



www.volsu.ru



DOI: <https://doi.org/10.15688/NBIT.jvolsu.2023.1.1>

УДК 616.71:620.22

ББК 30.377

## О ПРИМЕНЕНИИ НАНОТЕХНОЛОГИЙ В ВЕТЕРИНАРНОЙ И ЧЕЛОВЕЧЕСКОЙ ОРТОПЕДИИ: ИМПЛАНТАЦИЯ И ПРОТЕЗИРОВАНИЕ

**Элеонора Тимуровна Джафарова**

Студент, кафедра судебной экспертизы и физического материаловедения,  
Волгоградский государственный университет  
NMTb-221\_442372@volsu.ru  
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

**Сергей Владимирович Борознин**

Кандидат физико-математических наук, доцент,  
заведующий кафедрой судебной экспертизы и физического материаловедения,  
Волгоградский государственный университет  
boroznin@volsu.ru  
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

**Аннотация.** В работе представлен обзор последних достижений в области синтетических материалов, используемых в ортопедических имплантатах. Он охватывает применение биосовместимых полимеров и полиуретанов, а также нанотехнологий для улучшения интеграции имплантатов и заживления костей. В статье обсуждается важность моделирования поведения имплантата для увеличения шансов успешной имплантации и разработки новых композитных покрытий, которые лучше имитируют структуру кости. Целью этого исследования является создание нового поколения ортопедических имплантатов, которые предлагают улучшенную интеграцию с окружающей костной тканью и более быстрое заживление.

**Ключевые слова:** экзопротезы, эндопротезы, имплантаты, биосовместимость, механическая прочность материалов, нанотрубки, полиметилметакрилат, полимеры последнего поколения.

**Технологии, применяемые  
в ветеринарной ортопедии**

Протезы культевой гильзы (рис. 1), применяемые после частичной ампутации конечности, широко используются в медицине и доступны для животных. У людей это приводит к частым проблемам, включая натирание кожи, инфекцию и некроз тканей, особенно до акклиматизации культы. Данный вид протезов предусматривает сложное и трудоемкое обслуживание. Эти ограничения могут часто усугубляться в ветеринарии из-за неоптимального соблюдения требований владельцами животных.

Ограничений такого протеза, связанных с кожной впадиной, можно избежать за счет использования чрезкожных протезов [4], которые в целом представляют собой эндопротез, инертный имплантат, прикрепленный к реципиентной конечности, и экзопротез, прикрепленный к выступающей части эндопротеза. При этом механическая нагрузка передается от экзопротеза к кости на уровне культы с помощью эндопротеза. Кожная ткань прилегает к костной структуре с достаточной прочностью, чтобы предотвратить инфекцию. Мягкая ткань-имплантат, который действует

как барьер для экзогенных агентов, может предотвратить разрастание эпителия. Конструкция эндопротеза выполняет двойную биологическую функцию: способствует осмотической и кожной интеграции на стыке конечности и имплантата, тем самым обеспечивая постоянную биологическую герметизацию; и механическую функцию соединения конечности с экзопротезом.

**Технологии, применяемые  
в медицинской ортопедии**

Использование биосовместимых материалов в медицинской промышленности резко возросло за последние два десятилетия. Золото, серебро и железо являются одними из металлов, наиболее часто используемых в производстве длинных штифтов для переломов костей и спинномозговых тросов. Совместное / замещение сломанной / поврежденной кости является основным применением биосовместимых материалов в ортопедии. После изучения эти материалы используются в качестве долгосрочных имплантатов, винтов и штифтов. Поскольку кость настолько чувствительна к изменениям своих механических свойств даже на микроскопическом уровне

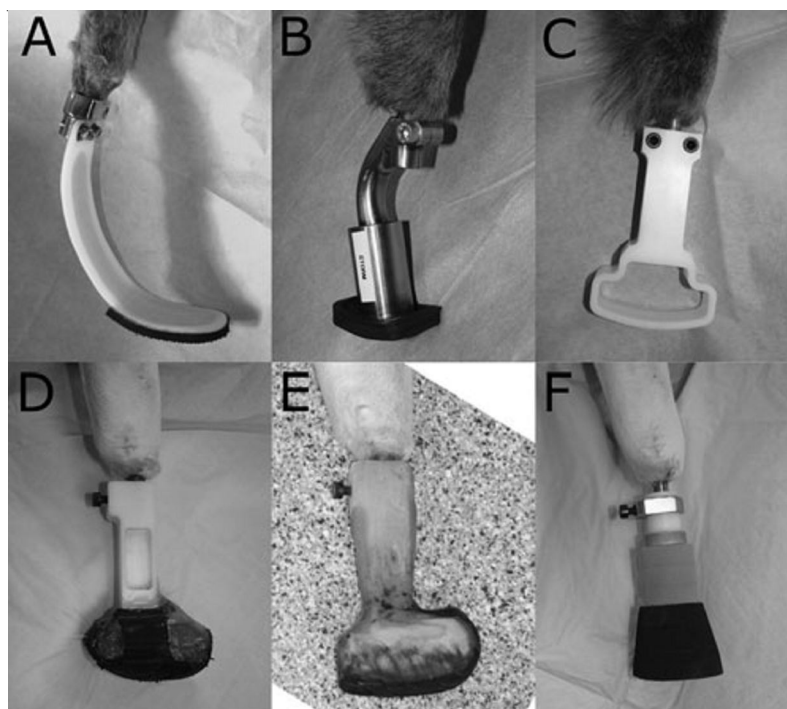


Рис. 1. Внешний вид современных протезов

не, имплантаты могут влиять на клеточные реакции, такие как дифференцировка и минерализация. При восстановлении кости механические характеристики материалов имплантата играли главную роль и оказывали значительное влияние. Сочетание механической прочности материала с его способностью противостоять переломам идеально подходит для материалов для трансплантации. По сравнению с другими типами материалов предел прочности при растяжении металлов является самым высоким, за ними следуют полимеры и керамика (кроме диоксида циркония). По сравнению с керамикой прочность на растяжение, пластичность и устойчивость к коррозии – все это области, в которых металлы превосходят другие. Металлический биоматериал имеет несколько недостатков, которые необходимо устранить. Важнейшим из них является выделение токсичных элементов из металлов при коррозии металлов. Среди наиболее распространенных примеров – сплавы кобальта, сплавы нержавеющей стали, сплавы титана и несколько других видов металлических биоматериалов. С 1930-х гг. аустенитная нержавеющая сталь использовалась примерно в девяноста процентах устройств для остеосинтеза. И биосовместимость, и меха-

ническая прочность материала были выдающимися качествами. Включение хрома в концентрации более 18 % вносит значительный вклад как в присущую этим материалам прочность, так и в износостойкость. Первое использование титана относится к 1950-м гг., когда он применялся в аэрокосмической промышленности. С тех пор материал был модифицирован для медицинских имплантатов человека (рис. 2).

### Материалы, используемые в ортопедии

Первыми материалами, используемыми для имплантационных устройств, были металлы и сплавы из-за их повышенной прочности и определенной биологической инертности. Металлы, выбранные для имплантата, включают: железо, кобальт, никель, титан и цирконий. Комбинации металлов направлены на получение конкретных свойств в конечном изделии: эластичность, прочность, пластичность (для снижения риска образования трещин) и коррозионной стойкости.

Нержавеющая сталь 18-8 (18 % хрома, 8 % никеля) является наиболее распространенным сплавом. Она имеет превосходную

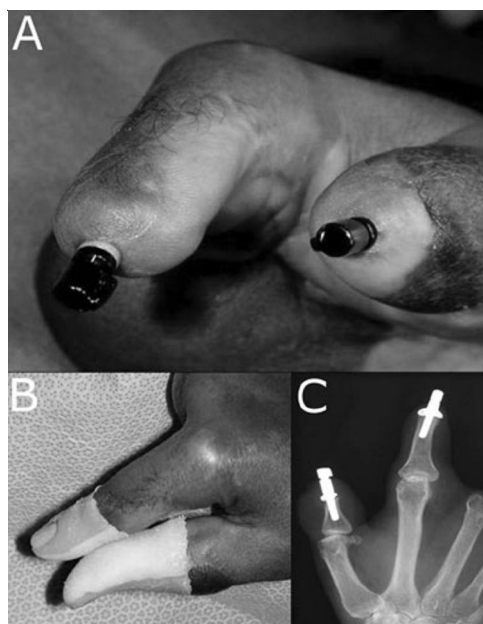


Рис. 2. Фотографии (B) и (A) (человека) демонстрируют внешний вид *in vivo* (на живом организме) с экзопротезом и без него соответственно. (C) представляет собой дорсовольярную рентгенограмму того же пациента, демонстрирующую внутрикостные стержневые и подкожные выступающие компоненты устройства *in situ* (в месте нахождения, в естественной среде)

коррозионную стойкость, полученную за счет модификаций состава с использованием дополнительных металлов, особенно Cr. Присутствие Cr позволяет Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> образовывать прочный адгезивный слой, способствующий заживлению. Нержавеющая сталь широко используется в съёмных ортопедических изделиях. В настоящее время новые нержавеющие сплавы на основе стали содержат Co-Cr, Ni, Mn с высоким содержанием азота.

Сплавы на основе кобальта превосходят нержавеющую сталь по прочности. Они имеют преимущество лучшей биосовместимости, они более устойчивы к коррозии, чем нержавеющая сталь, но более дороги в производстве. Некоторые варианты сплава, состоящего из кобальт-хром-молибден часто используются для имплантатов в протезах бедра.

Нанотрубки диоксида титана (TiO<sub>2</sub>), на взгляд ученых, могут ускорить адгезию (сцепление поверхностей разнородных тел) и дифференцировку остеобластов (клетки, образующие костную ткань) [2].

Полиметилметакрилат также известен как «акриловый цемент». Это универсальное соединение применяется в офтальмологии, стоматологии, а также ортопедии. В ортопедии ПММА используется для эндопротезирования тазобедренного сустава, фиксации переломов позвоночника, в качестве постоянного заменителя кости при лечении патологических переломов [2].

Полиуретан является очень универсальным и недорогим материалом и поэтому используется во многих медицинских целях. Полиуретаны могут быть полностью биосовместимыми (для постоянной имплантации), а также биоразлагаемыми (рассасывающиеся каркасы для регенерации тканей).

Хром-6 содержится в различных медицинских имплантатах из металла, например для бедер и коленей [1].

### **Аналоги и инновационные решения**

Компания Nanovis, основанная в 2008 г. Брайаном Эмериком и получившая лицензию на интеллектуальную собственность исследовательского фонда Purdue, стала лидером на рынке нанотехнологий, используемых для улучшения биологического ответа имплантирован-

ных ортопедических устройств. Через свою дочернюю компанию Nanovis Spine компания Nanovis коммерциализировала свою запатентованную поверхность из биокерамических нанотрубок на семействе спинальных имплантатов, включая усиленные промежуточные тела с пористыми титановыми концевыми пластинами и транспедикулярными винтами.

Технология обладает контролируемой наноструктурированной поверхностью, состоящей из массивов нанотрубок со средним размером пор 60–80 нм. Было показано, что эти массивы нанотрубок увеличивают и ускоряют производство кальцифицированного внеклеточного матрикса на остеобластах человека и мезенхимальных стволовых клетках человека через 21 день *in vitro* по сравнению с другими поверхностями, обычно используемыми в ортопедии [5].

Австралийские исследователи разработали новый тип искусственного сустава, состоящий из материала самой кости, который, вероятно, оставит титановые имплантаты в прошлом [3].

Ученые из Университета Мердока создали минеральный порошок, который сделан из основного компонента кости – керамического материала гидроксиапатита. Порошок изготовлен с использованием нанотехнологических методов, в которых ученые используют субмикроскопические частицы вещества для решения одной из самых больших проблем имплантации. Новые имплантаты могут быть отлиты в любую форму и благодаря «известному» организму материалу адаптируются гораздо быстрее, чем их классические предшественники.

Исследовательскую группу возглавляет доктор Джерард Эдди Пойнерн, руководитель Исследовательской группы по прикладным нанотехнологиям Университета, который уверен, что новая нанотехнология группы приведет к полной замене классической титановой пластины наногидроксиапатитовой в ближайшем будущем. Эта пластина, которая легко принимается и адаптируется к организму. Одним из рисков, связанных с операцией по замене сустава, является возможность инфицирования в области, окружающей имплантированный сустав. Если классические методы лечения инфекции антибиотиками не помогают, в

таких случаях имплантат необходимо удалить, что приведет к дополнительным осложнениям.

Доктор Пойнерн говорит, что антибиотики можно добавлять в смесь наногидроксиапатита, не влияя на ее механические свойства. В то же время антибиотики начинают действовать немедленно, предотвращая развитие бактерий. Шансы на успешное лечение инфекции значительно увеличиваются, а риск отторжения имплантата значительно снижается. Новый состав смеси наногидроксиапатита в качестве основного компонента неорганических костных материалов, разработанный учеными, повышает биосовместимость и биологическую активность соединения, что позволяет организму быстрее восстанавливаться.

Кости состоят из маленьких палочек гидроксиапатита, которые часто распадаются на причудливые формы. Поскольку смесь имеет исходную форму порошка, ей можно придать любую форму, например, винты, пластины различной кривизны и т. д. Чтобы получить наногидроксиапатит для экспериментальных имплантатов, ученые использовали сферические наночастицы диаметром около 37 нм, состоящие из фосфатов и нитратов различных комбинаций кальция. Эти композиции образуют минеральные наносферы при ультразвуковом нагревании.

### Выводы

Синтетические материалы на основе биосовместимых полимеров последнего поколения способны предоставить несколько возможностей для воспроизведения анатомической структуры, реабсорбции в течение определенного периода времени или вызывая определенный ответ биологической среды.

Полиуретаны являются наиболее подходящим материалом для механических ортопедических приспособлений. Мы также считаем, что нанотехнологии очень важны в улучшении ортопедических имплантатов. Наконец, синтетические материалы позволяют моделировать поведение имплантируемого устройства, таким образом, увеличивая шансы на успех в процедуре имплантации.

Разработка новых методов и стратегий композитных покрытий, лучше имитирующих структуру кости, привели бы к появлению нового поколения ортопедических имплантатов

с улучшенной интеграцией имплантата и заживлением кости.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chroom-6 en medische implantaten / V. C. de Leeuw [et al.] // Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu RIVM. – 2022. – 35 p. – DOI: 10.21945/RIVM-2022-0043
2. Complications of Titanium and Stainless Steel Elastic Nail Fixation of Pediatric Femoral Fractures / E. D. Wall [et al.] // The Journal of Bone and Joint Surgery. American Volume. – 2008. – Vol. 90 (6). – P. 1305–1313. – DOI: 10.2106/JBJS.G.00328
3. Implants and Prosthetics // FDA. U.S. Food and Drug Administration. – Electronic text data. – Mode of access: <https://www.fda.gov/medical-devices/products-and-medical-procedures/implants-and-prosthetics>
4. Intraosseous Transcutaneous Amputation Prosthesis (ITAP) for Limb Salvage in 4 Dogs / N. Fitzpatrick [et al.] // Veterinary Surgery. – 2011. – Vol. 40(8). – P. 909–925. – DOI: 10.1111/j.1532-950X.2011.00891.x
5. Tomorrow's Technologies Today – Nanovis. – Electronic text data. – Mode of access: <https://nanovistechnology.com/>

### REFERENCES

1. Leeuw V.C. de, Braver-Sewradj S.P. den, Geertsma R.E., Ezendam J., Beijer N.R.M. Chroom-6 en medische implantaten. *Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu RIVM*, 2022. 35 p. DOI: 10.21945/RIVM-2022-0043
2. Wall E.D., Jain V., Vora V., Melman C.T., Crawford A.H. Complications of Titanium and Stainless Steel Elastic Nail Fixation of Pediatric Femoral Fractures. *The Journal of Bone and Joint Surgery. American Volume*, 2008, vol. 90, no. 6, pp. 1305–1313. DOI: 10.2106/JBJS.G.00328
3. Implants and Prosthetics. *FDA U.S. Food and Drug Administration*. 2019. URL: <https://www.fda.gov/medical-devices/products-and-medical-procedures/implants-and-prosthetics>
4. Fitzpatrick N., Smith T.J., Pendegrass C.J., Yeadon R., Ring M., Goodship A.E., Blunn G.W. Intraosseous Transcutaneous Amputation Prosthesis (ITAP) for Limb Salvage in 4 Dogs. *Veterinary Surgery*, 2011, vol. 40, no. 8, pp. 909–925. DOI: 10.1111/j.1532-950X.2011.00891.x
5. *Tomorrow's Technologies Today – Nanovis*. URL: <https://nanovistechnology.com>

**ON THE APPLICATION OF NANOTECHNOLOGIES  
IN VETERINARY AND HUMAN ORTHOPEDICS:  
IMPLANTATION AND PROSTHETICS**

**Eleonora T. Dzhafarova**

Student, Department of Forensic Examination and Physical Materials Science,  
Volgograd State University  
NMTb-221\_442372@volsu.ru  
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

**Sergey V. Boroznin**

Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Associate Professor,  
Head of the Department of Forensic Examination and Physical Materials Science,  
Volgograd State University  
boroznin@volsu.ru  
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

**Abstract.** The field of orthopedic implant materials has advanced greatly in recent years, with synthetic materials on the forefront of development. The use of biocompatible polymers has allowed for the creation of materials capable of reproducing anatomical structures, resorbing over time, or eliciting specific biological responses. Polyurethanes are particularly suitable for mechanical orthopedic devices, and nanotechnology has emerged as a critical component in improving orthopedic implants. Synthetic materials also allow for the modeling of implant behavior, thus increasing the likelihood of successful implantation procedures. The development of new composite coating methods that better mimic bone structure would lead to the creation of a new generation of orthopedic implants with improved implant integration and bone healing. The addition of antibiotics to nanohydroxyapatite mixtures has been shown to prevent bacterial growth, increasing the chances of successful infection treatment and reducing the risk of implant rejection. The use of spherical nanoparticles in nanohydroxyapatite synthesis allows for the creation of powders that can be formed into any desired shape, such as screws, plates, and other forms. In conclusion, synthetic materials hold the significant potential for improving orthopedic implant technology, offering a range of possibilities for reproducing anatomical structures, eliciting biological responses, and resorbing over time. The use of polyurethanes, nanotechnology, and composite coatings offers promising avenues for future development, while the addition of antibiotics to nanohydroxyapatite mixtures and the use of spherical nanoparticles in synthesis represent significant advances in the field.

**Key words:** exoprostheses, endoprostheses, implants, biocompatibility, mechanical strength of materials, nanotubes, polymethyl methacrylate, latest generation polymers.