

УДК 616-71

БІОБЕЗПЕКА ОТРИМАННЯ ТА ВИКОРИСТАННЯ ТИТАНОВИХ ІМПЛАНТІВ, ПОКРИТИХ ГІДРОКСИПАТИТОМ

Цуркан Артем Андрійович
a.tsurkan.zf41mp.fbmi25@lil.kpi.ua

Бесараб Олександр Борисович
besarab@lil.kpi.ua

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»
м. Київ, Україна

Анотація – Титанові імпланти активно застосовуються в ортопедії та стоматології завдяки високій біосумісності, корозійній стійкості та міцності. Однак сам титан не стимулює кісткоутворення, тому його поверхню покривають гідроксиапатитом, який сприяє остеоінтеграції та формуванню нової кісткової тканини. Якість матеріалів є критичною для безпеки імплантів. Домішки у титані чи гідроксиапатиті можуть спричинити запальні реакції або відторгнення. Особливо важливим є надійне зчеплення гідроксиапатиту з титановою основою — слабка адгезія може призвести до відшарування покриття. Нанесення антибактеріальних шарів знижує ризик інфекцій, а рівномірність покриття впливає на довговічність і стабільність імпланту.

Метою дослідження є комплексна оцінка біобезпеки титанових імплантів із гідроксиапатитовим покриттям, включно з контролем якості матеріалів, аналізом механічних і біологічних властивостей покриття, підвищенням ефективності остеоінтеграції та зменшенням ризиків інфекційних ускладнень.

Чистота гідроксиапатиту та титану є визначальною для біосумісності. Домішки важких металів у гідроксиапатиті можуть бути токсичними, а неякісний титан знижує стійкість до корозії. Найкращі результати показав сплав Ti-6Al-4V. Плазмове напилення забезпечує високу адгезію покриття, хоча нерівномірність нанесення залишається проблемою. Перспективними є також електрофоретичне осадження та метод золь-гелевого занурення, які забезпечують добру якість покриття. Мікропориста структура гідроксиапатиту стимулює прикріплення остеобластів, покращує васкуляризацію та прискорює регенерацію кістки. Водночас, нерівномірність шару може призводити до його відшарування, що негативно впливає на імплант і викликає запальні процеси. Сучасні технології, зокрема 3D-друк, дають змогу персоналізувати імпланти відповідно до анатомічних особливостей пацієнта. Однак вони потребують ретельного контролю готової продукції, щоб уникнути потрапляння сторонніх частинок в організм та гарантувати безпечну інтеграцію.

Ключові слова: імплант, гідроксиапатит, титан, плазмове напилення, біобезпека

I. ВСТУП

На сьогоднішній день медицина стрімко розвивається, пропонуючи нові підходи до лікування різноманітних захворювань, а також удосконалюючи методи заміни пошкоджених або втрачених органів і тканин. Одним із ключових досягнень сучасної науки є використання титанових імплантів, які успішно застосовуються в стоматології, ортопедії, травматології, нейрохірургії та багатьох інших медичних напрямках. Їх унікальні властивості, такі як висока біосумісність, міцність, стійкість до корозії та тривалий термін служби, роблять титан ідеальним матеріалом для медичних імплантів.

В Україні виробництво титанових імплантів тільки набирає оберти. Більшість

імплантів імпортується з інших країн, що значно підвищує їх вартість та створює залежність від зовнішніх ринків. У той же час Україна володіє одним із найбільших у світі запасів титанових руд і має потужний потенціал для розвитку власного виробництва титанових імплантів. Це не лише задовольнило б внутрішній попит, але й відкрило б нові можливості для експорту на міжнародні ринки. Створення виробництва титанових імплантів в Україні є не лише економічно доцільним, але й стратегічно важливим кроком для забезпечення доступності високоякісних медичних послуг. Власне виробництво сприятиме зниженню собівартості імплантів, підвищенню конкурентоспроможності української медицини та розвитку

високотехнологічних галузей промисловості. Окрім того, це створить нові робочі місця, залучить інвестиції та стимулюватиме розвиток наукових досліджень у сфері біоінженерії та матеріалознавства.

Використання титанових імплантів з покриттям з гідроксиапатиту може підвищити остеоінтеграцію імплантів, та покращення реабілітаційного процесу для пацієнтів, кількість котрих в Україні, нажал, неуклінно зростає.

II. МЕТА РОБОТИ

Метою роботи є оцінка можливості використання порошку гідроксиапатиту кальцію при виготовленні індивідуальних титанових імплантів для покращення остеоінтеграції.

III. БІОБЕЗПЕКА В ІМПЛАНТАЦІЯХ

Біобезпека – це комплекс заходів, спрямованих на запобігання загрозам біологічного характеру по відношенню до здоров'я людини. В контексті імплантів, біобезпека спрямована на мінімізацію ризиків, що можуть виникнути як від імпланту так і під час процесу імплантації.

Основними аспектами, яких необхідно дотримуватися, при імплантації титанових імплантів є чистота матеріалу виготовлення, тобто відсутність токсичних домішок в титановому сплаві та запобігання бактеріальній колонізації імпланту, що дуже важливо для профілактики перипротезних інфекцій.

Використання додаткових покриттів, будь то гідроксиапатит, спрямований на підвищення остеоінтеграції імпланту та збільшенню контакту імплант-кістка, чи використання інших, наприклад антибактеріальних покриттів по типу іонів стрібла, для зниження ризиків інфекціювання зони дефекту, створюють необхідність у додатковому контролі аспекту біобезпеки[1].

Використання титанових імплантів

Титанові імплантати займають ключову позицію в сучасній медичній практиці, особливо в ортопедії, стоматології та

щелепно-лицевій хірургії. Їхні унікальні властивості, такі як висока міцність, корозійна стійкість та біосумісність, роблять титан ідеальним матеріалом для імплантації.

Проте, питання біобезпеки цих конструкцій залишається надзвичайно важливим, адже взаємодія матеріалу з біологічними тканинами може визначати довговічність імплантату та успішність його інтеграції в організм пацієнта. З кожним роком технології створення імплантатів вдосконалюються, що дає змогу знизити ризики ускладнень і покращити результати лікування.

Імплантація титанових виробів широко використовується в медицині для заміни або відновлення пошкоджених кісткових тканин. Завдяки біосумісності, титан не викликає сильних запальних реакцій та добре поєднується з кістковою тканиною.

Завдяки формуванню оксидної плівки на поверхні імпланту, титан не викликає істотних запальних реакцій та відторгнення. Однак, з метою покращення остеоінтеграції та мінімізації ризиків розвитку інфекцій застосовують додаткові покриття.

Окремим аспектом біобезпеки є запобігання мікробному осіменінню імплантату, що може призвести до розвитку перипротезних інфекцій. Задля недопущення даних контамінацій, на виробництвах, що займаються виготовленням 3D-друкованих титанових імплантів, необхідно дотримуватися норм виробничої та лабораторної практики, з дотриманням зон чистоти та зберігання виробів.

Одним із перспективних методів вирішення проблеми перипротезних інфекцій є модифікація поверхні імплантатів антимікробними агентами, такими як срібло, цинк або мідь. Додавання цих елементів до складу покриттів допомагає знизити ризик бактеріального забруднення та підвищує успішність імплантації[1].

Біосумісність титанового порошку

Використання порошкової металургії та 3D-друку для виготовлення титанових імплантатів відкриває нові можливості для персоналізованої медицини, але водночас ставить нові виклики у сфері біобезпеки.

Титановий порошок, який застосовується у виробництві, може містити мікроскопічні частинки, що мають потенційну токсичність при вдиханні або контакті з біологічними тканинами. Дослідження показують, що дрібнодисперсні частинки можуть викликати запальні реакції або навіть призводити до довготривалих впливів на організм у разі їх проникнення в тканини[2].

Ключовими аспектами біобезпеки титанових порошоків є контроль їхньої чистоти, розміру частинок та відсутність домішок. Наприклад, залишковий вміст кисню, азоту чи вуглецю може впливати на біосумісність та механічні властивості готового імплантату. Для мінімізації ризиків використовуються вакуумні та інертні газові середовища при виробництві порошоків, що дозволяє уникнути небажаного окислення матеріалу.

Задля запобігання порушення біобезпеки, потрібно приділити достатню увагу при виборі постачальника для сировини. Постачальники з меншими цінами можуть не мати відповідних сертифікатів якості, при відсутності яких, гарантувати якість сировини неможливо.

Підвищення адгезії зі сторони імпланту

Адгезія – це процес зчеплення (злипання) приведених в контакт елементів, тобто, іншими словами це комплекс явищ, які здатні утворити зв'язки між матеріалами, що склеюються. Підвищення цього параметру збільшує шанси на вдале нанесення покриття на імплант.

Якість виготовленого імплантату може як позитивно так і негативно вплинути на адгезію. На відміну від лиття, де в результаті виробництва отримується литий виріб з мінімальною пористістю, завдяки можливостям 3D-друку та методу вибіркового лазерного спікання, виріб на фінальному етапі виробництва не є таким однорідним як після лиття. Завдяки поступовому друкуванню виробу, він вже з принтера має пористу структуру, котра після подальшої механічної обробки набуде необхідної, одночасно пористої та гладкої поверхні, для підвищення адгезії покриття,

що підвищує шанси на успішну імплантацію[3].

Проте, поступове спікання виробу додає не тільки вище описану пористість, а і нажаль залишає залишки титанового порошку в середині структури імплантату. В контексті біобезпеки використання даних імплантів це створює додаткові ризики для здоров'я пацієнта. Для того, щоб унеможливити потрапляння залишку порошку в організм пацієнта, необхідно додатково обробити титановий імплантат відповідно до норм, проте часто це піскоструменева обробка виробу та подальша його мийка в УЗ-ванні.

Проблематика використання титанових імплантів

Біоінертність титану дійсно зробила його одним із найпопулярніших, якщо не найпопулярнішим матеріалом для виготовлення персоналізованих імплантів, проте, окрім позитивних якостей, в нього є також і негативні.

Найвагомішою з них є його реакція на температури, так, титан є металом та, нажаль все ще нагрівається та охолоджується під час тривалого впливу температур. І якщо в пацієнтів ортопедичних відділень, де, часто, імплант знаходиться не на поверхні, біля шкіри, а в середині організму під м'язами та іншими тканинами, може бути не настільки помітно для пацієнта, то при операціях з імплантування у краніо-каудальній ділянці, де імплант через відсутність такої кількості тканин знаходиться біля шкіри пацієнта, тривале перебування на сонці може спричинити нагрівання виробу. Проте, варто відмітити, що дана властивість не несе в собі загрози для життя та здоров'я пацієнта, якщо він буде дотримуватися вимог наданих йому лікарем[2].

Ще однією особливістю є те, що у невеликого відсотка населення спостерігається природня алергічна реакція на титан, що обумовлена індивідуальною реакцією організму на імплантат. В такому випадку імплантат може бути замінений на аналогічний виріб виготовлений з іншого металу, або полієфірефіркетону[2].

IV. ГІДРОКСИПАТИТ ТА ЙОГО ВИКОРИСТАННЯ

Гідроксиapatит ($Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$) – це основний компонент кісткової тканини та зубів у людини та є матеріалом, котрий завдяки своїй біосумісності та біоактивності добре взаємодіє з живими тканинами та стимулює ріст кісткової тканини, має високу спорідненість до кальцій-фосфатних структур у кістковій тканині, що дозволяє створювати ефективні імплантаційні матеріали, також здатний регулювати іонний обмін, що сприяє підтримці мінералізації кістки та її регенерації. Широко застосовується в стоматології, завдяки його остеointегративним властивостям, проте в інших медичних напрямках поки не набув широкого використання в Україні.

Він створює сприятливе мікросередовище для адгезії остеобластів та стимуляції їх диференціації. Це зменшує ризик відторгнення імплантата та підвищує його довговічність. Однак, важливим фактором є стабільність покриття: при надмірному розчиненні гідроксиapatиту, може утворюватися локальна дисбалансована мінералізація, що

призводить до зниження міцності імплантата[4-6].

Остеointеграція гідроксиapatитного покриття залежить від його фізико-хімічних властивостей, зокрема пористості, кристалічності та товщини шару. Оптимальна кристалічність дозволяє підтримувати баланс між біодеградацією матеріалу та зростанням нової кісткової тканини[6-20].

Способи напilenня та адгезія

Адгезія покриття з гідроксиapatиту до титанової основи є критичним фактором, що впливає на довговічність та результативність покриття. Погана адгезія може призводити до відшарування покриття, що значно знижує ефективність імплантації. Адгезія може бути різною в залежності від способу нанесення(напilenня) гідроксиapatиту на імплантат. Одним із методів нанесення гідроксиapatиту є занурення виробу в соль-гелевий розчин при певній сталій швидкості, це метод дозволяє досягти найменшої товщини шару гідроксиapatиту та має відносно низькі температури роботи(близько 200 °C), проте, для нанесення цим методом необхідна контрольоване зовнішнє середовище, та, згідно з дослідженнями не завжди адгезія є на задовільному рівні[8,9].

Таблиця 1 – Параметри використання різних методів нанесення гідроксиapatиту

Метод нанесення	Принцип дії	Тип порошку/розчину	Переваги	Недоліки	Температура процесу
Плазмове напilenня	Напilenня розплавленого гідроксиapatиту з плазмового факела	Мікрочастинки (10–50 мкм), сферичні	Висока міцність покриття Швидке нанесення	Висока температура Втрати біоактивності Потрібен спеціальний порошок	>10 000°C
Електрофоретичне осадження	Осадження частинок з колоїдного розчину на поверхню під дією електричного поля	Нанопорошок або колоїдний розчин	Простота, рівномірність Контроль товщини шару	Потрібна подальша термообробка Менш надійна адгезія без спікання	~80–200°C (осадження), >500°C (спікання)

Занурення	Занурення імпланту в суспензію гідроксиapatиту та висушування	Нанопорошок або сол-гель розчин	Дешевий і простий метод Легко контролювати шар	Погана адгезія без спікання Покриття може бути нерівномірним	~100–200°C (сушка), >500°C (спікання)
Золь-гель метод	Утворення тонкого шару через хімічне осадження розчину на поверхню	Золь-гель (розчин прекурсорів)	Тонке і рівномірне покриття Можна регулювати склад	Потрібна складна підготовка розчину Покриття тонке (0.1–1 мкм)	~300–600°C

Наступним методом є метод плазмового напилення гідроксиapatиту на імплант, цим методом не можна нанести такого тонкого шару гідроксиapatиту як при використанні золь-гелевого методу нанесення. Він дозволяє досягти меншої деградації поверхні через сам спосіб нанесення, проте через необхідність високих температур роботи та особливостей плазмового струменю не завжди можна гарантувати однорідність нанесеного шару[9-20].

Також варто відмітити нанесення гідроксиapatиту методами електрохімічного та електрофоретичного осадження, обидва цих методи використовують електричний струм для прикріплення гідроксиapatиту до імпланту. При даних типах нанесення, осадженні частинки гідроксиapatиту в суспензії переміщуються та закріплюються на поверхні імпланту під дією електричного поля, проте ці методи нанесення не можуть гарантувати гарну адгезію та швидкість нанесення[9-20].

Біобезпека порошку гідроксиapatиту

Якість порошку гідроксиapatиту відіграє ключову роль у забезпеченні біобезпеки покриття. Основними параметрами, що впливають на біосумісність порошку, є розмір частинок, рівень агрегації та вміст домішок.

Порошок гідроксиapatиту має різні параметри, в залежності від того, яким методом його було отримано, двома основними методами отримання порошку гідроксиapatиту є хімічний та фізичний методи.

Хімічні методи поділяють на співосадження, де відбувається осадження гідроксиapatиту в розчині шляхом змішування кальцій-іону та фосфат-іону та золь-гель метод, де гель отримується через гідроліз кальцію та фосфору, з подальшим випаровуванням до стану порошку.

Фізичні методи поділяються на механохімічний синтез, суть якого полягає у змішуванні реагентів у кульовому млині з подальшою термообробкою речовини, та плазмохімічний синтез де під час високотемпературної обробки гідроксиapatиту і плазмі утворюються сферичні наночастинки[8,9].

Проте, варто зазначити, що не можна використовувати будь-який порошок з будь-яким методом нанесення. Для нанесення методом занурення в соль-гелевий розчин, найкраще підійде порошок отриманий соль-гелевим методом, оскільки він добре розчиняється у рідині, утворюючи рівномірний шар при зануренні.

В той же час, порошок отриманий механохімічним методом ідеально підійде для нанесення гідроксиapatиту методом плазмового напилення, оскільки не буде деградувати у плазмі та змінювати хімічні властивості порошку під впливом високих температур[8,9].

Можливі ризики біобезпеки

Хоча гідроксиapatит вважається нетоксичним, можливі ризики пов'язані з методом його напилення та характеристиками покриття. Наприклад, плазмове напилення, може спричиняти

нерівномірність товщини та пористості покриття, що впливає на адгезію та остеоінтегративні характеристики імпланта. Крім того, мікрочастинки гідроксиапатиту можуть потрапляти в організм у процесі деградації покриття, що потенційно, може викликати запальні реакції або системні ускладнення[2].

Ще одним фактором ризику є мікробіологічна контамінація порошку гідроксиапатиту або його взаємодія з бактеріями після імплантації. Дослідження показують, що деякі патогенні мікроорганізми можуть колонізувати поверхню імпланта, спричиняючи розвиток інфекцій, так звані перипротезні інфекції

Для зниження цього ризику проводяться дослідження щодо додавання антибактеріальних агентів, таких як іони срібла, міді або цинку, до складу порошку гідроксиапатиту, що можна зробити при виготовленні порошку методом механохімічного синтезу.

Особливості наплення гідроксиапатиту

Дослідження авторів [21], присвячені мікроплазмове напленню титанових покриттів, свідчать про важливість оптимізації параметрів технології для забезпечення необхідних біологічних та механічних характеристик імплантів. Зокрема, було встановлено, що мікроплазмове наплення забезпечує формування двошарового титаново-гідроксиапатитного покриття, яке складається з щільного нижнього шару для забезпечення високої адгезії з основою імпланта, і верхнього пористого шару, що стимулює ріст кісткової тканини. Оптимальна пористість верхнього шару становить близько 30%, із закритими порами розміром від 15 до 200 мкм та відкритими порами до 300 мкм, що сприяє остеоінтеграції та покращує взаємодію з біологічними тканинами.

Ключовими параметрами, які впливають на формування пористості та розмір частинок напленого покриття, є сила електричного струму дуги та витрата плазموутворюючого газу (аргону). Оптимізація цих параметрів дозволяє

отримати необхідну морфологію поверхні, яка забезпечує надійну біологічну взаємодію та механічну стійкість імплантів.

Якість гідроксиапатитного покриття значно залежить від методу його нанесення. Плазмове наплення, незважаючи на високу швидкість процесу і міцність отриманих покриттів, може призводити до неоднорідності товщини шару та втрати біоактивності гідроксиапатиту через високі температури, які перевищують 10 000°C.

Важливим аспектом є забезпечення контролю біобезпеки на всіх етапах виробництва імплантів. Особливо увага приділяється чистоті порошків титану та гідроксиапатиту, оскільки наявність домішок може спричиняти токсичні реакції або знижувати біосумісність імпланту. Окрім того, існує ризик мікробіологічної контамінації поверхні імплантів, що може викликати перипротезні інфекції. Для зменшення цього ризику пропонується використання антибактеріальних добавок, таких як іони срібла, міді або цинку [22].

V. ВИСНОВКИ

Титанові імпланти, завдяки їх основному матеріалу вже довели свою якість та необхідність при імплантаціях. Використовуючи якісні матеріали та дотримуючись всіх вимог виробництва медичних виробів можна досягти якісної інтеграції імпланту в організм. Завдяки новітнім технологіям таким як 3D-друк, що дозволив персоналізувати імпланти, розробляючи їх відповідно до конкретної анатомічної особливості пацієнта, на відміну від стандартизованих медичних рішень, що навпаки, заставляють лікарів підганяти анатомію пацієнта під імплант, можливості титанових імплантів розширилися, оскільки завдяки друку їх легше доопрацювати для нанесення того чи іншого покриття. Проте, через особливості друку, а саме те, що виріб знаходиться повністю занурений в порошок титанового сплаву, для унеможливлення потрапляння небажаних частинок в організм людини, необхідно приділяти більше уваги контролю готової продукції.

Біобезпека на всіх етапах виробництва є важливим аспектом при плануванні

результатів операції. Окремо також варто виділити біобезпеку отримання та використання як порошку титанового сплаву так і порошку гідроксиапатиту, оскільки наявність домішок у бідь-якому з них може призвести як до неможливості нанесення порошку гідроксиапатиту на імплант через розплавлення частинок, так і, в найгіршому випадку, до відторгнення організмом людини імпланту.

Наразі існує декілька способів нанесення покриття на імплант, проте плазмове напилення є одним із найбільш перспективних методів нанесення гідроксиапатиту на титанові 3D-друковані імплантати. Завдяки високій швидкості процесу, гарній адгезії та біосумісності покриття, цей метод заслуговує на відокремлення від інших. Оптимізація параметрів напилення та попередня підготовка поверхні імпланту дозволяють досягти міцних та рівномірних покриттів, що забезпечують покращену остеоінтеграцію імплантатів.

Фінансування. Ця публікація підготовлена в рамках проєкту №3064 “Improving professional communication on biosecurity and biohazard management in medicine, pharmacy and biotechnology”, який отримав фінансування через проєкт EURIZON, що фінансується Європейським Союзом за грантовою угодою №871072.

Конфлікт інтересів. Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

ORCID ID та внесок авторів.

0009-0001-0425-2470 (A, B, C) Artem Tsurkan
0000-0002-2087-6953 (D, E) Oleksandr Besarab

A – концепція роботи та дизайн; B – аналіз інформації; C – написання статті; D – критичний огляд; E – остаточне схвалення статті.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. S. Akshaya, P. K. Rowlo, A. Dukle та A. J. Nathanael, “Antibacterial coatings for titanium implants: Recent trends and future perspectives”, *Antibiotics*, т. 11, № 12, с. 1719, листоп. 2022. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.3390/antibiotics11121719>
2. Megan M. Wood та Erin M. Warshaw, “Hypersensitivity reactions to titanium: Diagnosis and

- management”, *Dermatitis*, т. 26, № 1, 2015. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.1097/DER.0000000000000091>
3. D. Losic, “Advancing of titanium medical implants by surface engineering: Recent progress and challenges”, *Taylor Francis*, 2021. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.1080/17425247.2021.1928071>
4. W. S. W. Harun *ma in.*, “A comprehensive review of hydroxyapatite-based coatings adhesion on metallic biomaterials”, *Ceram. Int.*, т. 44, № 2, с. 1250–1268, лют. 2018. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.10.162>
5. K. Homa *ma in.*, “Surface functionalization of titanium-based implants with a nanohydroxyapatite layer and its impact on osteoblasts: A systematic review”, *J. Functional Biomaterials*, т. 15, № 2, с. 45, лют. 2024. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.3390/jfb15020045>
6. M. G. Ciobanu, G. Pop та O. Ciobanu, “Hydroxyapatite coatings on titanium implants”, *Rev.chim.*, 2007.
7. Advanced surface modification techniques for titanium implants: a review of osteogenic and antibacterial strategies / H. Zhang et al. *Frontiers in bioengineering and biotechnology*. 2025. Vol. 13. URL: <https://doi.org/10.3389/fbioe.2025.1549439>.
8. Antibacterial and hydroxyapatite-forming coating for biomedical implants based on polypeptide-functionalized titania nanospikes / Q. Gao et al. *Biomaterials science*. 2020. Vol. 8, no. 1. P. 278–289. URL: <https://doi.org/10.1039/c9bm01396b>.
9. Biocompatibility of sol-gel hydroxyapatite-titania composite and bilayer coatings / D. Sidane et al. *Materials science and engineering: c*. 2017. Vol. 72. P. 650–658. URL: <https://doi.org/10.1016/j.msec.2016.11.129>.
10. Effect of sintering temperature on adhesion strength of hydroxyapatite coating layer of titanium TNTZ prepared by dip coating method / Gunawarman et al. *Journal of physics: conference series*. 2025. Vol. 2972, no. 1. P. 012054. URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2972/1/012054>.
11. Engineered functional doped hydroxyapatite coating on titanium implants for osseointegration / J. Li et al. *Journal of materials research and technology*. 2023. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.09.239>.
12. Fakologbon Charles Oladipupo. *Advancements in hydroxyapatite nanocomposites for orthopedic implants*. 2025. URL: https://www.researchgate.net/profile/Fakologbon-Charles-Oladipupo/publication/387952663_Advancements_in_Hydroxyapatite_Nanocomposites_for_Orthopedic_Implants/links/67844fd02fcfd011cc694bf0/Advancements-in-Hydroxyapatite-Nanocomposites-for-Orthopedic-Implants.pdf.
13. Hydroxyapatite coating on titanium substrate with titania buffer layer processed by sol-gel method / H.-W. Kim et al. *Biomaterials*. 2004. Vol. 25, no. 13. P. 2533–2538. URL: <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2003.09.041>.
14. Sharma A. Hydroxyapatite coating techniques for Titanium Dental Implants – an overview. *Europe PMC*. 2023. URL: <https://doi.org/10.32388/2e6uhn>.
15. Sol-gel derived hydroxyapatite coating on titanium implants: optimization of sol-gel process and engineering the interface / J. Alaa et al. *Journal of materials research*. 2022. URL: <https://link.springer.com/article/10.1557/s43578-022-00550-0?utm>.
16. Synthetic-Hydroxyapatite-Based coatings on the ultrafine-grained titanium and zirconium surface. *Progress in physics of metals*. 2023. Vol. 24, no. 4. URL: <https://doi.org/10.15407/ufm.24.04.792>.
17. Titanium surface modified by hydroxyapatite coating for dental implants / K.-Y. Hung et al. *Surface and coatings*

technology. 2013. Vol. 231. P. 337–345. URL: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.03.037>.

18. S. Awasthi, S. K. Pandey, E. Arunan та C. Srivastava, “A review on hydroxyapatite coatings for the biomedical applications: Experimental and theoretical perspectives”, *J. Mater. Chemistry B*, 2021. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.1039/d0tb02407d>

19. X. Lu та ин., “Multifunctional coatings of titanium implants toward promoting osseointegration and preventing infection: Recent developments”, *Frontiers Bioeng. Biotechnol.*, т. 9, груд. 2021. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.783816>

20. A. Jaafar, C. Hecker, P. Árki та Y. Joseph, “Sol-Gel derived hydroxyapatite coatings for titanium implants: A review”, *Bioengineering*, т. 7, № 4, с. 127, жовт. 2020. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.3390/bioengineering7040127>

21. Manufacturing and Characterisation of Robot Assisted Microplasma Multilayer Coating of Titanium Implants: Biocompatible coatings for medical implants with improved density and crystallinity / D. Alontseva et al. Johnson Matthey Technology Review. 2020. Vol. 64, no. 2. P. 180–191. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.1595/205651320x15737283268284>

22. The influence of plasma-sprayed coatings on surface properties and corrosion resistance of 316L stainless steel for possible implant application / A. Woźniak et al. Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2021. Vol. 21, no. 4. Доступно: <https://doi.org/10.1007/s43452-021-00297-1>

REFERENCES

1. Antibacterial coatings for titanium implants: recent trends and future perspectives / S. Akshaya et al. *Antibiotics*. 2022. Vol. 11, no. 12. P. 1719. URL: <https://doi.org/10.3390/antibiotics11121719>.

2. Megan M. Wood, Erin M. Warshaw. Hypersensitivity reactions to titanium: diagnosis and management. *Dermatitis*. 2015. Vol. 26, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1097/DER.0000000000000091>.

3. Losic D. Advancing of titanium medical implants by surface engineering: recent progress and challenges. *Taylor and francis*. 2021. URL: <https://doi.org/10.1080/17425247.2021.1928071>.

4. A comprehensive review of hydroxyapatite-based coatings adhesion on metallic biomaterials / W. S. W. Harun et al. *Ceramics international*. 2018. Vol. 44, no. 2. P. 1250–1268. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.10.162>.

5. Surface functionalization of titanium-based implants with a nanohydroxyapatite layer and its impact on osteoblasts: a systematic review / K. Homa et al. *Journal of functional biomaterials*. 2024. Vol. 15, no. 2. P. 45. URL: <https://doi.org/10.3390/jfb15020045>.

6. Hydroxyapatite coatings on titanium implants. *Rev.chim / Ciobanu M. G., Pop G., Ciobanu O.*. 2007.

7. J. Li, T. Zhang, Z. Liao, Y. Wei, R. Hang та D. Huang, “Engineered functional doped hydroxyapatite coating on titanium implants for osseointegration”, *J. Mater. Res. Technol.*, верес. 2023. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.09.239>

8. A. Sharma, “Hydroxyapatite coating techniques for Titanium Dental Implants — an overview”, *Eur. PMC*, 2023. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.32388/2e6uhn>

9. J. Alaa та ин., “Sol-gel derived hydroxyapatite coating on titanium implants: Optimization of sol-gel process and engineering the interface”, *J. Mater. Res.*, 2022. [Онлайн]. Доступно: <https://link.springer.com/article/10.1557/s43578-022-00550-0?utm>

10. Q. Gao та ин., “Antibacterial and hydroxyapatite-forming coating for biomedical implants based on polypeptide-functionalized titania nanospikes”, *Biomaterials Sci.*, т. 8, № 1, с. 278–289, 2020. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.1039/c9bm01396b>

11. “Synthetic-Hydroxyapatite-Based coatings on the ultrafine-grained titanium and zirconium surface”, *Prog. Phys. Met.*, т. 24, № 4, груд. 2023. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.15407/ufm.24.04.792>

12. K.-Y. Hung, S.-C. Lo, C.-S. Shih, Y.-C. Yang, H.-P. Feng та Y.-C. Lin, “Titanium surface modified by hydroxyapatite coating for dental implants”, *Surf. Coatings Technol.*, т. 231, с. 337–345, верес. 2013. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.03.037>

13. D. Sidane та ин., “Biocompatibility of sol-gel hydroxyapatite-titania composite and bilayer coatings”, *Mater. Sci. Eng.: C*, т. 72, с. 650–658, берез. 2017. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.1016/j.msec.2016.11.129>

14. H. Zhang, Z. Wu, Z. Wang, X. Yan, X. Duan та H. Sun, “Advanced surface modification techniques for titanium implants: A review of osteogenic and antibacterial strategies”, *Frontiers Bioeng. Biotechnol.*, т. 13, берез. 2025. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.3389/fbioe.2025.1549439>

15. Fakologbon Charles Oladipupo, “Advancements in hydroxyapatite nanocomposites for orthopedic implants”, 2025. [Онлайн]. Доступно: https://www.researchgate.net/profile/Fakologbon-Charles-Oladipupo/publication/387952663_Advancements_in_Hydroxyapatite_Nanocomposites_for_Orthopedic_Implants/links/67844fd02fcfd011cc694bf0/Advancements-in-Hydroxyapatite-Nanocomposites-for-Orthopedic-Implants.pdf

16. Gunawarman, J. Affi, F. Zaky, D. Chandra, M. Niinomi та T. Akahori, “Effect of sintering temperature on adhesion strength of hydroxyapatite coating layer of titanium TNTZ prepared by dip coating method”, *J. Phys.: Conf. Ser.*, т. 2972, № 1, с. 012054, берез. 2025. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2972/1/012054>

17. H.-W. Kim, Y.-H. Koh, L.-H. Li, S. Lee та H.-E. Kim, “Hydroxyapatite coating on titanium substrate with titania buffer layer processed by sol-gel method”, *Biomaterials*, т. 25, № 13, с. 2533–2538, черв. 2004. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2003.09.041>

18. A review on hydroxyapatite coatings for the biomedical applications: experimental and theoretical perspectives / S. Awasthi et al. *Journal of materials chemistry B*. 2021. URL: <https://doi.org/10.1039/d0tb02407d>.

19. Multifunctional coatings of titanium implants toward promoting osseointegration and preventing infection: recent developments / X. Lu et al. *Frontiers in bioengineering and biotechnology*. 2021. Vol. 9. URL: <https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.783816>.

20. Sol-Gel derived hydroxyapatite coatings for titanium implants: a review / A. Jaafar et al. *Bioengineering*. 2020. Vol. 7, no. 4. P. 127. URL: <https://doi.org/10.3390/bioengineering7040127>.

21. D. Alontseva and oth., “Manufacturing and Characterisation of Robot Assisted Microplasma Multilayer COATING of Titanium Implants : Biocompatible coatings for medical implants with improved density and crystallinity”, *Johnson Matthey Technol. Rev.*, v. 64, № 2, p. 180–191, April, 2020. URL: <https://doi.org/10.1595/205651320x15737283268284>

22. A. Woźniak et al., “The influence of plasma-sprayed coatings on surface properties and corrosion resistance of 316L stainless steel for possible implant application”, *Arch. Civil Mech. Eng.*, vol. 21, no. 4, Sep. 2021. Accessed: May 28, 2025. [Online]. URL: <https://doi.org/10.1007/s43452-021-00297-1>

UDC 616-71

BIOSAFETY OF OBTAINING AND USING OF A TITANIUM IMPLANT WITH HYDROXYAPATITE COATING

Tsurkan Artem

a.tsurkan.zf41mp.fbmi25@lil.kpi.ua

Besarab Oleksandr

besarab@lil.kpi.ua

National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

Abstract – Titanium implants are actively used in orthopedics and dentistry due to their high biocompatibility, corrosion resistance and strength. However, titanium itself does not stimulate bone formation, so its surface is coated with hydroxyapatite, which promotes osteointegration and the formation of new bone tissue. The quality of materials is critical for the safety of implants. Impurities in titanium or hydroxyapatite can cause inflammatory reactions or rejection. Reliable adhesion of hydroxyapatite to the titanium base is especially important - poor adhesion can lead to delamination of the coating. Applying antibacterial layers reduces the risk of infections, and the uniformity of the coating affects the durability and stability of the implant.

The aim of the study is a comprehensive assessment of the biosafety of titanium implants with hydroxyapatite coating, including quality control of materials, analysis of mechanical and biological properties of the coating, increasing the efficiency of osseointegration and reducing the risks of infectious complications.

The purity of hydroxyapatite and titanium is crucial for biocompatibility. Heavy metal impurities in hydroxyapatite can be toxic, and poor-quality titanium reduces corrosion resistance. The Ti-6Al-4V alloy showed the best results.

Plasma spraying provides high adhesion of the coating, although uneven application remains a problem. Electrophoretic deposition and the sol-gel immersion method are also promising, providing good coating quality. The microporous structure of hydroxyapatite stimulates the attachment of osteoblasts, improves vascularization and accelerates bone regeneration. At the same time, unevenness of the layer can lead to its delamination, which negatively affects the implant and causes inflammatory processes. Modern technologies, in particular 3D printing, make it possible to personalize implants according to the anatomical features of the patient. However, they require careful control of the finished product to avoid foreign particles entering the body and guarantee safe integration.

Keywords: implant, hydroxyapatite, titanium, plasma spraying, biosafety.