

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ В МЕДИЦИНСКОЙ ТЕХНИКЕ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ

Гарькин И.Н.¹, Языева А.С.², Войнаш С.А.¹

¹Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, Москва, Россия;

²Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова Министерства здравоохранения Российской Федерации (Сеченовский Университет), Москва, Россия

Ключевые слова: титановые сплавы, медицинская техника, имплантаты, биосовместимость, остеointеграция, аддитивные технологии, никелид титана, поверхностная модификация.

Аннотация. Проведён комплексный анализ текущего состояния и перспектив применения титановых сплавов в производстве медицинской техники и имплантатов. Рассмотрены ключевые физико-механические и биологические свойства титановых сплавов, определяющие их преимущества перед традиционными медицинскими материалами. Особое внимание уделено проблемам биосовместимости, коррозионной стойкости и остеointеграции. Приведена сравнительная характеристика основных групп титановых сплавов, применяемых в травматологии, ортопедии, стоматологии и сердечно-сосудистой хирургии. Обозначены технологические барьеры, сдерживающие широкое внедрение титановых сплавов, и предложены пути их преодоления с использованием аддитивных технологий и методов поверхностной модификации.

PROSPECTS FOR THE USE OF TITANIUM ALLOYS IN MEDICAL TECHNOLOGY: CURRENT STATUS AND DEVELOPMENT DIRECTIONS

Garkin I.N.¹, Yazyeva A.S.², Voinash S.A.¹

¹Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, Moscow, Russia;

²Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education I.M. Sechenov First Moscow State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation (Sechenov University), Moscow, Russia

Keywords: titanium alloys, medical equipment, implants, biocompatibility, osseointegration, additive technologies, titanium nickelide, surface modification.

Abstract. This article provides a comprehensive analysis of the current state and prospects for the use of titanium alloys in the production of medical equipment and implants. It examines the key physical, mechanical, and biological properties of titanium alloys, defining their advantages over traditional medical materials. Particular attention is paid to biocompatibility, corrosion resistance, and osseointegration. A comparative analysis of the main groups of titanium alloys used in traumatology, orthopedics, dentistry, and cardiovascular surgery is provided. Technological barriers hindering the widespread adoption of titanium alloys are identified, and ways to overcome them using additive manufacturing and surface modification methods are proposed.

Современная медицинская техника предъявляет исключительно высокие требования к конструкционным материалам, которые должны сочетать в себе высокую механическую прочность, малый удельный вес, абсолютную биологическую инертность и длительную коррозионную стойкость в условиях агрессивной среды человеческого организма. Традиционные материалы, такие как нержавеющие стали аустенитного класса и кобальт-хромовые сплавы, несмотря на многолетний опыт клинического применения, демонстрируют ряд фундаментальных ограничений. К их числу относятся высокий модуль упругости, вызывающий эффект экранирования напряжений и резорбцию костной ткани, наличие в составе токсичных легирующих элементов (никеля, хрома в высоких концентрациях), а также недостаточная остеоинтеграционная способность [1, 2].

Титановые сплавы в течение последних трёх десятилетий занимают лидирующие позиции в качестве материалов для ответственных медицинских изделий, что обусловлено их уникальным сочетанием свойств [3]. Однако динамичное развитие медицинских технологий, появление новых хирургических методик и рост требований к долговременной надёжности имплантатов в условиях увеличения продолжительности жизни пациентов ставят перед материаловедами новые задачи, требующие переосмысления роли и потенциала титановых сплавов в медицинской технике.

Постановка проблемы заключается в необходимости системного анализа существующих ограничений титановых сплавов медицинского назначения и выработке научно обоснованных подходов к их преодолению через оптимизацию химического состава, внедрение передовых методов формообразования и целенаправленную модификацию поверхности.

В рамках настоящего исследования использован аналитический обзор научно-технической литературы за период 2015-2025 годов, включая публикации в рецензируемых журналах, материалы международных конференций по биоматериалам, а также данные клинических исследований ведущих медицинских центров. Проведён сравнительный анализ физико-механических характеристик, биологической совместимости и клинической эффективности титановых сплавов различных композиционных групп.

В качестве ключевых направлений решения выявленных проблем предложены следующие технологические стратегии. Во-первых, разработка сплавов с пониженным модулем упругости на основе системы Ti-Nb-Zr-Ta, приближающимся к модулю упругости кортикальной костной ткани, что позволит минимизировать стресс-шилдинг. Во-вторых, активное внедрение аддитивных технологий, в частности селективного лазерного плавления и электронно-лучевого плавления, обеспечивающих получение изделий с регулярной пористой структурой, имитирующей трабекулярную кость. В-третьих, применение методов поверхностной модификации, включая анодирование, плазменное напыление гидроксиапатита, микродуговое оксидирование и ионную имплантацию, для направленного управления остеоинтеграционными процессами. В таблице 1 представлена

сопоставительная характеристика основных групп титановых сплавов, применяемых в различных областях медицинской техники [4].

Табл. 1. Сравнительная характеристика титановых сплавов медицинского назначения

Параметр	Ti Grade 4 (CP-Ti)	Ti-6Al-4V ELI	Ti-6Al-7Nb	Ti-13Nb-13Zr	NiTi (Нитинол)
Предел прочности, МПа	550-700	930-1050	900-1050	860-1050	800-1200
Модуль упругости, ГПа	100-110	110-114	105-110	65-85	30-80 (мартенсит)
Относительное удлинение, %	15-25	10-15	10-15	10-20	10-40 (сверхупругость)
Биосовместимость	Отличная	Хорошая (следы ванадия)	Хорошая (ниобий вместо ванадия)	Отличная	Хорошая (возможна аллергия на никель)
Остеоинтеграция	Хорошая	Хорошая	Хорошая	Очень хорошая	Удовлетворительная
Основное применение	Зубные имплантаты, мини-пластины	Эндопротезы ТБС и КС, пластины	Эндопротезы с повышенной биоинертностью	Имплантаты с низким модулем	Эндоваскулярные стенты, ортодонтические дуги

Проведённый анализ убедительно демонстрирует, что титановые сплавы сохраняют статус безальтернативных материалов для критически важных изделий медицинской техники, однако потенциал их совершенствования далеко не исчерпан. Наблюдается устойчивый тренд перехода от классического сплава Ti-6Al-4V к безванадиевым и безникелевым композициям, обладающим улучшенным профилем биосовместимости и пониженным модулем упругости. Аддитивные технологии открывают принципиально новые возможности персонализации имплантатов и создания пористо-ячеистых структур, недостижимых традиционными методами литья и механической обработки.

Наиболее перспективным представляется синергетическое сочетание трёх инновационных направлений: оптимизированных β -титановых сплавов с биогенными легирующими элементами, аддитивного производства с прецизионным управлением архитектурой пористости и многоуровневой биоактивной поверхностной обработки, обеспечивающей контролируемое высвобождение остеоиндуктивных агентов.

Выводы

1. Титановые сплавы на сегодняшний день являются наиболее востребованным классом металлических биоматериалов благодаря исключительному сочетанию биосовместимости, коррозионной стойкости и удельной прочности.

2. Основным ограничением сплавов первой генерации (Ti-6Al-4V) является повышенный модуль упругости и потенциальная цитотоксичность ванадия, что стимулирует разработку β -титановых сплавов с ниобием, танталом и цирконием.

3. Аддитивное производство позволяет изготавливать имплантаты с градиентной пористостью, модуль упругости которых может быть снижен до значений, сопоставимых с костной тканью (менее 30 ГПа), что кардинально решает проблему резорбции кости.

4. Комплексная модификация поверхности титановых имплантатов с формированием биоактивных наноструктурированных покрытий является эффективным инструментом сокращения сроков остеоинтеграции и повышения долговременной стабильности имплантата.

5. Дальнейшие исследования должны быть направлены на стандартизацию технологических режимов аддитивного производства медицинских титановых изделий, углублённое изучение механизмов изнашивания в условиях трибокоррозии *in vivo* и разработку экономически эффективных методов нанесения многофункциональных покрытий.

Список литературы

1. Севостьянов М.А., Насакина Е.О., Колмаков А.Г. Способы улучшения эксплуатационных характеристик сплава TiNi медицинского назначения. – М.: Интерконтакт Наука, 2018. – 196 с.
2. Алексеев Е.Б., Мишинёв М.Л., Дзунович Д.А., Новак А.В., Бегунов Н.Н. Титановые сплавы для дентальных имплантатов и роль технологических факторов при производстве заготовок из них // Институт стоматологии. – 2025. – №4(109). – С. 88-100.
3. Узунян Н.А., Шумаков Ф.Г., Шматов К.В., Заславский Р.С., Лернер А.Я., Лобанов С.А. Безникелевые титановые сплавы с памятью формы в имплантологии (биомеханическое исследование) // Экопрофилактика, оздоровительные и спортивно-тренировочные технологии. Материалы II Международной научно-практической конференции, посвященной 85-летию Балашовского института (филиала) ФГБОУ ВО "Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского". – Саратов: Саратовский источник, 2018. – С. 329-333.
4. Ezugwu E.O., Da Silva R.B., Sales W.F., Machado A.R. Overview of the Machining of Titanium Alloys // Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences. Encyclopedia of Sustainable Technologies. 2017, pp. 487-506.

References

1. Sevostyanov M.A., Nasakina E.O., Kolmakov A.G. Methods for improving the performance characteristics of TiNi alloy for medical purposes. – M.: Intercontact Science, 2018. – 196 p.

2. Alekseev E.B., Mishnev M.L., Dzunovich D.A., Novak A.V., Begunov N.N. Titanium alloys for dental implants and the role of technological factors in the production of blanks from them // Institute of Dentistry. 2025, no. 4 (109), pp. 88-100.
3. Uzunyan N.A., Shumakov F.G., Shmatov K.V., Zaslavsky R.S., Lerner A.Ya., Lobanov S.A. Nickel-Free Titanium Alloys with Shape Memory in Implantology (Biomechanical Study) // Ecophylaxis, Health and Sports Training Technologies. Proceedings of the II International Scientific and Practical Conference Dedicated to the 85th Anniversary of the Balashov Institute (Branch) of the N.G. Chernyshevsky Saratov National Research State University. – Saratov: Saratov source. 2018. – P. 329-333.
4. Ezugwu E.O., Da Silva R.B., Sales W.F., Machado A.R. Overview of the Machining of Titanium Alloys // Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences. Encyclopedia of Sustainable Technologies. 2017, pp. 487-506.

Гарькин Игорь Николаевич – кандидат технических наук	Garkin Igor Nikolaevich – candidate of technical sciences
Языева Анна Сердаровна – студент	Yazyeva Anna Serdarovna – student
Войнаш Сергей Александрович – ассистент	Voinash Sergey Aleksandrovich – assistant
sergeyvoinash@yandex.ru	

Received 22.06.2026