

DOI: <https://doi.org/10.17816/JOWD646842>

EDN: DNCIAR



Адгезия *Staphylococcus aureus* на медицинских имплантатах из титана и полипропилена: сравнительное исследование

О.А. Иванов^{1,2}, В.Ф. Беженарь¹, В.В. Тец¹, П.М. Паластин^{1,2}, К.М. Кардава¹,
Д.Л. Панкратов¹, А.П. Никитина¹

¹ Первый Санкт-Петербургский медицинский университет им. акад. И.П. Павлова, Санкт-Петербург, Россия;

² Городская Мариинская больница, Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Инфекционные осложнения, связанные с использованием медицинских имплантатов, представляют собой серьезную проблему, особенно в случае использования материалов, склонных к колонизации бактериями и образованию биопленок. *Staphylococcus aureus* является одним из наиболее значимых патогенов, вызывающих имплантат-ассоциированные инфекции. Физико-химические свойства поверхности имплантатов, такие как шероховатость, гидрофобность и химический состав, влияют на адгезию микроорганизмов. В настоящее время недостаточно сравнительных данных об адгезии *Staphylococcus aureus* на различных материалах, используемых в гинекологической практике, включая полипропилен и титан. Изучение этого процесса необходимо для снижения риска инфекционных осложнений и оптимизации свойств имплантатов.

Цель исследования — провести сравнительный анализ адгезии *Staphylococcus aureus* на титановых и полипропиленовых имплантатах с оценкой влияния их физико-химических характеристик на процесс бактериального прикрепления.

Методы. В экспериментальном сравнительном исследовании *in vitro* использовали два типа медицинских сетчатых имплантатов: полипропиленовый (Gynemesh PS, Johnson & Johnson, США) и титановый («Титановый шелк», ООО «Эластичные титановые имплантаты», Россия). Для оценки адгезивных свойств суточную культуру *Staphylococcus aureus* VT209 инкубировали с образцами имплантатов при температуре 37°C в течение 1 ч. После промывания имплантатов проводили количественный анализ адгезированных бактерий методом посева на питательную среду. Для изучения микроструктуры и химического состава поверхности применяли сканирующую электронную микроскопию и рентгено-спектральный микроанализ.

Результаты. Количественные показатели адгезии *Staphylococcus aureus* на титановых и полипропиленовых сетках были сходными ($p > 0,05$), однако по распределению бактерий на поверхности материалы отличались. На полипропиленовых имплантатах бактерии адгезировались равномерно, тогда как на титане наблюдали локальную концентрацию микроорганизмов на краевых участках. Сканирующая электронная микроскопия выявила наличие шероховатостей и микродефектов на краях титановых имплантатов, что, по-видимому, способствует повышенной бактериальной адгезии. Рентгеноспектральный микроанализ показал различия по химическому составу центральной и краевой зон титановых имплантатов: в краевых областях присутствовали дополнительные элементы (углерод, кислород, фтор, железо), вероятно, связанные с механической обработкой и окислительными процессами.

Заключение. Несмотря на сопоставимое количество адгезированных бактерий на титановых и полипропиленовых имплантатах, выявленные различия в распределении микроорганизмов указывают на повышенный риск инфекционных осложнений в зонах механической обработки титана. Необходимо дальнейшее изучение способов модификации поверхности титановых имплантатов для минимизации адгезии бактерий, включая улучшение методов их обработки и применение антимикробных покрытий. Полученные результаты можно использовать для разработки более безопасных медицинских имплантатов и снижения частоты имплантат-ассоциированных инфекций.

Ключевые слова: сетчатый имплантат; полипропилен; титан; адгезия; золотистый стафилококк.

Как цитировать

Иванов О.А., Беженарь В.Ф., Тец В.В., Паластин П.М., Кардава К.М., Панкратов Д.Л., Никитина А.П. Адгезия *Staphylococcus aureus* на медицинских имплантатах из титана и полипропилена: сравнительное исследование // Журнал акушерства и женских болезней. 2025. Т. 74. № 4. С. 25–34. DOI: 10.17816/JOWD646842 EDN: DNCIAR

DOI: <https://doi.org/10.17816/JOWD646842>

EDN: DNCIAR

***Staphylococcus aureus* Adhesion to Titanium and Polypropylene Medical Implants: A Comparative Study**

Oleg A. Ivanov^{1,2}, Vitaly F. Bezhenar¹, Victor V. Tetz¹, Peter M. Palastin^{1,2}, Kristina M. Kardava¹, Danil L. Pankratov¹, Anastasiia P. Nikitina¹

¹ Academician I.P. Pavlov First St. Petersburg State Medical University, Saint Petersburg, Russia;

² City Mariinsky Hospital, Saint Petersburg, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: Infectious complications associated with the use of medical implants pose a significant challenge, particularly for materials prone to bacterial colonization and biofilm formation. *Staphylococcus aureus* is one of the most critical pathogens responsible for implant-associated infections. The physicochemical properties of implant surfaces, such as roughness, hydrophobicity, and chemical composition, influence bacterial adhesion. Currently, there is insufficient comparative data on *Staphylococcus aureus* adhesion to different materials used in gynecological practice, including polypropylene and titanium. Studying this process is essential for reducing the risk of infectious complications and optimizing implant properties.

AIM: The aim of this study was to conduct a comparative analysis of *Staphylococcus aureus* adhesion to titanium and polypropylene implants, assessing the impact of their physicochemical characteristics on bacterial attachment.

METHODS: This experimental comparative *in vitro* study examined two types of medical mesh implants made of polypropylene (Gynemesh PS, Johnson & Johnson, USA) and titanium (Titanium Silk, Elastic Titanium Implants Ltd., Russia). To assess the adhesive properties, a daily culture of *Staphylococcus aureus* VT209 was incubated with implant samples at 37 °C for 1 hour. After washing, bacterial adhesion was quantitatively assessed using culture-based methods. Scanning electron microscopy and energy-dispersive X-ray spectroscopy were employed to analyze surface microstructure and chemical composition.

RESULTS: Quantitative adhesion levels of *Staphylococcus aureus* to titanium and polypropylene meshes were similar ($p > 0.05$); however, bacterial distribution patterns differed. Polypropylene implants showed uniform bacterial adhesion, whereas titanium implants exhibited localized bacterial concentration at the edges. Scanning electron microscopy analysis revealed surface roughness and microdefects at the edges of titanium implants, likely contributing to increased bacterial adhesion. Energy-dispersive X-ray spectroscopy analysis indicated differences in chemical composition between central and edge regions of titanium implants, with edge areas containing additional elements (carbon, oxygen, fluorine, iron), possibly introduced during mechanical processing and oxidation.

CONCLUSION: While the overall bacterial adhesion levels on titanium and polypropylene implants were comparable, the observed differences in bacterial distribution suggest an increased risk of infection in mechanically processed titanium areas. Further research is needed to explore surface modification strategies for titanium implants to minimize bacterial adhesion, including improved surface treatments and antimicrobial coatings. These findings may contribute to the development of safer medical implants and a reduction in implant-associated infections.

Keywords: mesh implant; polypropylene; titanium; adhesion; *Staphylococcus aureus*.

To cite this article

Ivanov OA, Bezhenar VF, Tetz VV, Palastin PM, Kardava KM, Pankratov DL, Nikitina AP. *Staphylococcus aureus* Adhesion to Titanium and Polypropylene Medical Implants: A Comparative Study. *Journal of Obstetrics and Women's Diseases*. 2025;74(4):25–34. DOI: 10.17816/JOWD646842 EDN: DNCIAR

ОБОСНОВАНИЕ

Пролапс тазовых органов представляет собой широко распространенную патологию, частота ее встречаемости варьирует в пределах 3–85% женского населения. Данный показатель зависит от множества факторов, включая социально-экономический статус, уровень жизни и качество медицинской помощи [1]. Одним из наиболее эффективных методов лечения пролапса тазовых органов является хирургическая коррекция с применением сетчатых имплантатов, направленная на восстановление анатомической структуры и функциональности органов малого таза [2]. Однако данный подход сопряжен с риском развития специфических осложнений. Наиболее значимые из них: инфекционные процессы, эрозия стенок влагалища, протрузия имплантата в просвет влагалища, мочевого пузыря или прямой кишки, смещение и деформация протеза, диспареуния, а также синдром хронической тазовой боли. Эти осложнения объединены в группу так называемых mesh-ассоциированных патологий [3–5].

Особую проблему представляют инфекционные осложнения, связанные с использованием сетчатых имплантатов, характеризующиеся высокой степенью тяжести и сложностью лечения, вплоть до летальных исходов. Основной причиной развития осложнений является способность бактерий формировать биопленки на поверхности имплантата, что обеспечивает их устойчивость к воздействию иммунной системы и антибактериальной терапии [6–7].

Инфекционные осложнения при использовании имплантатов могут быть обусловлены как экзогенными, так и эндогенными факторами. К числу экзогенных источников относят воздух в операционной, хирургические инструменты, одежду медицинского персонала и кожу пациента. Эндогенное инфицирование связано с проникновением микроорганизмов из кишечника в системный кровоток [8–10]. Эти факторы делают инфекционные осложнения одними из наиболее серьезных и трудноустраняемых [11, 12]. Особую опасность представляют бактериальные биопленки, демонстрирующие высокую устойчивость к антибиотикам, и механизм иммунной защиты, значительно затрудняющий эрадикацию бактерий [13–16].

Адгезия микроорганизмов к поверхности имплантатов определена комплексом физико-химических характеристик как самого материала, так и бактерий, а также параметрами окружающей среды [17–21]. Например, исследования продемонстрировали, что плазменная обработка титановых поверхностей способствует образованию оксидной пленки, существенно снижающей адгезию бактерий, включая *Staphylococcus aureus* (*S. aureus*) [22]. Кроме того, модификация поверхности имплантатов с использованием антимикробных пептидов или покрытий на основе серебра может значительно снизить риск развития инфекций [23, 24].

S. aureus представляет собой одну из наиболее значимых угроз в контексте инфекций, связанных с импланта-

тами, благодаря своей высокой адгезивной способности и склонности к образованию биопленок [25]. Однако в настоящее время в научной литературе недостаточно данных для сравнительного анализа адгезивных свойств *S. aureus* на поверхностях имплантатов, изготовленных из различных материалов, таких как полипропилен и титан. Это подтверждает необходимость дальнейших исследований в данной области [7, 25, 26].

Физико-химические характеристики поверхности имплантата, такие как гидрофобность и шероховатость, играют ключевую роль в процессе адгезии микроорганизмов [27, 28]. Установлено, что увеличение шероховатости поверхности способствует усилению адгезии бактерий, что делает выбор материала и методов его обработки критически важным для минимизации риска инфекций [28, 29]. Современные методы обработки, такие как лазерная абляция или нанесение микрочастиц, позволяют модифицировать адгезивные свойства материалов, что открывает новые перспективы для создания более безопасных имплантатов [29].

Для снижения риска инфекционных осложнений, связанных с использованием имплантатов, необходимо учитывать множество факторов, включая выбор материала, методы обработки поверхности и применение антимикробных покрытий. Эти аспекты имеют важное значение для клинической практики и могут существенно улучшить исходы хирургических вмешательств [15, 19, 24, 26]. Дальнейшие исследования в данной области позволят разработать более эффективные стратегии профилактики и лечения осложнений, связанных с имплантатами.

Цель исследования

Провести сравнительный анализ микробной адгезии на различных типах имплантатов, используемых в гинекологической практике, с акцентом на изучение физико-химических свойств материалов и их влияния на процессы прикрепления бактерий.

МЕТОДЫ

Дизайн исследования

Выполнено экспериментальное сравнительное исследование *in vitro*.

Условия проведения исследования

Все этапы эксперимента выполнены в первом квартале 2025 г. в лабораторных условиях на базе кафедры микробиологии Первого Санкт-Петербургского государственного медицинского университета им. акад. И.П. Павлова. Работы с микроорганизмами проводили в ламинарном боксе II класса биологической безопасности с соблюдением стандартных микробиологических практик.

Критерии соответствия (отбора)

Для исследования были отобраны два типа имплантатов, используемых в гинекологической практике:

полипропиленовый сетчатый имплантат Gynemesh PS (Johnson&Johnson, США) и титановый сетчатый имплантат «Титановый шелк» (ООО «Эластичные титановые имплантаты», Россия). В качестве тестового микроорганизма использовали суточную культуру *S. aureus* VT209 из коллекции кафедры микробиологии Первого Санкт-Петербургского медицинского университета им. акад. И.П. Павлова».

Целевые показатели исследования

Основным целевым показателем было количество адгезированных на имплантатах бактерий *S. aureus*, выраженное в колониеобразующих единицах (КОЕ) и индексе адгезии. Дополнительные целевые показатели: характер распределения бактерий на поверхности имплантатов, а также микроструктурные и химические особенности поверхности, выявленные с помощью сканирующей электронной микроскопии и рентгеноспектрального микроанализа.

Оценка адгезивных свойств исследуемых типов имплантатов

Культуру выращивали на плотной питательной среде Columbia blood agar base (Thermo Fisher Scientific, США), после чего суспендировали в 0,9% растворе хлорида натрия до концентрации 10^5 клеток/мл.

Имплантаты были нарезаны на фрагменты размером 1×1 см в стерильных условиях с использованием медицинских ножниц Купера, что имитировало интраоперационное выкраивание. Всего подготовлено 15 фрагментов полипропиленовых и 15 фрагментов титановых имплантатов.

Анализ структуры и химического состава поверхности имплантатов

В рамках исследования проведен детальный анализ микроструктуры поверхности медицинских имплантатов, включая центральную часть и краевые участки, с использованием сканирующей электронной микроскопии. Для более глубокого изучения химического состава поверхности имплантатов применен метод рентгеноспектрального микроанализа. Этот подход позволил определить количественное содержание элементов, таких как титан, углерод, кислород, а также выявить присутствие примесей, включая алюминий, железо и фтор. Комплексный анализ структуры и химического состава обеспечил всестороннюю оценку факторов, влияющих на адгезивные свойства исследуемых материалов.

Моделирование бактериальной адгезии

Для оценки адгезивных свойств имплантатов использовали следующую методику [28]. Фрагменты сеток помещали в стерильные чашки Петри диаметром 9 см, после чего в каждую чашку добавляли 20 мл бактериальной суспензии *S. aureus* с концентрацией 10^5 клеток/мл. Чашки

инкубировали при температуре 37°C в течение 1 ч для обеспечения адгезии бактерий к поверхности имплантатов.

После инкубации фрагменты трижды промывали в 0,9% растворе хлорида натрия для удаления неадгезированных бактерий. Каждое промывание проводили в отдельных стерильных чашках Петри с использованием свежего раствора, что минимизировало риск контаминации.

Культивирование и оценка адгезии

Промытые фрагменты сеток переносили на поверхность мясопептонного агар (Государственный научный центр прикладной микробиологии и биотехнологии, Россия) в стерильных чашках Петри. Для фиксации имплантатов и создания оптимальных условий для роста бактерий фрагменты сеток заливали полужидким агаром (0,7%). После застывания агара сетки фиксировались в его толще. Чашки инкубировали при температуре 37°C в течение 24 ч.

После инкубации оценивали количество адгезированных бактерий по количеству колоний, образованных на поверхности агара. Колонии, образованные бактериями, отделившимися от сеток при помещении в полужидкий агар, не учитывали. Все эксперименты проводили в трех биологических повторностях.

Индекс адгезии рассчитывали как отношение логарифмов количества микробных клеток, полученных в результате опыта, и количества микробных клеток в исходной взвеси.

Сканирующая электронная микроскопия

Микроструктуру поверхности имплантатов исследовали с использованием сканирующего электронного микроскопа Tescan Mira 3 (TESCAN, Чехия). Анализ выполняли при различных увеличениях для оценки особенностей центральной части и краевых участков имплантатов.

Рентгеноспектральный микроанализ

Химический анализ поверхности имплантатов выполняли с помощью рентгеноспектрального микроанализа на аппарате Tescan Mira 3 (TESCAN, Чехия). Анализ проводили как для центральной части, так и для краевых участков имплантатов. В ходе исследования определяли концентрации титана, углерода, кислорода, а также примесей, таких как алюминий, железо и фтор.

Анализ чувствительности

Не проводили.

Статистические процедуры

Статистическую обработку данных проводили с использованием программы GraphPad Prism (GraphPad Prism Software, США). Для сравнения групп применяли дисперсионный анализ (ANOVA). Различия считали статистически значимыми при $p < 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Формирование выборки

Две группы сравнения сформированы из 15 стандартных образцов полипропиленового имплантата и 15 стандартных образцов титанового имплантата.

Характеристики выборки

Все образцы были подготовлены в строгом соответствии с протоколом исследования. Размер каждого тестируемого фрагмента составлял 1×1 см.

Адгезивные свойства исследуемых типов имплантатов

Анализ результатов исследования проводили на основе количественного подсчета колоний *S. aureus*, образовавшихся на поверхности агара после инкубации с исследуемыми сетчатыми имплантатами. Количество адгезированных бактерий на полипропиленовых имплантатах составило $4,48 \times 10^2 \pm 0,08 \times 10^2$ КОЕ (индекс адгезии составил 0,53), в то время как на титановых сетках этот показатель был равен $4,31 \times 10^2 \pm 0,09 \times 10^2$ КОЕ (индекс адгезии составил 0,53). Статистический анализ с использованием дисперсионного анализа (ANOVA) показал отсутствие значимых различий между группами ($p > 0,05$), что свидетельствует о сходных адгезивных свойствах поверхностей полипропиленовых и титановых имплантатов. Внутригрупповые различия по количеству колоний для обеих групп находились в пределах 4%,

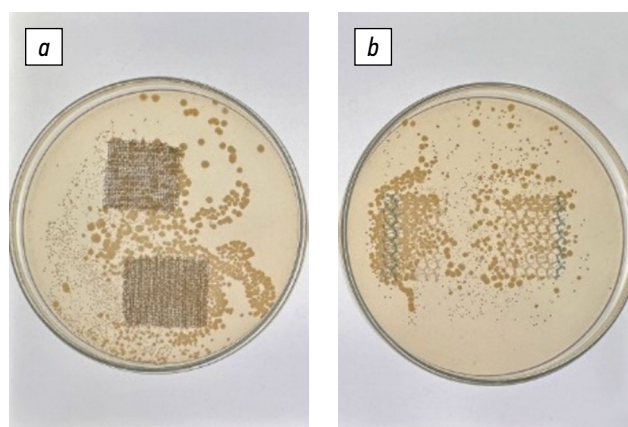


Рис. 1. Сравнительное распределение колоний *Staphylococcus aureus* на титановой (а) и полипропиленовой (b) сетках после инкубации.

Fig. 1. Comparative distribution of *Staphylococcus aureus* colonies on titanium (a) and polypropylene (b) meshes after incubation.

что также не превышало уровня статистической значимости.

На рис. 1 представлены результаты распределения колоний бактерий по поверхности имплантатов. Визуальный анализ выявил существенные различия в характере распределения адгезированных микроорганизмов. На полипропиленовых имплантатах бактерии распределялись хаотично по всей поверхности, что соответствует неструктурированной адгезии. В то же время на титановых имплантатах колонии преимущественно концентрировались на краевых участках сетки.

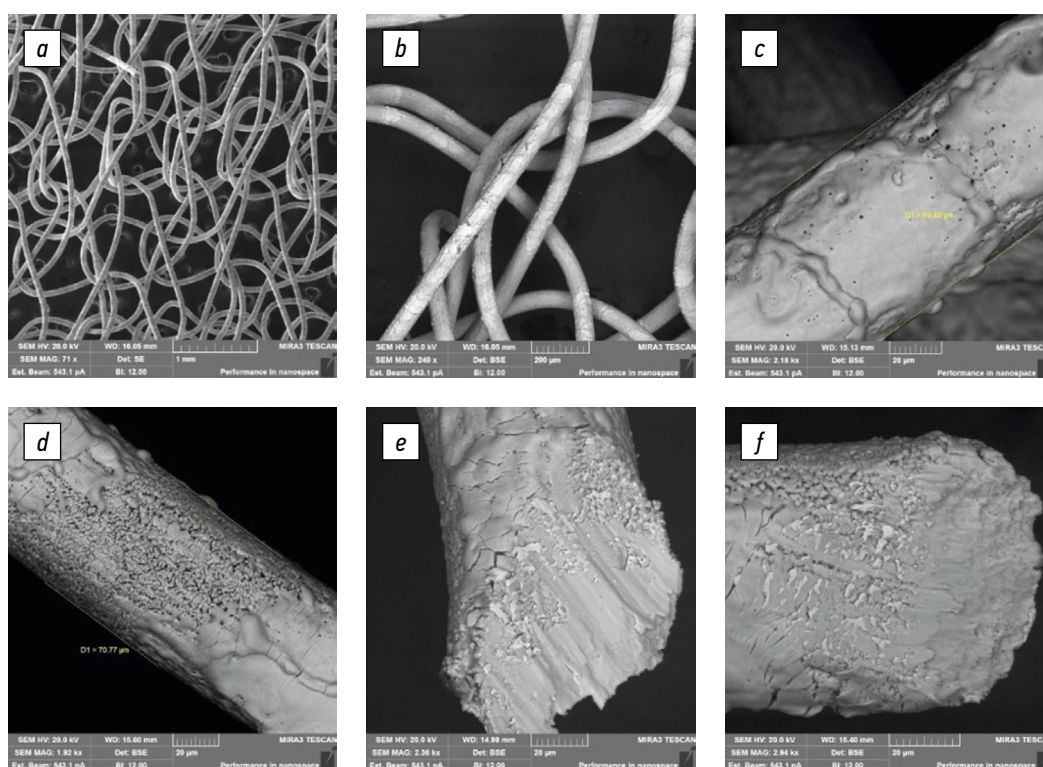


Рис. 2. Сканирующая электронная микроскопия титанового имплантата: центральной части (а–с) и краевой части (d–f).

Fig. 2. Scanning electron microscopy of the titanium implant: the central part (a–c) and the edge part (d–f).

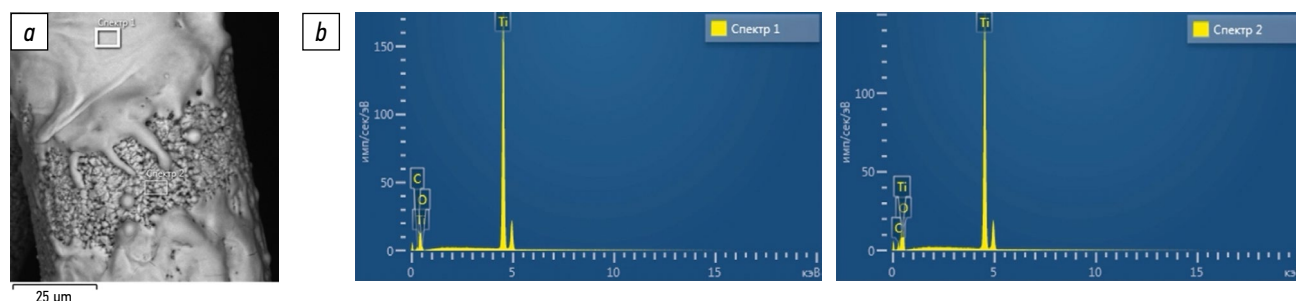


Рис. 3. Рентгеноспектральный микроанализ центральной части титанового имплантата: электронный микроскопический снимок (a) и спектры элементов (b), демонстрирующие присутствие титана, углерода и кислорода.

Fig. 3. X-ray spectral microanalysis of the central part of the titanium implant: electron microscopic image (a) and element spectra (b) showing the presence of titanium, carbon, and oxygen.

Следует отметить, что в процессе заливки полужидкого агара при температуре 40°C часть бактерий отделялась от поверхности сетчатых имплантатов и распределялась в агаровой среде. Эти бактерии не учитывали при подсчете колоний, однако их распределение было одинаково контролируемо для всех образцов, что минимизировало потенциальное влияние данного фактора на конечные результаты.

Таким образом, несмотря на сходные количественные показатели адгезии бактерий на полипропиленовых и титановых сетках, характер распределения микроорганизмов существенно различался. Титановые имплантаты демонстрировали краевую адгезию, тогда как полипропиленовые сетки характеризовались хаотичным распределением бактерий по всей поверхности.

На втором этапе работы для изучения феномена краевой адгезии на титановых имплантатах проведены сканирующая электронная микроскопия и рентгеноспектральный микроанализ.

Сканирующая электронная микроскопия

Исследование поверхности титанового имплантата с использованием сканирующей электронной микроскопии выявило четкие различия в микроструктуре между центральной частью и краевыми участками. Центральные участки имплантата (рис. 2, a–c) характеризовались относительно гладкой и однородной поверхностью с минимальными микродефектами. Это указывает на то, что центральные области имплантата подвергались меньшему механическому воздействию в процессе подготовки и эксплуатации, что способствует их стабильности и, возможно, снижает предрасположенность к бактериальной адгезии.

На краевых участках имплантата (рис. 2, d–f) выявлено значительное количество трещин, борозд и неровностей. Они могли быть результатом механической обработки, такой как вырезание имплантата из цельного материала во время подготовки к хирургической операции. Эти дефекты создают зоны повышенной шероховатости,

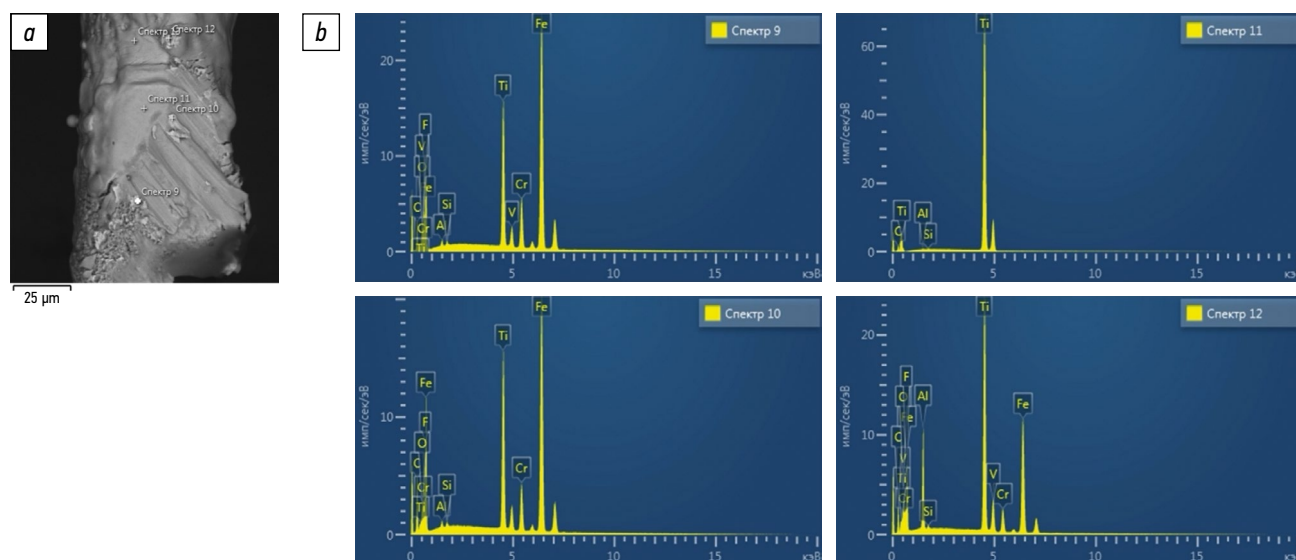


Рис. 4. Рентгеноспектральный микроанализ краевой части титанового имплантата: электронный микроскопический снимок (a) и спектры элементов (b), демонстрирующие присутствие титана, углерода, кислорода, алюминия, хрома, ванадия, железа и фтора.

Fig. 4. X-ray spectral microanalysis of the edge part of the titanium implant: electron microscopic image (a) and element spectra (b) showing the presence of titanium, carbon, oxygen, aluminum, chromium, vanadium, iron, and fluorine.

способные изменять адгезивные свойства самой поверхности. Трещины и борозды, образующиеся на краевых участках, могут создавать локальные микронизации, благоприятные для прикрепления бактерий, что делает эти участки более подверженными микробной колонизации.

Рентгеноспектральный микроанализ

Рентгеноспектральный микроанализ центральных и краевых участков имплантата продемонстрировал вариации в химическом составе этих зон. Так, в центральной части имплантата основным элементом, как и ожидалось, был титан, его содержание варьировало в пределах 66,4–96,34% по весу. Преобладание титана подтверждает, что химический состав этой зоны сохраняет стабильность, что способствует ее относительно низкой восприимчивости к загрязнению и механическим повреждениям. Однако в небольших концентрациях выявлены другие элементы, такие как углерод (2,05–3,84%), кислород (4,52–29,42%), алюминий, железо и кальций (рис. 3). Эти элементы, вероятно, попали на поверхность в результате взаимодействия с окружающей средой или возможных окислительных процессов во время обработки или эксплуатации имплантата.

В краевых участках имплантата выявлено более сложное распределение химических элементов. Помимо титана (его содержание значительно снизилось до 17,10% в отдельных зонах), определены повышенные уровни углерода (до 17,26%) и кислорода (до 11,61%). Эти изменения могут указывать на активные процессы окисления и накопления органических загрязнений на краях имплантата. Помимо этих элементов, обнаружены такие компоненты, как фтор (до 2,42%), алюминий, кремний, ванадий, хром, железо (до 58,86%) и медь (рис. 4). Их наличие на краевой части имплантата может быть связано с механической обработкой и использованием хирургических инструментов во время подготовки имплантата для установки.

ОБСУЖДЕНИЕ

Резюме основного результата исследования

У исследуемых имплантатов — полипропиленовых и титановых — обнаружены сходные количественные показатели адгезии бактерий *S. aureus*, что подтверждает отсутствие значимых различий между группами ($p > 0,05$). Однако детальный анализ распределения бактерий на поверхности имплантатов выявил ключевые различия в характере адгезии между двумя типами материалов.

Ограничения исследования

Настоящее исследование содержит ряд ограничений. Во-первых, работа была проведена *in vitro* в течение короткого периода времени, что дало возможность смоделировать лишь начальный этап адгезии без учета последующего формирования зрелой биопленки и влияния

иммунной системы организма. Во-вторых, был использован только один штамм *S. aureus*, что не позволяет экстраполировать результаты на другие штаммы или виды бактерий. В-третьих, в полученной модели адгезии не учтено возможное влияние биологических жидкостей (крови, сыворотки крови) на процесс колонизации. Для подтверждения результатов необходимы дальнейшие исследования, в том числе на животных моделях.

Интерпретация результатов исследования

Полипропиленовые сетки продемонстрировали более хаотичное распределение адгезированных бактерий по всей поверхности. Это, возможно, связано с физико-химическими свойствами полипропилена, обладающего относительно однородной и гладкой поверхностью. Такие особенности могут уменьшать локальные изменения, способствующие фокальной адгезии бактерий, что, в свою очередь, приводит к более равномерному прикреплению микроорганизмов.

С другой стороны, на титановых имплантатах наблюдали преимущественное прикрепление бактерий на краевых участках. Сканирующая электронная микроскопия выявила наличие трещин и борозд на этих участках, что может способствовать локальному прикреплению бактерий. Повышенная шероховатость поверхности на краях имплантатов создает дополнительные микронизации, облегчающие адгезию бактерий. Эти структурные особенности могут играть ключевую роль в предрасположенности краевых участков титановых имплантатов к микробной колонизации. Известно, что увеличение шероховатости поверхности имплантатов коррелирует с усиленной адгезией бактерий. Например, увеличение шероховатости может привести к значительному росту адгезии бактерий, что подтверждено экспериментальными данными о том, что шероховатые поверхности обеспечивают большую площадь для прикрепления микроорганизмов [30]. Это связано с тем, что шероховатые поверхности создают микроструктуры, удерживающие бактерии, способствуя их колонизации и образованию биопленок [31].

Рентгеноспектральный микроанализ показал значительные различия по химическому составу в центральной и краевой частях титанового имплантата. Центральные участки характеризовались высоким содержанием титана (до 96,3%), что подтверждает их относительную химическую чистоту и устойчивость к загрязнению. В краевых участках, помимо титана, выявлены более высокие концентрации углерода, кислорода, фтора и других элементов, таких как алюминий, хром и железо. Эти элементы, вероятно, были внесены на поверхность имплантата в процессе механической обработки и взаимодействия с хирургическими инструментами. Наличие углерода и кислорода также может указывать на поверхностное окисление и контаминацию органическими веществами,

что могло повлиять на адгезивные свойства краевых участков.

Наличие сторонних химических элементов, таких как фтор и хром, на поверхности титановых имплантатов также может изменить поверхностные свойства материала и усилить адгезию бактерий. Фтор, например, известен своими антимикробными свойствами, но его присутствие в малых концентрациях может вызывать парадоксальные эффекты, способствующие микробной колонизации. Например, в некоторых случаях фториды могут обуславливать образование внеклеточных полисахаридов, в свою очередь увеличивающих адгезию бактерий к поверхностям [32]. Таким образом, изменения в химическом составе краевых участков могут играть важную роль в изменении адгезивных свойств титановых имплантатов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несмотря на то что титановые имплантаты остаются эффективным материалом для медицинского применения, их свойства могут ухудшаться за счет механических повреждений, особенно на краевых участках. На эти зоны необходимо обращать дополнительное внимание при разработке имплантата, поскольку они могут стать источниками повышенного риска инфекции. В будущем следует сосредоточиться на улучшении методов обработки поверхности титановых имплантатов для минимизации трещин и шероховатостей, а также на возможном использовании антимикробных покрытий для снижения риска бактериальной колонизации.

Таким образом, полипропиленовые имплантаты могут быть менее подвержены локальной микробной колонизации, что делает их потенциально более безопасными с точки зрения равномерной адгезии бактерий. Однако разработка методов, направленных на уменьшение микроструктурных дефектов титановых имплантатов, особенно на краях, остается ключевым направлением для повышения их безопасности и эффективности.

Возможно, использование готового продукта — изделия нужной формы и размера из титана — позволит избежать его деформации при выкраивании, что в свою очередь снизит количество адгезированных бактерий, вплоть до их полного отсутствия. Однако это подлежит дополнительным исследованиям.

Следует также отметить, что при использовании имплантатов из титана, не стоит стараться сопоставлять край имплантата «встык» к месту фиксации, например, надкостнице промонториума. Наоборот, необходимо накладывать якорный узел поодаль от края полотна имплантата. Тем самым получится избежать прямого контакта края имплантата, являющегося, как было выяснено, местом наибольшей адгезии микроорганизмов, с местом фиксации и шовным материалом. Это позволит профилировать известные mesh-ассоциированные осложнения, например, спондилодисцит.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. О.А. Иванов — определение концепции, разработка методологии, проведение исследования, написание черновика рукописи; В.Ф. Беженарь, В.В. Тец — определение концепции, руководство исследованием, пересмотр и редактирование рукописи; П.М. Паластин — обеспечение исследования, анализ данных, пересмотр и редактирование рукописи; К.М. Кардава — проведение исследования, анализ данных; Д.Л. Панкратов — проведение исследования, визуализация, написание черновика рукописи; А.П. Никитина — проведение исследования, написание черновика рукописи. Все авторы одобрили рукопись (версию для публикации), а также согласились нести ответственность за все аспекты работы, гарантируя надлежащее рассмотрение и решение вопросов, связанных с точностью и добросовестностью любой ее части.

Этическая экспертиза. Не проведена (причина — экспериментальное исследование *in vitro* с использованием стандартных бактериальных штаммов).

Источники финансирования. Отсутствуют.

Раскрытие интересов. Авторы заявляют об отсутствии отношений, деятельности и интересов за последние три года, связанных с третьими лицами (коммерческими и некоммерческими), интересы которых могут быть затронуты содержанием статьи.

Оригинальность. При создании настоящей работы авторы не использовали ранее опубликованные сведения (текст, иллюстрации, данные).

Доступ к данным. Все данные, полученные в настоящем исследовании, доступны в статье.

Генеративный искусственный интеллект. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовались.

Рассмотрение и рецензирование. Настоящая работа подана в журнал в инициативном порядке и рассмотрена по обычной процедуре. В рецензировании участвовали два внутренних рецензента.

ADDITIONAL INFORMATION

Author contributions: O.A. Ivanov: conceptualization, methodology, investigation, writing—original draft; V.F. Bezhenar, V.V. Tetz: conceptualization, supervision, writing—review & editing; P.M. Palastin: resources, formal analysis, writing—review & editing; K.M. Kardava: investigation, formal analysis; D.L. Pankratov: investigation, visualization, writing—original draft; A.P. Nikitina: investigation, writing—original draft. All authors approved the version of the manuscript to be published, and agreed to be accountable for all aspects of the work, ensuring that questions related to the accuracy or integrity of any part of it are appropriately reviewed and resolved.

Ethics approval: No approval from the ethics committee was required, as this was an experimental *in vitro* study using bacterial reference strains.

Funding sources: No funding.

Disclosure of interests: The authors have no relationships, activities, or interests over the past three years related to for-profit or not-for-profit third parties whose interests may be affected by the content of the article.

Statement of originality: No previously published material (text, images, or data) was used in this work.

Data availability statement: All data generated during this study are available in this article.

Generative AI: No generative artificial intelligence technologies were used to prepare this article.

Provenance and peer-review: This paper was submitted unsolicited and reviewed following the standard procedure. The review process involved two in-house reviewers.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

1. Bezhenar VF, Bogatyreva EV, Pavlova NG, Ailamazyan EK, editor. *Pelvic organ prolapse in women: etiology, pathogenesis, diagnostic principles*. Saint Petersburg: N-L; 2010. 47 p. (In Russ.) EDN: QLSJPP
2. Popov AA, Krasnopolskaya IV, Tyurina SS, et al. Sacrospinous fixation in pelvic organ prolapse treatment during the mesh technology era. *Russian Bulletin of Obstetrician-Gynecologist*. 2013;13(2):36–41. (In Russ.) EDN: OVZHQL
3. Maurer MM, Rohrbauer B, Feola A, et al. Mechanical biocompatibility of prosthetic meshes: a comprehensive protocol for mechanical characterization. *J Mech Behav Biomed Mater*. 2014;40:42–58. EDN: UXATMF doi: 10.1016/j.jmbbm.2014.08.014
4. Feiner B, Jelovsek JE, Maher C. Efficacy and safety of transvaginal mesh kits in the treatment of prolapse of the vaginal apex: a systematic review. *BJOG*. 2009;116(1):15–24. doi: 10.1111/j.1471-0528.2008.02023.x
5. Haylen BT, Freeman RM, Swift SE, et al. An International Urogynecological Association (IUGA)/International Continence Society (ICS) joint terminology and classification of the complications related directly to the insertion of prostheses (meshes, implants, tapes) and grafts in female pelvic floor surgery. *Neurourol Urodyn*. 2011;30(1):2–12. doi: 10.1002/nau.21036
6. Chien H, Kumakura E, Koyama M. Iliosacral bacterial arthritis and recto-peritoneal abscess after tension-free vaginal mesh reconstruction. *Int Urogynecol J*. 2009;21(6):753–755. doi: 10.1007/s00192-009-0855-4
7. Krasnopolskii VI, Popov AA, Abramyan KN, et al. Complications of extra-peritoneal colpopexy using mesh prostheses: results of a multicenter study. *Russian Bulletin of Obstetrician-Gynecologist*. 2010;10(6):53–57. EDN: OJNSYO
8. Li K, Yang X, Leng J, et al. Calcium peroxide nanoparticles-embedded coatings on anti-inflammatory TiO₂ nanotubes for bacteria elimination and inflammatory environment amelioration. *Small*. 2021;17(47):2102907. EDN: OCZJLC doi: 10.1002/sml.202102907
9. Vincenzo F, Del Gaudio A, Petit V, et al. Gut microbiota, intestinal permeability, and systemic inflammation: a narrative review. *Emerg Med*. 2024;19(2):275–293. EDN: SRRILJ doi: 10.1007/s11739-023-03374-w
10. Schoultz I, Keita ÅV. The intestinal barrier and current techniques for the assessment of gut permeability. *Cells*. 2020;9(8):1909. EDN: ISPCDC doi: 10.3390/cells9081909
11. Calabrese G, Franco D, Petralia S, et al. Dual-functional nano-functionalized titanium scaffolds to inhibit bacterial growth and enhance osteointegration. *Nanomaterials*. 2021;11(10):2634. EDN: LRHEOT doi: 10.3390/nano11102634
12. Verhorstert K, Guler Z, Boer L, et al. In vitro bacterial adhesion and biofilm formation on fully absorbable poly-4-hydroxybutyrate and non-absorbable polypropylene pelvic floor implants. *ACS Appl Mater Interfaces*. 2020;12(48):53646–53653. EDN: YSSMLK doi: 10.1021/acsami.0c14668
13. Vadakkumpurath S, Venugopal A, Ullattil S. Influence of micro-textures on antibacterial behaviour of titanium-based implant surfaces: in vitro studies. *Biosurface and Biotribology*. 2019;5(1):20–23. doi: 10.1049/bsbt.2018.0023
14. Hu Y, Zhou W, Zhu C, et al. The synergistic effect of nicotine and Staphylococcus aureus on peri-implant infections. *Front Bioeng Biotechnol*. 2021;9:658380. EDN: DHNPHB doi: 10.3389/fbioe.2021.658380
15. Chen J, Zhu Y, Xiong M, et al. Antimicrobial titanium surface via click-immobilization of peptide and its in vitro/vivo activity. *ACS Biomater Sci Eng*. 2018;5(2):1034–1044. doi: 10.1021/acsbomaterials.8b01046
16. Arciola CR, Campoccia D, Speziale P, et al. Biofilm formation in Staphylococcus implant infections. A review of molecular mechanisms and implications for biofilm-resistant materials. *Biomaterials*. 2012;33(26):5967–5982. EDN: PHCDQV doi: 10.1016/j.biomaterials.2012.05.031
17. Tetz GV, Artemenko NK, Tetz VV. Effect of DNase and antibiotics on bio-film characteristics. *Antimicrob Agents Chemother*. 2009;53(3):1204–1209. EDN: LLRUZF doi: 10.1128/AAC.00471-08
18. Sysolyatina E, Petryakov A, Abdulkadieva M, et al. Use of non-thermal plasma for decontamination of titanium implants. *Journal of Physics: Conference Series*. 2022;2270:012045. EDN: QXAJKH doi: 10.1088/1742-6596/2270/1/012045
19. Whitehead K, Li H, Kelly P. The antimicrobial properties of titanium nitride/silver nanocomposite coatings. *Journal of Adhesion Science and Technology*. 2011;25(17):2299–2315. doi: 10.1163/016942411X574970
20. Filipović U, Dahmane RG, Ghannouchi S, et al. Bacterial adhesion on orthopedic implants. *Adv Colloid Interface Sci*. 2020;283:102228. EDN: PFRTRX doi: 10.1016/j.cis.2020.102228
21. Li P, Tong Z, Huo L, et al. Antibacterial and biological properties of bio-functionalized nanocomposites on titanium for implant application. *J Biomater Appl*. 2016;31(2):205–214. doi: 10.1177/0885328216645951
22. Yeo IS, Kim HY, Lim KS, et al. Implant surface factors and bacterial adhesion: a review of the literature. *Int J Artif Organs*. 2012;35(10):762–772. doi: 10.5301/ijao.5000154
23. Nakhaei K, Ishijima M, Ikeda T, et al. Ultraviolet light treatment of titanium enhances attachment, adhesion, and retention of human oral epithelial cells via decarbonization. *Materials*. 2020;14(1):151. EDN: RDAWAZ doi: 10.3390/ma14010151
24. Mayorga-Martinez C, Zelenka J, Klíma K, et al. Multimodal-driven magnetic microrobots with enhanced bactericidal activity for biofilm eradication and removal from titanium mesh. *Adv Mater*. 2023;35(23):2300191. EDN: JYSVAJ doi: 10.1002/adma.202300191
25. Tambone E, Bonomi E, Ghensi P, et al. Rhamnolipid coating reduces microbial biofilm formation on titanium implants: an in vitro study. *BMC Oral Health*. 2021;21(1):49. EDN: EROFOI doi: 10.1186/s12903-021-01412-7
26. Schmitz M, Riool M, Boer L, et al. Development of an antimicrobial peptide saap-148-functionalized supramolecular coating on titanium to prevent biomaterial-associated infections. *Adv Mater Tech*. 2023;8(13):2201846. EDN: ZJWHWS doi: 10.1002/admt.202201846
27. Rešliński A, Dąbrowiecki S, Głowacka K. Biofilm formation on biomaterials used in hernia surgery. *Med Biol Sci*. 2014;28(3):35–44. doi: 10.12775/mbs.2014.023
28. Sarfraz S, Mäntynen P, Laurila M, et al. Effect of surface tooling techniques of medical titanium implants on bacterial biofilm formation in vitro. *Materials*. 2022;15(9):3228. EDN: ONEJMC doi: 10.3390/ma15093228
29. Döll K, Fadeeva E, Stumpp N, et al. Reduced bacterial adhesion on titanium surfaces micro-structured by ultra-short pulsed laser ablation. *Biomaterials*. 2016;17(1–2):53–57. doi: 10.1515/bnm-2015-0024
30. Tapalskii DV, Nikolaev NS, Ovsyankin AV, et al. Coatings based on two-dimensionally ordered linear chain-like carbon for protecting titanium implants from microbial colonization. *Traumatology and Orthopedics of Russia*. 2019;25(2):111–120. EDN: WSDMXP doi: 10.21823/2311-2905-2019-25-2-111-120
31. Gvetadze RSh, Dmitrieva NA, Voronin AN. Features of microorganism adhesion to dental materials used for gingival contour formation in implant-supported prosthetics. *Stomatology*. 2019;98(5):118–123. EDN: SPABNC doi: 10.17116/stomat201998051118
32. Brusnitsyna EV, Ginkel DA, Prihodkin AS, et al. Efficacy of topical fluoride application: a systematic review. *Pediatric Dentistry and Prevention*. 2023;23(1):70–82. EDN: LKSFUM doi: 10.33925/1683-3031-2023-598

ОБ АВТОРАХ

* Иванов Олег Александрович;

адрес: Россия, 197022, Санкт-Петербург, ул. Льва Толстого, д. 6/8;

ORCID: 0000-0002-6596-4105;

eLibrary SPIN: 8620-9749;

e-mail: ivanoffmd@gmail.com

AUTHORS INFO

* Oleg A. Ivanov, MD;

address: 6/8 Lev Tolstoy st, Saint Petersburg, 197022, Russia;

ORCID: 0000-0002-6596-4105;

eLibrary SPIN: 8620-9749;

e-mail: ivanoffmd@gmail.com

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

Беженарь Виталий Федорович, д-р мед. наук, профессор;
ORCID: 0000-0002-7807-4929;
eLibrary SPIN: 8626-7555;
e-mail: bez-vitaly@yandex.ru

Тец Виктор Вениаминович, д-р мед. наук, профессор;
ORCID: 0000-0001-9047-6763;
eLibrary SPIN: 4014-5771;
e-mail: vtetvz@yahoo.com

Паластин Петр Михайлович, канд. мед. наук;
ORCID: 0000-0003-3502-2499;
eLibrary SPIN: 8008-8723;
e-mail: palastin.petr@mail.ru

Кардава Кристина Малдесовна;
ORCID: 0000-0002-3325-9436;
eLibrary SPIN: 2471-3143;
e-mail: j_espere@yahoo.com

Панкратов Данил Ляtifович;
ORCID: 0009-0009-9391-8200;
eLibrary SPIN: 6488-6900;
e-mail: danil.pankratov@yahoo.com

Никитина Анастасия Павловна;
ORCID: 0009-0004-0929-5826;
eLibrary SPIN: 8487-1890;
e-mail: nikitina.anastasiia@yahoo.com

Vitaly F. Bezhenar, MD, Dr. Sci. (Medicine), Professor;
ORCID: 0000-0002-7807-4929;
eLibrary SPIN: 8626-7555;
e-mail: bez-vitaly@yandex.ru

Victor V. Tetz, MD, Dr. Sci. (Medicine), Professor;
ORCID: 0000-0001-9047-6763;
eLibrary SPIN: 4014-5771;
e-mail: vtetvz@yahoo.com

Peter M. Palastin, MD, Cand. Sci. (Medicine);
ORCID: 0000-0003-3502-2499;
eLibrary SPIN: 8008-8723;
e-mail: palastin.petr@mail.ru

Kristina M. Kardava;
ORCID: 0000-0002-3325-9436;
eLibrary SPIN: 2471-3143;
e-mail: j_espere@yahoo.com

Danil L. Pankratov;
ORCID: 0009-0009-9391-8200;
eLibrary SPIN: 6488-6900;
e-mail: danil.pankratov@yahoo.com

Anastasiia P. Nikitina;
ORCID: 0009-0004-0929-5826;
eLibrary SPIN: 8487-1890;
e-mail: nikitina.anastasiia@yahoo.com