

DOI: 10.25205/978-5-4437-1843-9-349

**БИОАКТИВНЫЕ ПОКРЫТИЯ НА 3D-ИМПЛАНТАТАХ
ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА*****BIOACTIVE COATINGS ON 3D TITANIUM ALLOY IMPLANTS**

К. В. Надараиа¹, И. М. Имшинецкий¹, М. А. Надараиа¹, А. И. Плешкова¹,
И. В. Манжуло², Е. А. Белов¹, Д. В. Маштальяр¹

¹Институт химии ДВО РАН, Владивосток

²Национальный научный центр морской биологии им. А. В. Жирмунского ДВО РАН, Владивосток

K. V. Nadaraia¹, I. M. Imshinetskiy¹, M. A. Nadaraia¹, A. I. Pleshkova¹,
I. V. Manzhulo², E. A. Belov¹, D. V. Mashtalyar¹

¹Institute of Chemistry FEB RAS, Vladivostok

²A. V. Zhirmunsky National Scientific Center of Marine Biology FEB RAS, Vladivostok

✉ nadaraiakv@mail.ru

Аннотация

В работе представлен способ создания ортопедических имплантатов на основе селективного лазерного плавления с последующим нанесением биоактивного гибридного покрытия. Установлено наличие у покрытий развитой поверхностной структуры, в состав которой входит гидроксиапатит и биоактивные компоненты. Полученные материалы обладают антибактериальными и противоопухолевыми свойствами.

Abstract

The paper presents a method for creating orthopedic implants based on selective laser melting with subsequent application of a bioactive hybrid coating. The coatings have a developed surface structure, which includes hydroxyapatite and bioactive components. The resulting materials have antibacterial and antitumor properties.

На сегодняшний день перед исследовательскими коллективами по всему миру стоит задача создания новых имплантационных материалов для ортопедии, обладающих целым набором уникальных функциональных характеристик. Среди таких свойств можно в первую очередь выделить соответствие имплантируемого изделия анатомическим особенностям пациента, минимальный риск отторжения, противовоспалительные и противоопухолевые свойства, антибактериальную активность. К сожалению, на данный момент существуют лишь отдельные подходы к решению представленных задач. Так, к примеру, имплантат-ассоциированные инфекции с переменным успехом лечат путем системного введения антибиотиков. В связи с этим перспективной выглядит идея сочетания в одном имплантате целого спектра требуемых свойств, позволяющих перейти от простой биосовместимости к биоактивности.

В связи с этим в представленной работе нами были разработаны новые подходы к созданию биоактивных материалов для ортопедии. На первом этапе в качестве способа получения сетчатых образцов с заданной геометрией ячейки из порошка титанового сплава ВТ6 (система Ti-Al-V) был использован хорошо зарекомендовавший себя при создании персонализированных имплантатов метод селективного лазерного плавления (СЛП). Затем на полученные СЛП-образцы наносилось гидроксиапатитсодержащее пористое покрытие методом плазменного электролитического оксидирования (ПЭО). Применения метода ПЭО позволило формировать слой гидроксиапатита непосредственно в ходе каскада плазмохимических реакций. На третьем этапе на ПЭО-покрытие наносился слой полидофамина (ПДА) с иммобилизацией на поверхности и в порах покрытия витамина К2 (противовоспалительные свойства), золедроната (антирезорбтивные и противоопухолевые свойства) и ванкомицина (антибактериальные свойства). В результате нами были синтезированы биоактивные гибридные покрытия на образцах, полученных аддитивной технологией.

Анализ данных сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) свидетельствует о наличии у гибридных покрытий развитой структуры. Дополнительно данные рентгенофазового анализа подтвердили присутствие в покрытии гидроксиапатита, а результаты рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии — наличие биоактивных соединений.

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 25-73-10044).

© К. В. Надараиа, И. М. Имшинецкий, М. А. Надараиа, А. И. Плешкова, И. В. Манжуло, Е. А. Белов, Д. В. Маштальяр, 2025

Также путем анализа данных потенциодинамической поляризации и электрохимической импедансной спектроскопии было установлено наличие у гибридных покрытий высоких антикоррозионных свойств, превосходящих таковые у необработанного титанового сплава. Это, в свою очередь, способствует снижению выделения в ткани, окружающие имплантат, частиц микронного и субмикронного размера, тем самым предотвращая возникновение воспаления.

Гибридные покрытия демонстрируют яркий антибактериальный эффект, о чем свидетельствуют как данные СЭМ, так и образование зоны подавления роста *S. aureus* вокруг образцов за счет постепенной диффузии антибиотика. Более того, образцы с гибридным покрытием обладают цитотоксичностью в отношении клеток остеосаркомы человека. При этом отсутствует токсичность в отношении клеток фибробластов, что подтверждает направленное противоопухолевое действие таких материалов.

Путем проведения экспериментов с применением лабораторных животных (все эксперименты были одобрены Комитетом по биомедицинской этике Национального научного центра морской биологии им. А. В. Жирмунского ДВО РАН) было установлено, что образцы с гибридным покрытием не обладают местной и системной токсичностью.

Таким образом, в ходе данного исследования были получены новые биоактивные материалы, обладающие высокой биосовместимостью наравне с противоопухолевым и антибактериальным эффектами.