

УДК 615.465

Использование сплавов титана в качестве биосовместимых материалов для изготовления имплантов и ортопедических фиксаторов

Каткова Маргарита Игоревна

ritak25042006@yandex.ru

Маслова Татьяна Ивановна^(*)

mas.tatiana2009@yandex.ru

SPIN-код: 7110-3851

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Проанализированы и сравнены три представителя титановых сплавов: альфа-бета сплав Ti–6Al–4V, альфа-бета сплав Ti–6Al–7Nb ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры, бета сплав Ti–15Mo ультрамелкозернистой структуры. Рассмотрены технологии производства сплавов титана. Показано влияние обработки сплавов титана на повышение их характеристик. Указано процентное содержание металлов в титановых сплавах. Сопоставлены цены металлов в титановых сплавах. Обосновано, что чистый титан, обладая биосовместимостью, уступает сплавам по усталостному разрушению и другим характеристикам. Подтверждено, что титановые сплавы отличаются от титана по прочности, пластичности, модулю упругости и биосовместимости.

Ключевые слова: титановые сплавы, ультрамелкозернистая структура, имплантаты, ортопедические фиксаторы, биосовместимость

Use of titanium alloys as biocompatible materials for the manufacture of implants and prosthetic fixators

Katkova Margarita Igorevna

ritak25042006@yandex.ru

Maslova Tatyana Ivanovna^(*)

mas.tatiana2009@yandex.ru

SPIN-code: 7110-3851

BMSTU, Moscow, Russia

Abstract. Three representatives of titanium alloys were analyzed and compared: alpha-beta alloy Ti–6Al–4V, alpha-beta alloy Ti–6Al–7Nb of ultrafine-grained structure (UMP) structure, beta alloy Ti–15Mo of ultrafine-grained structure. Technologies for the production of titanium alloys are considered. The effect of titanium alloy processing on improving their characteristics is shown. The percentage of metals in titanium alloys is indicated. The prices of metals in titanium alloys are compared. It is substantiated that pure titanium, having biocompatibility, is inferior to alloys in fatigue failure and other characteristics. It has been confirmed that titanium alloys differ from titanium in terms of strength, ductility, modulus of elasticity, and biocompatibility.

Keywords: titanium alloys, ultra-fine-grained structure, implants, orthopedic fixators, biocompatibility

Введение. Применение титана в качестве материала для имплантатов и ортопедических протезов началось в 1950-х годах. Именно титан стали использовать в медицине благодаря комплексному сочетанию прочности, легкости, пластичности и биосовместимости. Проблема достижения наилучшего сочетания механических свойств, биосовместимости и цены материалов для изготовления имплантатов и ортопедических фиксаторов является актуальным вопросом в современной имплантологии. Познавательный интерес к выявлению широкого спектра характеристик и свойств сплавов титана, применяемых в медицине, способствовал появлению данного исследования.

Целью нашей работы является определение свойств и характеристик титановых сплавов, которые превосходят свойства чистого титана в качестве биосовместимых материалов для изготовления имплантатов и ортопедических фиксаторов. Для выполнения цели поставлены задачи:

- проанализировать и сравнить характеристики и свойства трех титановых сплавов: альфа-бета сплава Ti–6Al–4V, альфа-бета сплава Ti–6Al–7Nb ультрамелкозернистой структуры, псевдо-бета сплава Ti–15Mo ультрамелкозернистой структуры;
- рассмотреть технологии их производства;
- сопоставить цены металлов в титановых сплавах.

Материалы и методы. В данной работе использованы: теоретический метод анализа научно-методической литературы, метод сравнения при рассмотрении трех титановых сплавов: альфа-бета сплава Ti–6Al–4V, альфа-бета сплава Ti–6Al–7Nb ультрамелкозернистой структуры, бета сплава Ti–15Mo ультрамелкозернистой структуры. В нашем исследовании рассмотрены именно ультрамелкозернистые структуры сплавов, так как равноканальное угловое прессование при их производстве приводит к значительному повышению прочностных свойств с сохранением пластичности сплава.

Результаты. Система Ti–6Al–4V представляет собой сплав, состоящий из титана, 6 % алюминия, 4 % ванадия и других примесей, таких как кислород, железо, углерод, чья суммарная массовая доля составляет меньше процента. Ti–6Al–4V характеризуются высокой износостойкостью, которую можно повысить за счет лазерного текстурирования [1]. Кроме того, данный сплав обладает высокой удельной прочностью за счет содержания алюминия, низким модулем упругости за счет содержания ванадия, низкой теплопроводностью, а также коррозионной стойкостью не только в водной и солевой среде, но и в среде цельной крови. После испытаний образцов данного сплава внешний вид биологической жидкости не менялся в течение 170 часов нахождения при 37 °C в условиях исключения возможности контакта с воздухом [2]. Следует отметить, что цитотоксичность Ti–6Al–4V находится в допустимых пределах (клеточная жизнеспособность 85–90 %), однако характерно небольшое повышение экспрессии цитокинов из-за содержания цитотоксичного в ионном виде ванадия в сплаве, что может отразиться на органах кровообращения, дыхания и нервной системы. Однако данный недостаток возможно компенсировать применением биоактивных покрытий для достижения синергии антибактериального и остеокондуктивного эффекта [1].

Рассмотрим стоимость производства сплава Ti–6Al–4V. Сейчас и в дальнейшем стоимость получения и обработки титановой губки не будет учитываться. Холодно-тигельная переплавка – эффективный метод производства сплава Ti–6Al–4V, так как при данном методе обеспечивается высочайшая чистота сплава. Кроме того, данный способ позволяет получать тонкостенные и сложнопрофильные отливки, благодаря чему уменьшается объем механической обработки и потерь материала.

Ti–6Al–7Nb — это титановый сплав, содержащий 6 % алюминия и 7% ниобия. Он обладает высокой прочностью, хорошим запасом пластичности, модулем упругости, который значительно выше, чем у костной ткани, и высокой стойкости к износу. Ультрамелкозернистая структура влияет на усталостное поведение сплава Ti–6Al–7Nb: значительно увеличивается предел выносливости на базе 10^7 циклов по схеме «растяжение-сжатие»; скорость развития трещины в зоне ее распространения в УМЗ образце меньше, чем в горячекатаного материала. При испытаниях элементов спиц на циклический изгиб была установлена повышенная выносливость по сравнению с горячекатаным материалом, а изделия в виде кортикальных винтов с резьбой М3,5 по своим механическим характеристикам при кручении превосходят аналоги. Кроме того, химическая модификация поверхности образцов УМЗ сплава Ti–6Al–7Nb с использованием плавиковой кислоты и щелочи приводит к формированию пористого покрытия, и формирование УМЗ не оказывает негативного влияния на метаболическую активность остеобластовых клеток на стадии колонизации [3].

Основным способом получения сплава Ti–6Al–7Nb является вакуумно-дуговая переплавка (ВДП). Для достижения максимальной однородности и чистоты сплава часто применяют двойную или даже тройную переплавку. Холодно-тигельная переплавка применяется для отлива готовых изделий сложной формы. Однако именно ВДП удобная для дальнейшей обработки металла: для получения горячекатанного материала и ультрамелкозернистой структуры, которую можно получить при равноканальном угловом прессовании.

Последний анализируемый нами сплав Ti–15Mo содержит 15 % молибдена, около 85 % титана и малых примесей. Для изготовления имплантатов применяется УМЗ структура сплава Ti–15Mo со средним размером зерен/субзерен ≈ 200 нм, так как она обладает крайне высокой прочностью в 1450 МПа, пределом выносливости 640 МПа, пластичностью 10 % и низким модулем упругости 100 ГПа. Кроме того, УМЗ образцы характеризуются повышенным сопротивлением распространению усталостной трещины и увеличением пути развития трещины [4]. Стоит также отметить влияние обработки сплавов на повышение их характеристик. Например, модификация поверхности плазменно-электролитическим оксидированием на УМЗ-подложке обладает большей пористостью во всех режимах, что оказывает положительное влияние на биосовместимость. Повышение напряжения сопровождается увеличением толщины покрытия, шероховатости поверхности, доли и размеров пор в обоих структурных состояниях. При напряжении свыше 400В размер пор лежит в диапазоне

4–7 мкм, а шероховатость — больше 1 мкм, что является благоприятными параметрами поверхности для адгезии остеобластов. Проведенные исследования *in vitro* показали, что образцы из сплава Ti–15Mo и ПЭО-покрытия могут быть охарактеризованы как биосовместимые, поскольку не демонстрируют цитотоксического эффекта и не индуцируют гемолиз [5].

Лучший способ получения сплава Ti–15Mo является вакуумно-дуговая переплавка, которая обеспечивает однородность полученного сплава, высокую чистоту и предотвращение окисления. Холодно-тигельная переплавка также применяется в производстве данного сплава, однако из-за более высокой плотности молибдена тяжелые частицы будут оседать на дно, в результате чего добиться однородности сплава трудоемко.

Электронно-лучевая переплавка также может использоваться для переплавки всех трех вышеприведенных сплавов. Недостатки данного способа переплавки:

- является слишком дорогостоящим за счет оборудования (электронной пушки);
- возможно улетучивание компонентов (особенно алюминия), в результате чего необходим точный контроль параметров для сохранения химического состава;
- процесс медленнее, чем вакуумно-дуговая и холодно-тигельная переплавки, в результате чего важным становится вопрос энергопотребления.

Обсуждение. Ti–6Al–4V — сплав, обладающий высокой прочностью, пластичностью, низким модулем упругости и биосовместимостью, даже несмотря на содержание токсичного ванадия. Данный сплав лучше всего подходит для высоконагруженных протезов тазобедренных и коленных суставов, а также стержней и костных пластин для ортопедических фиксаторов бедренной и большеберцовой костей, а также в качестве ортопедического материала для зубных протезов. За счет того, что данный сплав распространен в других областях машиностроения, его стоимость намного ниже по сравнению с двумя другими сплавами. Именно массовость производства делает сплав намного доступнее, даже несмотря на то, что ванадий намного дороже ниобия и молибдена (см. таблицу).

Сравнение цены металлов

Металл	Стоимость за 1 кг металла на 06.09.2025	Процентное содержание металла в титановом сплаве	Стоимость металла на 1 кг сплава
Алюминий	\$5–\$15	6 %	\$0,3–\$0,9
Ванадий	\$250–\$400	4 %	\$10–\$16
Ниобий	\$120–\$200	7 %	\$8,4–\$14
Молибден	\$40–\$70	15 %	\$6–\$10,5

Ti–6Al–7Nb обладает схожими механическими свойствами с Ti–6Al–4V, однако ниобий менее токсичен, чем ванадий, в результате чего данный сплав

можно применять с расчетом на сверхдолгий срок службы, а также для пациентов с повышенной чувствительностью. Сплав можно использовать для изготовления протезов для суставов, зубных имплантов, а также интрамедуллярных спиц, серкляжа и кортикальных винтов. Данный сплав является специализированным материалом для медицинских изделий, в результате чего он не производится массово и его стоимость гораздо выше, чем у Ti–6Al–4V, даже несмотря на среднюю стоимость ниобия (см. таблицу).

Ti–15Mo отличается от предыдущих сплавов более низким модулем упругости, что можно использовать во избежание атрофии кости из-за ослабления нагрузки, что также может использоваться для эндопротезов тазобедренного и коленного сустава, а также для моно- и полиаксиальных винтов в спинальной хирургии, имплантатов челюстно-лицевой хирургии. Однако данный сплав сложен в производстве из-за тугоплавкости и высокой плотности молибдена по сравнению с другими металлами. Именно затратность в производстве делает Ti–15Mo самым дорогим сплавом из представленных, даже несмотря на низкую стоимость молибдена по сравнению с ванадием и ниобием (см. таблицу).

Заключение. Итак, в своем исследовании нами проанализированы три сплава титана: рассмотрены технологии их производства, выделены характеристики, показано процентное содержание металла в титановом сплаве, сопоставлены цены металлов. Самой дорогостоящим сплавом из представленных, сочетающим в себе близкий к костной ткани модуль упругости, высокий показатель прочности и биологической инертности — это Ti–15Mo и его модифицированные варианты. Самым доступным по стоимости за счет массовости производства и неоднозначным из-за содержания гистотоксичного ванадия — Ti–6Al–4V. Более инертным и дорогим аналогом Ti–6Al–4V является Ti–6Al–7Nb, считающийся специализированным медицинским сплавом. Мы пришли к выводу, что чистый титан, обладая биосовместимостью, уступает сплавам по усталостному разрушению и другим характеристикам. Титановые сплавы отличаются от титана по прочности, пластичности, модулю упругости и биосовместимости, что влияет на их применимость в медицине в качестве материала для имплантатов и ортопедических фиксаторов.

Список источников

- [1] Рошин Е.М. Дентальная трибология: исследование износа и биосовместимости современных ортопедических материалов. *Клиническая медицина, серия: Естественные и технические науки*, 2024, № 11, с. 245–249.
- [2] Астрейко Л.А., Монжос Ю.С., Змачинская И.А., Лицкевич А.С. Исследование процесса коррозии медицинских сплавов на основе титана в биологических средах. *Вестник БарГУ, серия: Технические науки, Машиностроение и машиноведение*, 2024, № 1 (15), с. 12–17. <https://rep.barsu.by/handle/data/10920> (дата обращения 08.09.2025).
- [3] Полякова В.В. *Особенности структуры и механические свойства ультрамелкозернистого сплава Ti–6Al–7Nb для медицинских применений*. Дис. канд. техн. наук, Уфа, 2015, 154 с.

-
- [4] Гатина С.А. *Фазовые превращения и механические свойства псевдо- β -сплава Ti–15Mo, подвергнутого интенсивной пластической деформации*. Дис канд. техн. наук, Уфа, 2016, 135 с.
- [5] Гатина С.А., Гайсина А.А., Полякова В.В., Аубакирова В.Р., Анисимова Н.Ю., Еникев Н.А. Остеокондуктивность и биосовместимость бета-титанового сплава Ti–15Mo с биомиметическим покрытием *in vitro*. *Российский биотерапевтический журнал*, 2025, № 24 (1), с. 87–96. <https://doi.org/10.17650/1726-9784-2025-24-1-87-96>