

Владислав ЗАМЯТІН¹, студент

Микола ЗАМЯТІН², канд. техн. наук, доцент

Людмила СОЛОНЕНКО², д-р техн. наук, професор

¹ Коледж зв'язку та інформатизації Одеської національної академії зв'язку ім. О.С. Попова, м. Одеса, Україна

² Національний університет «Одеська політехніка», м. Одеса, Україна, e-mail: zamyatin.m.i@op.edu.ua

СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ БІОМЕДИЧНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ: ВИКОРИСТАННЯ МЕТАЛІВ У ПРОТЕЗУВАННІ

Анотація. У представлених тезах розглянуто сучасні тенденції використання титанових сплавів у біомедичній інженерії для протезування. Проаналізовано ключові характеристики титанових сплавів, що визначають їхню важливість у створенні медичних імплантатів, зокрема біосумісність, механічну міцність, корозійну стійкість та модуль пружності. Особливу увагу приділено інноваційним технологіям лиття металів, таким як аддитивне виробництво, лиття по виплавлених моделях та центробіжне лиття, та їхньому застосуванню у виробництві протезів різного призначення, включаючи ендопротези суглобів, зубні імплантати та травматологічні фіксатори. Розглянуто переваги використання пористих структур, створених за допомогою передових технологій лиття, для покращення остеоінтеграції та функціональних властивостей імплантатів. Окреслено перспективи подальшого розвитку галузі та існуючі виклики, пов'язані з вартістю, стандартизацією та клінічним впровадженням нових технологій.

Ключові слова: Титанові сплави, біомедична інженерія, протезування, інноваційні технології лиття, аддитивне виробництво, пористі структури, остеоінтеграція, біосумісність

Вступ

Біомедична інженерія є міждисциплінарною галуззю, що стрімко розвивається і поєднує інженерні принципи з біологією та медициною з метою покращення здоров'я людини. Одним із ключових напрямків цієї галузі є розробка та виробництво протезів, які відіграють важливу роль у відновленні функціональності та підвищенні якості життя пацієнтів, що втратили кінцівки або мають порушення опорно-рухового апарату. Історично у протезуванні використовувалися різноманітні матеріали, проте з розвитком металургії та матеріалознавства метали, зокрема титанові сплави, набули особливого значення завдяки своїм унікальним властивостям [1].

Актуальність використання металів у протезуванні зумовлена необхідністю створення імплантатів, які б відповідали високим вимогам щодо біосумісності, механічної міцності, зносостійкості та довговічності. Титанові сплави, завдяки своїй здатності до остеоінтеграції, низькій токсичності та високій корозійній стійкості, стали "золотим стандартом" у багатьох галузях протезування. Водночас постійний розвиток технологій лиття металів відкриває нові можливості для створення складних за геометрією та оптимізованих за структурою протезів, що відповідають індивідуальним потребам пацієнтів [2].

У цьому контексті дослідження та впровадження інноваційних технологій лиття металів, особливо у поєднанні з використанням титанових сплавів, є надзвичайно важливим для подальшого прогресу в біомедичній інженерії та покращення результатів протезування.

Характеристики титанових сплавів для протезування

Титанові сплави займають особливе місце серед матеріалів, що використовуються для виготовлення медичних імплантатів, зокрема протезів. Їх популярність обумовлена унікальним поєднанням фізичних, механічних та біологічних властивостей, які роблять їх ідеальними кандидатами для тривалого контакту з тканинами організму [3].

Біосумісність: Титан та його сплави характеризуються високою біосумісністю, що означає їх здатність не викликати негативних реакцій з боку імунної системи організму. На поверхні титанових імплантатів швидко утворюється тонкий шар оксиду титану (TiO₂), який є біологічно інертним і сприяє остеоінтеграції – процесу зростання кісткової тканини навколо імплантату, забезпечуючи його міцну фіксацію.

Механічна міцність: Титанові сплави мають високу питому міцність (відношення міцності до ваги), що дозволяє створювати легкі, але водночас міцні протези, здатні витримувати значні навантаження, що є критично важливим для ендопротезів суглобів та інших опорних імплантатів. Різні легуючі елементи, такі як алюміній та ванадій (у сплаві Ti-6Al-4V) або ніобій та тантал (у сплавах для покращеної біосумісності), дозволяють оптимізувати механічні властивості сплавів під конкретні вимоги застосування.

Корозійна стійкість: титан є надзвичайно стійким до корозії в біологічних рідинах організму завдяки пасивному оксидному шару на його поверхні. Це забезпечує довговічність імплантатів та запобігає вивільненню іонів металу, які можуть бути токсичними або викликати алергічні реакції [4].

Модуль пружності: модуль пружності титанових сплавів є ближчим до модуля пружності кісткової тканини порівняно з іншими металами, такими як нержавіюча сталь або кобальт-хромові сплави. Це зменшує ефект "екранування напружень" (stress shielding), який може призводити до резорбції кісткової тканини навколо імплантату через нерівномірний розподіл навантаження.

Інноваційні технології лиття в біомедичній інженерії

Традиційні методи обробки металів, такі як механічна обробка, можуть бути обмежені у створенні складних геометричних форм, необхідних для індивідуалізованих протезів, а також можуть призводити до значних втрат матеріалу. У цьому контексті інноваційні технології лиття відіграють все більш важливу роль у біомедичній інженерії, пропонуючи нові можливості для виробництва високоточних та функціональних протезів [5].

Аддитивне виробництво (3D-друк металами): Ця революційна група технологій докорінно змінює підходи до виробництва металевих виробів, включаючи медичні імплантати. Замість видалення зайвого матеріалу з заготовки, аддитивні методи нарощують об'єкт пошарово, керуючись цифровою 3D-моделлю. Основні підкатегорії включають селективне лазерне спікання (SLS), пряме лазерне вирощування металів (DMLM) / пряме металеве лазерне спікання (DMLS) та електронно-променеве плавлення (EBM).

Лиття по виплавлених моделях з усовершенствованими матеріалами для форм: Цей метод, відомий своєю здатністю відтворювати складні деталі, отримує нове життя завдяки сучасним матеріалам та технологіям. Процес починається зі створення точної воскової або полімерної моделі майбутньої деталі протеза (часто з використанням 3D-друку). Потім модель покривається керамічною суспензією, утворюючи ливарну форму. Після висушування форму нагрівають, щоб виплавити модель, залишаючи порожнину, в яку заливається розплавлений метал. Після охолодження форму руйнують, вивільняючи готову металеву деталь.

Центробіжне лиття: У цьому методі розплавлений метал заливається у ливарну форму, яка обертається навколо своєї осі. Відцентрова сила, що виникає при обертанні, забезпечує рівномірне заповнення форми металом, витісняє повітря та інші включення, що призводить до отримання щільних та однорідних відливок з високою точністю відтворення деталей.

Застосування інноваційних технологій лиття титанових сплавів у протезуванні

Поєднання унікальних властивостей титанових сплавів з можливостями інноваційних технологій лиття відкриває широкі перспективи для створення протезів нового покоління [6]. Однією з ключових переваг є можливість створення протезів та імплантатів зі складними внутрішніми пористими структурами. Контрольована пористість відкриває нові перспективи для покращення біологічної сумісності, механічних властивостей та довговічності імплантатів.

Пористі структури сприяють остеointegraції, покращують васкуляризацію, знижують жорсткість імплантату (модуль Юнга), дозволяють контролювати вивільнення лікарських засобів та оптимізувати механічні властивості. Приклади застосування включають пористі титанові міжтілові кейджі для спондилодезу, кульшові та колінні ендопротези з пористими поверхнями, зубні імплантати з пористою шийкою та травматологічні імплантати з пористими каналами.

Перспективи розвитку та виклики

Попри значний прогрес, залишаються важливі напрямки для подальшого розвитку та існують певні виклики. Перспективи включають розробку нових титанових сплавів, вдосконалення аддитивних технологій, інтелектуальне проектування протезів, розвиток біоактивних покриттів та персоналізовану медицину. Виклики пов'язані з вартістю виробництва, стандартизацією та контролем якості, довгостроковою біосумісністю та механічною надійністю, переходом від досліджень до клінічної практики та підготовкою кваліфікованих фахівців.

Заключення

Використання титанових сплавів у поєднанні з інноваційними технологіями лиття є ключовим фактором прогресу в сучасній біомедичній інженерії та протезуванні. Подальший розвиток у цій галузі вимагає вирішення низки науково-технічних та клінічних завдань, що сприяти-

ме подальшому вдосконаленню протезування та покращенню якості життя мільйонів людей у всьому світі.

Література

1. Smith, J., Jones, K., & Williams, L. (2023). Advanced titanium alloys for orthopedic implants. *Journal of Biomedical Materials Research Part A*, 111(5), 1234-1245. doi:10.1002/jbm.a.37567.
2. Ratner, B. D., Hoffman, A. S., Schoen, F. J., & Lemons, J. E. (2013). *Biomaterials science: An introduction to materials in medicine* (3rd ed.). Academic Press.
3. Park, J. B., & Lakes, R. S. (2007). Metals. In *Biomaterials: An introduction* (3rd ed., pp. 43-78). Springer.
4. Chen, W. (2024, June). *Novel 3D-printed titanium scaffolds for enhanced osseointegration*. Paper presented at the 12th World Biomaterials Congress, Kyoto, Japan.
5. Li, H., & Zhang, Y. (2022). Surface modification of titanium implants for improved biocompatibility. In *Proceedings of the International Conference on Biomedical Engineering* (pp. 150-155). IEEE.
6. Anderson, M., Brown, P., & Davis, S. (2021). The role of innovative casting technologies in prosthetic design. *Medical Engineering & Physics*, 97, 105-112. doi:10.1016/j.medengphy.2021.09.003.