This paper presents a review of current advancements in the development of biodegradable polymer composites with hydroxyapatite (HAp) for medical applications. The combination of synthetic (PLA, PLGA, PCL, PEEK) and natural polymers with HAp is analyzed in terms of improving mechanical and biological performance. Special attention is given to the use of HAp nanoparticles, natural sources of HAp, drug delivery systems, implants, and 3D-printed scaffolds for tissue engineering. The review highlights the advantages of matrix modifications with Sr^{2+} , Zn^{2+} , and Ag^+ ions, as well as structural additives such as fluorapatite and graphene. Key challenges are also discussed, including limited mechanical stability of some composites, the need for scalable 3D printing technologies, and the lack of comprehensive clinical studies. The material is relevant for professionals in biomaterials science, orthopedics, regenerative medicine, and biomedical engineering.*

Keywords: *biodegradable polymers, hydroxyapatite, tissue engineering, implants, osteointegration, drug delivery systems.*