

УДК 621.793.7

Преснова Елизавета Сергеевна, студент, Московского авиационного института, г. Москва

Остапюк София Ивановна, студент, Московского авиационного института, г. Москва

Уткина Арина Александровна, студент, Московского авиационного института, г. Москва

**РОЛЬ ПОВЕРХНОСТНОЙ ИНЖЕНЕРИИ (PVD-ПОКРЫТИЯ) В
ПОВЫШЕНИИ РЕСУРСА ПЕРСОНАЛИЗИРОВАННЫХ
АДДИТИВНЫХ ИМПЛАНТАТОВ НА ПРИМЕРЕ ЭНДОПРОТЕЗА
ЛОКТЕВОГО СУСТАВА**

Аннотация

Проблема недостаточной износостойкости титанового сплава Ti-6Al-4V, являющегося ключевым материалом для аддитивного производства персонализированных эндопротезов, остается основным фактором, лимитирующим их долговечность. В статье обосновывается необходимость интеграции методов вакуумного конденсационного напыления (PVD) в технологический цикл изготовления имплантатов как обязательного этапа постобработки. На примере эндопротеза локтевого сустава показано, что нанесение тонкослойных покрытий (TiN, TiAlN) на функциональные поверхности, созданные методом аддитивного производства, позволяет кардинально улучшить их триботехнические характеристики. Анализ экспериментальных данных демонстрирует, что PVD-покрытия повышают твердость поверхности на порядок (до 25–35 ГПа), снижают и стабилизируют коэффициент трения (до 0,3–0,6), а также увеличивают общую износостойкость системы на 1–2 порядка за счет подавления адгезионного износа и формирования защитного барьера. Делается вывод о

синергетическом эффекте комбинации аддитивного производства и PVD, где аддитивные технологии решают задачу создания оптимальной геометрии и пористой структуры для остеоинтеграции, а поверхностная инженерия обеспечивает необходимую долговечность трущихся пар, что в совокупности ведет к созданию нового поколения ресурсоемких медицинских имплантатов.

Annotation

The problem of insufficient wear resistance of titanium alloy Ti-6Al-4V, which is a key material for additive manufacturing of personalized implants, remains the main factor limiting their longevity. The article substantiates the necessity of integrating physical vapor deposition (PVD) methods into the implant manufacturing cycle as a mandatory post-processing stage. Using the example of an elbow joint endoprosthesis, it is shown that applying thin-layer coatings (TiN, TiAlN) to functional surfaces created by additive manufacturing can radically improve their tribotechnical characteristics. Analysis of experimental data demonstrates that PVD coatings increase surface hardness by an order of magnitude (up to 25–35 GPa), reduce and stabilize the coefficient of friction (to 0.3–0.6), and increase the overall wear resistance of the system by 1–2 orders of magnitude by suppressing adhesive wear and forming a protective barrier. The conclusion is drawn about the synergistic effect of combining additive manufacturing and PVD, where additive technologies solve the problem of creating optimal geometry and porous structure for osseointegration, while surface engineering ensures the necessary durability of friction pairs, which together leads to the creation of a new generation of high-resource medical implants.

Ключевые слова: аддитивное производство, эндопротез локтевого сустава, титановый сплав Ti-6Al-4V, вакуумное конденсационное напыление (PVD), триботехнические свойства, поверхностная инженерия, износостойкость, PVD-покрытия, персонализированные имплантаты.

Keywords: additive manufacturing, elbow joint endoprosthesis, titanium alloy Ti-6Al-4V, physical vapor deposition (PVD), tribotechnical properties, surface engineering, wear resistance, PVD coatings, personalized implants.

Доминирующее положение титановых сплавов, в частности сплава Ti-6Al-4V (BT6), в современной медицине является бесспорным. Это обусловлено уникальным сочетанием высокой удельной прочности, превосходной коррозионной стойкости в физиологических средах и выдающейся биологической инертности, обеспечиваемой стабильным пассивным оксидным слоем. Именно эти свойства сделали его материалом выбора для изготовления ключевых компонентов эндопротезов суставов, костных пластин и внутрикостных фиксаторов, от которых напрямую зависит качество жизни миллионов пациентов [1,4].

Однако парадокс данного материала заключается в том, что его выдающиеся объемные характеристики соседствуют с фундаментальными триботехническими недостатками поверхности. Низкая микротвердость и высокая химическая активность чистого титана определяют его склонность к адгезионному схватыванию, абразивному изнашиванию и фреттинг-коррозии в условиях контактного взаимодействия. Биологический ответ на продукты износа – воспалительная реакция, активация остеокластов и, как следствие, асептическое расшатывание имплантата – остается основной причиной долгосрочных неудач и необходимости сложных ревизионных операций.

В этой связи стратегия поверхностной инженерии, направленная на радикальное улучшение свойств поверхности без изменения оптимальных объемных характеристик основы, признана критически важным направлением. Среди методов модификации поверхности особое место занимают технологии вакуумного конденсационного напыления (Physical Vapor Deposition, PVD), позволяющие синтезировать тонкие (1-5 мкм), сверхтвердые и химически инертные покрытия [5]. Целью данной работы является обоснование необходимости интеграции PVD-технологий в качестве обязательного этапа постобработки аддитивно изготовленных эндопротезов

из Ti-6Al-4V для кардинального повышения их триботехнического ресурса на примере имплантата локтевого сустава.

1. Ti-6Al-4V как материал для аддитивного производства: преимущества и трибологические ограничения

Сплав Ti-6Al-4V является де-факто стандартом для селективного лазерного сплавления (SLM) в медицине благодаря хорошей технологичности при печати и балансу свойств. Его химический состав (основа Ti, 5.3-6.8% Al, 3.5-5.3% V) и ($\alpha+\beta$)-фазовая структура обеспечивают высокую прочность ($\sigma_B > 900$ МПа в отожженном состоянии), усталостную выносливость и устойчивость в физиологических средах [6, 7]. АП позволяет преодолеть ограничения традиционного производства, создавая интегрированные пористые структуры для прорастания кости и сложные формы, точно повторяющие дефект кости пациента [2].

Однако, как показано в многочисленных исследованиях, триботехнические недостатки сплава носят фундаментальный характер и не устраняются в процессе АП [3, 4]. Основные механизмы деградации поверхности включают:

1. Адгезионный износ и схватывание: при контакте под нагрузкой разрушаются пассивные оксидные пленки, и химически активные атомы титана образуют микросварные мостики с контрактирующей поверхностью (металлом или полимером), приводя к вырывам материала [8].

2. Абразивный износ: относительно низкая твердость (~3-4 ГПа) делает поверхность уязвимой для царапания твердыми частицами (гидроксиапатит, продукты износа, остатки костного цемента) [9].

3. Фреттинг-коррозия: в зонах прессовой или винтовой фиксации микросмещения под циклической нагрузкой вызывают синергетическое механико-химическое разрушение, являющееся частой причиной ослабления фиксации [10].

Таким образом, для реализации всего потенциала АП в эндопротезировании локтя необходимо решение проблемы износа на принципиально ином уровне — уровне модификации поверхности.

2. PVD-покрытия как метод решения проблемы износа: принципы и специфика для аддитивных изделий

Вакуумное конденсационное напыление (PVD) — это процесс осаждения тонких пленок в вакууме, при котором материал мишени (катода) переводится в парогазовую фазу (путем распыления ионами или дугового испарения) и конденсируется на поверхности подложки [11]. Для медицинских имплантатов наиболее применимы магнетронное распыление и катодно-дуговое испарение, позволяющие получать биосовместимые покрытия на основе нитридов (TiN, TiAlN, ZrN) или алмазоподобного углерода (DLC) [5, 12].

Ключевыми технологическими параметрами, определяющими качество покрытия, являются:

- Смещение подложки: отрицательный потенциал, приложенный к имплантату, приводит к бомбардировке растущей пленки ионами. Это обеспечивает ионную очистку поверхности, уплотнение покрытия и формирование плотной, беспористой микроструктуры с высокой адгезией [13].
- Температура процесса: обычно ограничена 300-450°C для предотвращения нежелательных фазовых превращений в сплаве Ti-6Al-4V и сохранения его механических свойств [14].
- Подготовка поверхности: для аддитивных изделий критически важна тщательная очистка от остатков металлического порошка и последующая полировка функциональных поверхностей до низкой шероховатости ($Ra < 0.1$ мкм), так как PVD-покрытие повторяет исходный рельеф [15].

Создаваемые PVD-методом покрытия толщиной в несколько микрометров выступают в роли функционального барьера, принимающего на

себя все трибологические нагрузки и полностью изменяющего механизм взаимодействия поверхности с окружающей средой.

3. Влияние PVD-покрытий на триботехнические характеристики

Нанесение PVD-покрытий принципиально меняет функциональные свойства поверхности, трансформируя её из слабого звена в высокоресурсный компонент имплантата. Экспериментальные данные, полученные при исследовании образцов сплава Ti-6Al-4V, демонстрируют комплексный положительный эффект.

- Формирование композитного поверхностного слоя. PVD-технологии создают систему «вязкая/прочная подложка — сверхтвёрдое покрытие». Твёрдость поверхности возрастает на порядок: от ~3.5 ГПа у исходного сплава до 18–22 ГПа для TiN и 25–35 ГПа для TiAlN [16]. При этом важно, что упрочнённое состояние подложки (после закалки и старения), с твёрдостью ~4.4 ГПа, обеспечивает лучшую механическую поддержку тонкому покрытию, повышая критическую нагрузку его отслаивания на 15–25% по сравнению с отожжённым состоянием [17]. Это особенно актуально для высоконагруженных имплантатов.

- Кардинальное снижение и стабилизация коэффициента трения (КТ). Испытания по схеме «шар-диск» в среде, имитирующей синовиальную жидкость, показывают, что непокрытый Ti-6Al-4V характеризуется нестабильным КТ в диапазоне 0.5–0.8 с резкими скачками, что связано с циклами адгезии и среза материала [8, 18]. Нанесение нитридных покрытий подавляет адгезионную составляющую трения, переводя процесс в стабильный режим деформационного и абразивного взаимодействия с КТ 0.3–0.6 [16, 19]. Для алмазоподобных углеродных покрытий (DLC) КТ может достигать экстремально низких значений 0.05–0.15 благодаря формированию графитоподобного трансферного слоя, выступающего в роли твёрдой смазки [12]. Стабильно низкое трение минимизирует динамические нагрузки и разогрев в паре трения имплантата.

- Повышение износостойкости на 1-2 порядка. Ключевой результат — изменение не только количественных показателей, но и качественного механизма износа. Для непокрытого сплава характерен комбинированный адгезионно-абразивный износ с глубокими бороздами и вырывом материала [9]. PVD-покрытия переводят износ в мягкий полирующий режим, при котором происходит постепенное удаление тончайших слоёв покрытия. Коэффициент интенсивности износа k для Ti-6Al-4V без покрытия составляет порядка $10^{-4} - 10^{-3}$ мм³/Н·м, тогда как для образцов с покрытиями TiN и TiAlN этот показатель падает до $10^{-6} - 10^{-5}$ мм³/Н·м [16, 19]. Снижение генерации продуктов износа напрямую коррелирует с уменьшением риска остеолита и асептического расшатывания [1].

- Улучшение коррозионно-механической стойкости. Плотные, беспористые PVD-покрытия служат эффективным диффузионным барьером, изолируя активный титановый субстрат от агрессивной физиологической среды. Это подавляет синергетический процесс фреттинг-коррозии в зонах резьбовых соединений и пресовой посадки компонентов эндопротеза, что является критическим фактором для долговременной стабильности фиксации [10, 19].

4. Синергия аддитивного производства и поверхностной инженерии для эндопротеза локтевого сустава

Локтевой сустав представляет собой сложный биомеханический узел с высокой нагрузкой на малой площади контакта и комплексными движениями (сгибание-разгибание, пронация-супинация). Это предъявляет исключительные требования как к конструкции, так и к материалам имплантата. Комбинированный подход, интегрирующий АП и PVD, предлагает комплексное решение.

1. Разделение задач. Аддитивное производство оптимально решает конструктивно-интеграционные задачи: создание точной анатомической формы для восстановления биомеханики; проектирование и печать интегрированных пористых структур в зонах контакта с костью для

ускоренной и прочной остеоинтеграции; оптимизация веса и распределения напряжений за счёт топологической оптимизации [2, 18]. PVD-технологии решают функционально-эксплуатационные задачи: обеспечение необходимой износостойкости в паре «металл-полиэтилен» (например, головка протеза – полимерный вкладыш) или в потенциальных зонах контакта металлических компонентов; защита от коррозии и фреттинга в резьбовых соединениях пластин или ножек компонентов.

2. Технологическая цепочка. Оптимальный производственный цикл персонализированного эндопротеза локтя должен включать следующие этапы:

- АП (SLM) из порошка Ti-6Al-4V с созданием монолитных и пористых областей.
- Термическая обработка (вакуумный отжиг) для снятия внутренних напряжений и стабилизации структуры [6, 7].
- Прецизионная механическая обработка и полировка исключительно функциональных (трущихся и ответственных) поверхностей до нанометрового уровня шероховатости.
- Нанесение PVD-покрытия (например, TiAlN) на подготовленные поверхности. Использование технологий с фильтрацией плазмы (Filtered Cathodic Arc) позволяет получать покрытия с минимальной шероховатостью, что критически важно для снижения износа полимерного контрагента [12, 19].
- Окончательная очистка и стерилизация.

3. Преодоление ограничений. Комбинация технологий позволяет нивелировать недостатки каждой по отдельности: PVD не может создать сложную трёхмерную пористую структуру, а АП не может придать поверхности требуемую трибостойкость. Вместе они формируют новый класс изделий — функционально-градиентные имплантаты, где свойства материала (пористость, плотность, твёрдость) изменяются в пространстве в соответствии с локальными биомеханическими требованиями.

Таким образом, PVD-покрытия выступают не просто дополнительной опцией, а необходимым завершающим этапом технологической цепочки,

замыкающим цикл создания полнофункционального, ресурсоемкого имплантата. Их применение позволяет в полной мере реализовать клинический потенциал персонализации, обеспечиваемой аддитивными технологиями.

Заключение

Проведенный анализ позволяет сделать следующие ключевые выводы:

1. Аддитивное производство на основе сплава Ti-6Al-4V решает критически важные задачи современной реконструктивной хирургии локтевого сустава, обеспечивая создание анатомически точных, персонализированных имплантатов с интегрированной пористостью для остеоинтеграции.

2. Фундаментальные триботехнические недостатки сплава Ti-6Al-4V (низкая поверхностная твёрдость, склонность к адгезионному износу и фреттинг-коррозии) являются главным лимитирующим фактором долговечности таких имплантатов, не устранимым в процессе 3D-печати.

3. Технологии вакуумного конденсационного напыления (PVD) представляют собой высокоэффективный метод поверхностной инженерии, позволяющий кардинально улучшить трибологические характеристики. Экспериментально подтверждено, что нанесение покрытий (TiN, TiAlN) приводит к:

- Повышению твёрдости поверхности на порядок (до 25–35 ГПа).
- Снижению и стабилизации коэффициента трения (до 0.3–0.6).
- Увеличению износостойкости на 1–2 порядка за счёт подавления адгезионных механизмов и перехода к мягкому полирующему износу.

4. Синергия технологий АП и PVD создаёт целостный производственно-технологический подход. АП отвечает за оптимальное конструктивное решение (геометрия, пористость), в то время как PVD обеспечивает необходимое функциональное качество (износостойкость, низкое трение) ответственных поверхностей. Только их комбинация позволяет

создать полнофункциональный имплантат, в котором преимущества персонализации не нивелируются преждевременным износом.

Таким образом, интеграция методов поверхностной инженерии, в частности PVD-покрытий, в технологическую цепочку изготовления аддитивных эндопротезов является не дополнительной опцией, а обязательным условием для выхода на новый уровень их клинической надёжности и долговечности. Дальнейшие исследования должны быть направлены на оптимизацию параметров PVD-процесса для специфики аддитивно полученных поверхностей и стандартизацию этого комбинированного подхода в практике производства медицинских имплантатов.

Литература

1. Бубнов Валерий Андрианович, Князев Андрей Николаевич Титан и его сплавы в машиностроении // Вестник Курганского государственного университета. 2016. №3 (42).
2. Wang X, Xu S, Zhou S, Xu W, Leary M, Choong P, Qian M, Brandt M, Xie YM. Topological design and additive manufacturing of porous metals for bone scaffolds and orthopaedic implants: A review. *Biomaterials*. 2016 Mar
3. Budinsky, K.G. (1991) Tribological Properties of Titanium Alloys. *Wear*, 151, 203-217. [http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648\(91\)90249-T](http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648(91)90249-T)
4. Панин П. В., Дзунович Д. А., Алексеев Е. Б. Фазовый состав и структура титанового сплава ВТ6, дополнительно легированного водородом, после вакуумного отжига // Труды ВИАМ. 2016. №2 (38).
5. Mattox, D.M. *The Foundations of Vacuum Coating Technology*. – Norwich: William Andrew, 2003. – 520 p.
6. Kar S., Searles T., Lee E., Viswanathan G.B., Ti-ley J., Banerjee R., Fraser H.L. Modeling the tensile properties in p-processed a/p Ti alloys // *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2006. Vol. 37A. Marth. P. 559-566.
7. Герман М.А. Влияние термической и термоводородной обработок на формирование структуры и механические свойства заготовок из $(\alpha+\beta)$ -

титановых сплавов, полученных по аддитивным технологиям: дисс. ... канд. техн. наук. М., 2020. 180 с.

8. Мухаметрахимов М.Х., Лутфуллин Р.Я. Влияние вакуумного отжига на структуру и механические свойства наноструктурированного сплава ВТ6 // Деформация и разрушение. - 2008. - № 10. - С. 3842.

9. Захарченко Кирилл Владимирович, Капустин Владимир Иванович, Ларичкин Алексей Юрьевич УСКОРЕННАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ Тi-6AL-4V И AL-CU-MG // Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты. 2021. №4.

10. Усталость металлических материалов / В.Ф. Терентьев ; Рос. акад. наук. Ин-т металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова. - Москва : Наука, 2003 (ППП Тип. Наука). - 253, [1] с. : ил.; 22 см.; ISBN 5-02-033062-0

11. Zhang Z, Zhang L, Yuan H, Qiu M, Zhang X, Liao B, Zhang F, Ouyang X. Tribological Behaviors of Super-Hard TiAlN Coatings Deposited by Filtered Cathode Vacuum Arc Deposition. *Materials (Basel)*. 2022 Mar 17;15(6):2236. doi: 10.3390/ma15062236. PMID: 35329688; PMCID: PMC8950791.

12. Application of PVD coatings in medical implantology for improving tribological properties // *Heliyon*. – 2024. – Vol. 10, iss. 15. – DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e11363861.

13. DebRoy, T. et al. «Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties» // *Progress in Materials Science*, 2018. – Vol. 92. – P. 112-224

14. Liu, S., & Shin, Y.C. «Additive manufacturing of Ti6Al4V alloy: A review» // *Materials & Design*, 2019. – Vol. 164. – P. 107552

15. Yu Sun, Weidong Zeng, Yuanfei Han, Yongqing Zhao, GuiWang, Matthew S. Dargusch, Ping Guo. Modeling the correlation between microstructure and the properties of the Ti-6Al-4V alloy based on an artificial neural network // *Materials Science and Engineering: A*. 2011. Vol. 528, Issues 29-30. 15 November. P. 8757-8764.

16. Таблица твердости по Бринеллю, Роквеллу, Виккерсу, Шору: справочные данные // Теккос. – 2019. – URL: <https://tekkos.ru/katalog/poleznaya-informatsiya/tablica-tverdosti-po-brinellyu-rokvellu-vickersu-shoru.html/>

17. Effect of Vacuum Heat Treatment on the Microstructure and Tribological Properties of Cu-coated Ti–6Al–4V // Advanced Engineering Materials. – 2023. – DOI: 10.1002/adem.202300246.

18. Zadpoor A.A. Bone tissue regeneration: the role of scaffold geometry. Biomaterials Science. 2015.

19. Wang Y., Zhang X., Li J. Corrosion and hardness characteristics of Ti/TiN-modified Ti6Al4V alloy in marine environment // Ceramics International. – 2023. – Vol. 48, iss. 2. – P. 8619–8630. – DOI: 10.1016/j.ceramint.2022.02.8619.

Literature

1. Bubnov Valery Andrianovich, Knyazev Andrey Nikolaevich Titanium and its alloys in mechanical engineering // Bulletin of Kurgan State University. 2016. №3 (42).

2. Wang X, Xu S, Zhou S, Xu W, Leary M, Choong P, Qian M, Brandt M, Xie YM. Topological design and additive manufacturing of porous metals for bone scaffolds and orthopaedic implants: A review. Biomaterials. 2016 Mar

3. Budinsky, K.G. (1991) Tribological Properties of Titanium Alloys. Wear, 151, 203-217. [http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648\(91\)90249-T](http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648(91)90249-T)

4. Panin P. V., Dzunovich D. A., Alekseev E. B. Phase composition and structure of VT6 titanium alloy additionally alloyed with hydrogen after vacuum annealing // Proceedings of VIAM. 2016. №2 (38).

5. Mattox, D.M. The Foundations of Vacuum Coating Technology. – Norwich: William Andrew, 2003. – 520 p.

6. Kar S., Searles T., Lee E., Viswanathan G.B., Ti-ley J., Banerjee R., Fraser H.L. Modeling the tensile properties in p-processed a/p Ti alloys // Metallurgical and Materials Transactions A. 2006. Vol. 37A. Marth. P. 559-566.

7. German M.A. The influence of thermal and thermohydrogen treatments on the formation of the structure and mechanical properties of blanks from ($\alpha+\beta$)-titanium

alloys obtained using additive technologies: dissertation of the Candidate of Technical Sciences, Moscow, 2020. 180 p.

8. Mukhametrakhimov M.X., Lutfullin R.Ya. The effect of vacuum annealing on the structure and mechanical properties of nanostructured VT6 alloy // Deformation and fracture. - 2008. - No. 10. - p. 3842.

9. Zakharchenko Kirill Vladimirovich, Kapustin Vladimir Ivanovich, Larichkin Alexey Yuryevich ACCELERATED ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL FACTORS ON THE STRENGTH CHARACTERISTICS OF Ti-6Al-4V AND AL-CU-MG // Metalworking: technology, equipment, tools. 2021. No.4.

10. Fatigue of metallic materials / V.F. Terentyev ; Russian Academy of Sciences. A.A. Baykov Institute of Metallurgy and Materials Science. Moscow : Nauka Publ., 2003 (SPP. Tip. Nauka). - 253, [1] p. : ill.; 22 cm.; ISBN 5-02-033062-0

11. Zhang Z, Zhang L, Yuan H, Qiu M, Zhang X, Liao B, Zhang F, Ouyang X. Tribological Behaviors of Super-Hard TiAlN Coatings Deposited by Filtered Cathode Vacuum Arc Deposition. *Materials (Basel)*. 2022 Mar 17;15(6):2236. doi: 10.3390/ma15062236. PMID: 35329688; PMCID: PMC8950791.

12. Application of PVD coatings in medical implantology for improving tribological properties // *Heliyon*. – 2024. – Vol. 10, iss. 15. – DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e11363861.

13. DebRoy, T. et al. «Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties» // *Progress in Materials Science*, 2018. – Vol. 92. – P. 112-224

14. Liu, S., & Shin, Y.C. «Additive manufacturing of Ti6Al4V alloy: A review» // *Materials & Design*, 2019. – Vol. 164. – P. 107552

15. Yu Sun, Weidong Zeng, Yuanfei Han, Yongqing Zhao, GuiWang, Matthew S. Dargusch, Ping Guo. Modeling the correlation between microstructure and the properties of the Ti-6Al-4V alloy based on an artificial neural network // *Materials Science and Engineering: A*. 2011. Vol. 528, Issues 29-30. November 15. pp. 8757-8764.

16. Brinell, Rockwell, Vickers, Shore hardness table: reference data // Tekkos. – 2019. – URL: <https://tekkos.ru/katalog/poleznaya-informatsiya/tablica-tverdosti-po-brinellyu-rokvellu-vickersu-shoru.html/>

17. Effect of Vacuum Heat Treatment on the Microstructure and Tribological Properties of Cu-coated Ti–6Al–4V // *Advanced Engineering Materials*. – 2023. – DOI: 10.1002/adem.202300246.

18. Zadpoor A.A. Bone tissue regeneration: the role of scaffold geometry. *Biomaterials Science*. 2015.

19. Wang Y., Zhang X., Li J. Corrosion and hardness characteristics of Ti/TiN-modified Ti6Al4V alloy in marine environment // *Ceramics International*. – 2023. – Vol. 48, iss. 2. – P. 8619–8630. – DOI: 10.1016/j.ceramint.2022.02.8619.