УДК 616.13-089
DOI 10.17802/2306-1278-2025-14-3-192-202

ONLINE

НЕОРГАНИЧЕСКОЕ ПОКРЫТИЕ ИМПЛАНТОВ В СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТОЙ ХИРУРГИИ: ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ (ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ)

А.В. Протопопов[1], М.О. Жульков[1], Д.А. Сирота[1, 2], Я.М. Смирнов[1, 3], А.С. Гренадёров[4], М.А. Суровцева[1]

[1] Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный медицинский исследовательский центр имени академика Е.Н. Мешалкина» Министерства здравоохранения Российской Федерации, ул. Речкуновская, 15, Новосибирск, Российская Федерация, 630055; [2] Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Красный просп., 52, Новосибирск, Российская Федерация, 630091; [3] Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет», ул. Пирогова, 2, Новосибирск, Российская Федерация, 630090; [4] Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт сильноточной электроники» Сибирского отделения Российской академии наук, Академический просп., 2/3, Томск, Российская Федерация, 634055

Основные положения

• Сердечно-сосудистые заболевания остаются ведущей причиной смертности в мире, что повышает спрос на эффективные имплантируемые устройства (стенты, клапаны, сосудистые протезы).

• Неорганические покрытия играют ключевую роль в улучшении биосовместимости, антитромбогенных свойств и долговечности имплантов.

• В обзоре литературы обсуждены основные положительные и отрицательные стороны неорганических покрытий имплантов в сердечно-сосудистой хирургии.

Резюме

Сердечно-сосудистые импланты, такие как стенты, клапаны и сосудистые протезы, требуют повышения долговечности и биосовместимости. В данном обзоре рассматриваются современные неорганические покрытия, включая нитрид титана, оксиды металлов и алмазоподобные углеродные покрытия, которые способны улучшать гемосовместимость имплантов. Особое внимание уделяется их влиянию на предотвращение тромбоза, рестеноза и кальцификации. Анализируются экспериментальные и клинические данные, подтверждающие эффективность этих покрытий.

Ключевые слова Нитинол • Стенты • Покрытия

Поступила в редакцию: *10.05.2025;* ***поступила после доработки:*** *04.06.2025;* ***принята к печати:*** *14.06.2025*

INORGANIC COATINGS FOR IMPLANTS IN CARDIOVASCULAR SURGERY: CURRENT STATE OF THE ART (A REVIEW ARTICLE)

A.V. Protopopov[1], M.O. Zhulkov[1], D.A. Sirota[1, 2], Ya.M. Smirnov[1, 3], A.S. Grenadyorov[4], M.A. Surovtseva[1]

[1] Federal State Budgetary Institution "Meshalkin National Medical Research Center" of the Ministry of Health of Russian Federation, 15, Rechkunovskaya St., Novosibirsk, Russian Federation, 630055; [2] Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Novosibirsk State Medical University" Ministry of Health of the Russian Federation Russian Federation, 52, Krasny Prospect, Novosibirsk, Russian Federation, 630091; [3] Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Novosibirsk National Research State University", 2, Pirogova St., Novosibirsk, Russian Federation, 630090; [4] Federal State Budgetary Institution of Science "Institute of High Current Electronics" of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2/3, Akademichesky Ave., Tomsk, Russian Federation, 634055

Highlights

• Cardiovascular diseases remain the leading cause of mortality worldwide, driving demand for effective implantable devices (stents, valves, vascular prostheses).

• Inorganic coatings play a pivotal role in enhancing implant biocompatibility, antithrombogenic properties, and long-term durability.

Для корреспонденции: *Андрей Владимирович Протопопов, andrew-uss@yandex.ru; адрес: ул. Речкуновская, 15, Новосибирск, Российская Федерация, 630055*

Corresponding author: *Andrey V. Protopopov, andrew-uss@yandex.ru; address: 15, Rechkunovskaya St., Novosibirsk, Russian Federation, 630055*

• This literature review critically examines both advantages and limitations of inorganic coatings for cardiovascular implants.

Abstract Cardiovascular implants such as stents, valves, and vascular prostheses require continuous improvement to enhance their durability and biocompatibility. This review examines contemporary inorganic coatings, including titanium nitride, metal oxides, and diamond-like carbon coatings, which demonstrate potential for improving implant hemocompatibility. Particular focus is given to their role in preventing thrombosis, restenosis, and calcification. The paper analyzes both experimental and clinical data supporting the efficacy of these coatings.

Keywords Nitinol • Stents • Coatings

Received: *10.05.2025;* ***received in revised form:*** *04.06.2025;* ***accepted:*** *14.06.2025*

Введение

Сердечно-сосудистые заболевания продолжают оставаться одной из ведущих причин смертности во всем мире [1]. В последние десятилетия значительные усилия были направлены на разработку и внедрение новых методов лечения, таких как имплантация стентов для восстановления проходимости коронарных и периферических артерий, эндопротезов аорты [2]. Ишемическая болезнь сердца, поражения брахиоцефальных сосудов, аорто-подвздошного сегмента, как и любого другого бассейна, ассоциированы с развитием атеросклеротических изменений стенок, уменьшающих диаметр сосуда, что снижает приток крови к целевым тканям и органам. Для нормализации кровотока ежегодно проводятся миллионы имплантаций стентов в различные сосудистые бассейны с помощью флюороскопии и/или внутрисосудистого ультразвукового исследования [3]. Однако, несмотря на успехи в этой области, проблемы, связанные с тромбообразованием и рестенозом, остаются нерешенными [4]. **Целью данной работы** являются обзор неорганических покрытий для стентов ввиду растущего интереса к их применению [5], оценка их влияния на биосовместимость и долговечность, а также эффективности в предотвращении тромбообразования.

Общей проблемой всех материалов и изделий, контактирующих с кровью, являются адгезия и тромбообразование. Так, в 25–30% случаев в ранние сроки после имплантации на поверхности внутрисосудистого имплантата фиксируются фибриноген и тромбоциты крови, что приводит к образованию тромба. Причина этих состояний, как правило, в низкой гемосовместимости искусственного материала [6]. Другой проблемой является развитие рестеноза (повторного сужения) просвета стента, обусловленное повреждением эндотелиальных клеток и воспалением стенки артерий вследствие контакта с имплантом. Применение стентов с лекарственным покрытием значительно сократило риск рестеноза и тромбоза [7], однако у пациентов с низкой приверженностью двойной антиагрегантной терапии (аспирина и антагониста к рецепторам аденозиндифосфата на поверхности тромбоцитов – клопидогрел), с планируемым хирургическим вмешательством и нарушениями свертываемости крови необходимо тщательно взвешивать риски и преимущества использования таких стентов. В литературе представлены данные об отдаленном тромбозе стента с лекарственным покрытием [8], а имплантация стента из кобальт-хромового сплава с нанесенным сиролимусом связана с парадоксальной вазоконстрикцией целевой артерии [9]. Одним из перспективных направлений решения этих проблем является использование новых неорганических покрытий для стентов. Поиск в системе Pubmed показал, что изучаемая проблема является актуальной на протяжении последних трех декад (рис. 1).

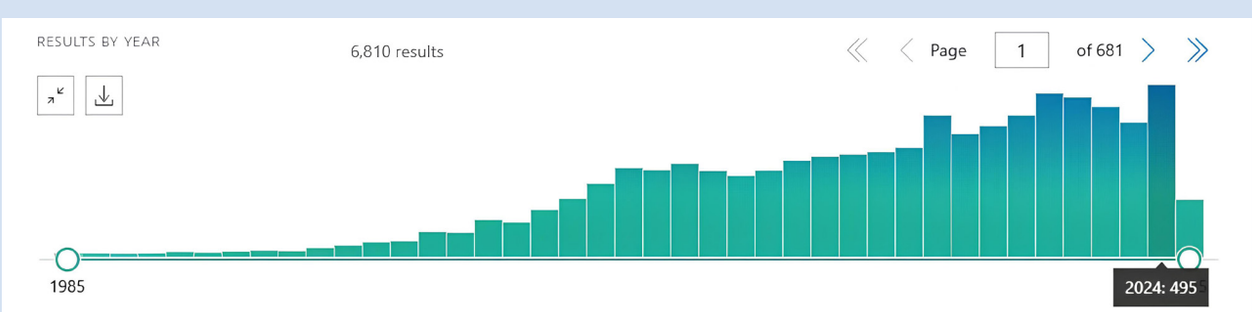

Рисунок 1. Анализ публикационной активности авторов по изучению неорганических покрытий для имплантируемых медицинских изделий

Figure 1. Research trends in inorganic coatings for implantable medical devices: a publication activity analysis

REVIEWS

На сегодняшний день одним из часто применяемых материалов в сердечно-сосудистой хирургии выступает нитинол [10] (рис. 2). Применение нитиноловых покрытий в кардиохирургии обусловлено их способностью снижать риск тромбообразования и обеспечивать долговечность стентов. Кроме того, NiTi обладает уникальными свойствами памяти формы и эластичности. Гладкая поверхность нитиноловых покрытий и их низкая реактивность с кровью значительно уменьшают вероятность адгезии тромбоцитов, что является важным фактором для предотвращения тромбозов. Исследования также показывают, что нитиноловые покрытия способствуют улучшению биосовместимости стентов, снижая риск воспалительных реакций. Благодаря этим характеристикам нитиноловые покрытия находят широкое применение в разработке современных медицинских устройств, включая стенты, используемые для лечения сердечно-сосудистых заболеваний. Известно, что оксидные слои NiTi имеют тенденцию нарушать пульсирующие движения нитиноловых стентов из-за увеличения толщины наружного слоя, приводя к охрупчиванию нитинола и снижению усталостной прочности стентов [11]. Поверхностная модификация, несомненно, имеет важное значение при использовании нитинола, поскольку именно поверхностные свойства являются решающим фактором, определяющим эксплуатационные характеристики имплантов и безопасность для пациента. Важное значение поверхностная модификация имеет в решении проблемы коррозионной устойчивости NiTi, которая главным образом определяет прочностные характеристики и эксплуатационный потенциал медицинских изделий. В последнее время стали появляться исследования, доказывающие повышение концентрации Ni в клетках тканей, непосредственно контактирующих с элементами нитиноловых каркасов [12–14]. Было обнаружено, что на стадии клеточной адгезии (в течение первых 4 ч после имплантации) высвобождение ионов Ni из голого сплава NiTi было очень низким, а активация адсорбированных белков по биологическим путям клеточной адгезии и роста, таким как регуляция актинового цитоскелета, были почти таким же, как и у модифицированных покрытием нитиноловых имплантов. Это указывает на то, что высвободившиеся ионы Ni не влияли на адсорбцию белков и адгезию эндотелиальных клеток в раннем постимплантационном периоде. Однако на стадии роста и пролиферации неоэндотелиоцитов высвобождение ионов Ni из сплава NiTi значительно возрастает, что угнетает функцию эндотелиальных клеток на молекулярном уровне, приводя к их синтетической и локальной регуляторной дисфункции [15]. Выброс ионов Ni из подложки сплава NiTi вызывает серьезные опасения по поводу безопасного использования NiTi в качестве материала для изготовления имплантатов из-за опасности развития аллергических реакций и цитотоксического эффекта, затрудняющих процесс биоинтеграции. Именно этот эффект во многом определяет развитие осложнений после имплантации внутрисосудистых стентов: воспалительной гиперплазии неоинтимы, кальциноза, атеросклеротического поражения и тромбоза стентов [12]. Дополнительным фактором, усугубляющим механическую устойчивость внутрисосудистых имплантов, являются их сложная структура (гибридные протезы) или хирургические особенности имплантации (имплантация «стент-в-стент», имплантация в зоне бифуркации сосуда, большая кривизна изгиба сосуда, высокоамплитудный пульсирующий поток и т. д.). Контакт стентовых элементов приводит к развитию гальванической коррозии [16], которая еще больше усиливается из-за постоянного циклического механического воздействия, вызывая развитие фреттинг-коррозии [17]. Известны исследования в области нанесения на титановый сплав a-C:H:SiOx-пленки, по результатам которых установлено, что она более чем в 100 раз снижает плотность распределения тромбоцитов человека в сравнении с необработанной металлической поверхностью. Полученные *in vitro* данные позволяют предполагать существенный атромбогенный потенциал a-C:H:SiOx-покрытий на поверхности устройств, контактирующих с кровью [18] (рис. 3).

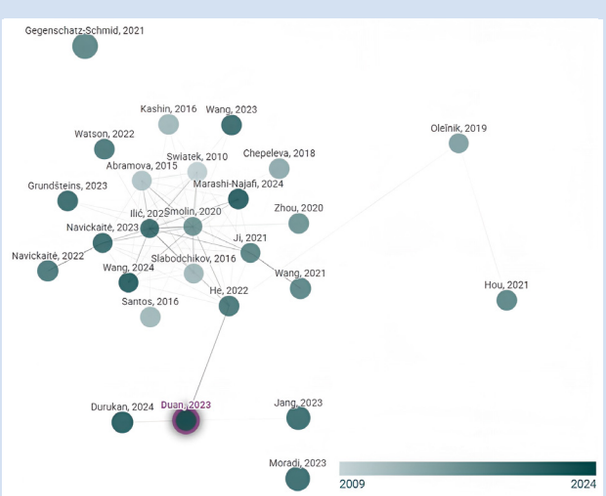

Рисунок 2. Анализ текущего состояния применения покрытий из нитинола

Figure 2. Analysis of current applications of nitinol coatings in medical implants

Фармакологическая модификация поверхностей сердечно-сосудистых имплантатов, включая искусственные клапаны и эндоваскулярные стенты, демонстрирует выраженный протективный эффект на начальных этапах реабилитации. В то же время ограниченная продолжительность действия терапевтических агентов, обусловленная их постепенной эволюцией, приводит к деплеции регуляторных субстанций и экспозиции тромбогенного субстрата [19]. Данный процесс ассоциирован с риском отсроченных осложнений: металлическая основа индуцирует гиперплазию клеток интимы, а замедленная эндотелизация и функциональная незрелость неоэндотелия

по причине медикаментозного воздействия повышают вероятность тромбообразования [20–22]. Клинические наблюдения подтверждают сохраняющуюся актуальность проблемы: частота рестеноза при использовании голометаллических стентов варьирует в диапазоне 16–44%, тогда как для DES-стентов этот показатель составляет 3–20% [23, 24].

Другим направлением модификации изделий является нанесение неорганических покрытий, среди которых выделяют титан, оксид циркония, нитрид титана, сплав кобальта и хрома и др. Эти материалы демонстрируют высокую устойчивость к коррозии, биосовместимость и механическую прочность, что делает их подходящими для медицинского применения [3]. Современные технологии нанесения покрытий, такие как физическое и химическое осаждение, а также нанотехнологические подходы, позволяют создавать покрытия с уникальными свойствами, а использование стабильных неорганических покрытий позволяет избежать развития воспалительного ответа эндотелиоцитов благодаря эффекту барьера, препятствующего высвобождению химических элементов сплавов подложки [25]. Несмотря на это, их эффективность в клинической практике требует дальнейшего изучения.

Технологии нанесения неорганических покрытий

Методы физического осаждения

Физическое осаждение представляет собой процесс нанесения покрытия, при котором материал переносится из паровой или жидкой фазы на подложку без химической реакции. Этот метод основывается на таких механизмах, как испарение, конденсация и распыление материала. Основной принцип заключается в использовании энергии для преобразования материала в паровую фазу, которая затем осаждается на поверхность подложки, формируя тонкий слой. Такой подход позволяет контролировать структуру и толщину покрытия, что имеет важное значение для биомедицинских применений, включая стенты.

Среди основных технологий физического осаждения выделяются метод физического осаждения из паровой фазы (physical vapor deposition, PVD), магнетронное распыление и лазерное осаждение. PVD используется для создания покрытий с высокой адгезией и равномерной толщиной, что особенно важно для медицинских изделий. В то же время магнетронное распыление позволяет наносить покрытия с улучшенными антибактериальными свойствами, что делает его перспективным для применения в биомедицинской инженерии благодаря управляемой бомбардировке ионами на поверхность целевой мишени. Лазерное осаждение (лазерная абляция), в свою очередь, характеризуется точным контролем состава покрытия, возможно локальное нанесение на необходимые участки, что критически важно для обеспечения его функциональности [26].

Методы физического осаждения обладают рядом преимуществ, включая высокую точность нанесения, возможность контролировать толщину и состав покрытия, а также создавать покрытия с улучшенными механическими и биологическими свойствами. Все покрытия имеют развитую фрагментированную структуру, при этом размеры структурного элемента зависят от параметров осаждения. Вместе с тем существуют и ограничения, такие как высокая стоимость оборудования и сложности в обработке сложных геометрических форм [27]. Несмотря на это, физическое осаждение остается одним из наиболее перспективных подходов для создания покрытий на медицинских изделиях, в том числе стентах, благодаря универсальности и эффективности.

Химические методы нанесения

Химические методы нанесения покрытий на стенты основываются на реакциях химического осаждения, в ходе которых на поверхности формируются тонкие пленки. Эти методы включают использование химических реакций для создания покрытий с заданными свойствами, такими как равномерность, адгезия и биосовместимость. Одним из наиболее распространенных методов является химическое осаждение из паровой фазы (chemical vapor deposition, CVD), которое позволяет получать покрытия с высокой степенью равномерности. Этот процесс включает использование газообразных прекурсоров, которые реагируют на поверхности материала, образуя прочное покрытие. Основной принцип химических

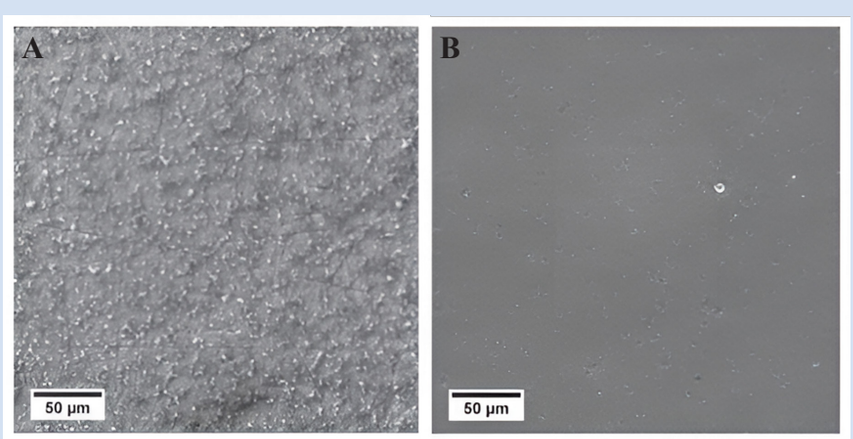

Рисунок 3. СЭМ-изображение конгломератов тромбоцитов и кристаллов солей на поверхности образца титана марки ВТ-6. Шкала 25 мкм (*A*) и 5 мкм (*B*) [18]

Figure 3. SEM image of platelet aggregates and salt crystals on the surface of a titanium sample (grade VT-6). Scale bars: 25 µm (*A*) and 5 µm (*B*) [18]

методов заключается в управлении химическими реакциями для достижения требуемых характеристик покрытия [28].

Различные химические методы нанесения покрытий имеют преимущества и ограничения. Например, метод CVD обеспечивает высокую степень равномерности и прочности покрытий, что делает его предпочтительным для медицинских применений. Электрохимическое осаждение, в свою очередь, позволяет создавать покрытия с улучшенной адгезией и стабильностью, что особенно важно для стентов, работающих в условиях постоянного воздействия крови [29].

Нанотехнологические подходы в покрытии стентов

Нанотехнологии представляют собой инновационный подход к созданию покрытий для стентов, основанный на манипуляции материалами на атомарном и молекулярном уровнях. Основной принцип заключается в точном контроле над структурой и свойствами материалов, что позволяет разрабатывать покрытия с уникальными характеристиками, такими как повышенная адгезия, биосовместимость и устойчивость к коррозии. Эти свойства открывают новые перспективы в повышении эффективности медицинских изделий.

Материалы на основе наночастиц, такие как серебро и золото, активно применяются для создания покрытий стентов. Наночастицы серебра известны своими антибактериальными свойствами, что способствует снижению риска инфекций, связанных с имплантацией стентов. Золотые наночастицы, в свою очередь, демонстрируют способность уменьшать тромбообразование, что подтверждено клиническими исследованиями. Эти уникальные характеристики делают наноматериалы идеальными кандидатами для использования в покрытиях стентов, где требуется сочетание биосовместимости и специфических функциональных свойств [30].

Анализ неорганических материалов для покрытия стентов

Типы неорганических материалов, их физико-химические свойства и биосовместимость

Неорганические покрытия, такие как оксид титана, играют ключевую роль в ингибировании адгезии тромбоцитов благодаря уникальным поверхностным свойствам, препятствующим взаимодействию тромбоцитов с поверхностью стента и, таким образом, снижающим риск тромбоза. Исследования подтверждают, что эти материалы обладают высокой биосовместимостью и устойчивостью к образованию тромботических отложений. При этом функционирование покрытий оксонитрида титана в физиологических условиях сопровождается положительным эффектом – продуцированием монооксида азота, который регулирует и стимулирует расширение сосудов и полых органов [31]. Покрытия на основе фосфатов кальция оказывают значительное влияние на активацию свертывающей системы крови. Эти материалы взаимодействуют с белками плазмы, что уменьшают вероятность запуска каскада свертывания. Таким образом, неорганические покрытия оказывают комплексное влияние на процессы тромбообразования, включая ингибирование адгезии тромбоцитов, снижение активации свертывающей системы, предотвращение гиперплазии интимы и воспалительных реакций. Эти свойства делают их незаменимыми в разработке стентов нового поколения, направленных на снижение риска тромбоза и улучшение клинических исходов.

В области сердечно-сосудистой хирургии для покрытия стентов используются различные неорганические материалы, каждый из которых обладает уникальными свойствами, обеспечивающими их эффективность. Среди них особое внимание уделяется титану (Ti), оксиду циркония (ZrO2), нитриду титана (TiN) и серебру (Ag) [32–34]. Эти материалы выбраны за их биосовместимость, устойчивость к коррозии, механическую прочность и антимикробные свойства. Сравнительный анализ неорганических материалов, используемых для покрытия стентов, демонстрирует их сильные и слабые стороны. Например, титан известен высокой биосовместимостью и долговечностью, что делает его предпочтительным для медицинских имплантатов, обладает высокой устойчивостью к коррозии и биологической инертностью, что минимизирует риск воспалительных реакций [32]. Оксид циркония благодаря химической стабильности и прочности также находит широкое применение, обеспечивает механическую прочность и устойчивость к коррозии, что делает его предпочтительным для долговременных имплантатов. В литературе найдено значительное количество научных трудов, включающих анализ использования нитрида титана в качестве покрытия для стентов. Нитрид титана выделяется низким уровнем тромбообразования [35], а серебро обладает антимикробными свойствами, что снижает риск инфекционных осложнений [33]. Эти материалы благодаря низкой тромбогенности и антимикробным свойствам соответственно помогают снизить риск тромбообразования и инфекционных осложнений.

В поисках оптимального покрытия стент-графтов особое внимание привлекает карбид кремния (SiC). Карбид кремния, особенно аморфный гидрогенизированный SiC, является полупроводником, известным своими антитромбогенными свойствами. Его способность минимизировать осаждение тромбоцитов, лейкоцитов и моноцитов на поверхности стента делает его перспективным вариантом для решения проблемы рестеноза. Исследования *in vitro* показали обнадеживающие результаты, указы-

вающие на потенциал SiC-покрытых стентов в снижении тромботических событий. Однако результаты клинических исследований оказались противоречивыми. В некоторых работах сообщалось об эндотелизации в ходе клинического наблюдения за SiC-покрытыми стентами в течение 6 мес. Другие авторы показали усиление неоинтимальной гиперплазии в тот же период наблюдения для SiC-покрытых стентов, что указывает на менее благоприятные результаты [36]. В клиническом испытании, включающем сравнение SiC-покрытых стентов Biotronik (Германия) со стентами из стали 316L NIR Boston Scientific (США), не выявлено явного превосходства одного типа стентов над другим в отношении серьезных нежелательных коронарных событий за период наблюдения от 8 до 12 нед. [37].

Одним из широко обсуждаемых решений проблемы детерминированной биосовместимости в диапазоне биоинертность/биоактивность является нанесение тонких алмазоподобных углеродных покрытий (diamond-like coating, DLC). В связи с этим исследования кремнеуглеродных покрытий с целью улучшения биоинтеграции внутрисосудистых имплантов представляют как фундаментальный, так и прикладной интерес для сердечно-сосудистой хирургии [38]. DLC-покрытия представляют собой материалы, состоящие из углерода, структура которых сочетает в себе свойства алмаза и графита. Их структура гибридизации атомов углерода – смесь sp3 (тетрагональный алмазный тип кристаллической решетки) и sp2 (тригональный графитовый тип) с аморфным углеродом, твердость 10 по шкале Мооса. Благодаря такой структуре DLC-покрытия обладают высокой твердостью, низким коэффициентом трения и химической инертностью, низкой цитотоксичностью [39] и гемосовместимостью [40], что обеспечивает им исключительную устойчивость к износу и коррозии. Благодаря этим характеристикам DLC-покрытия находят широкое применение в различных областях, включая медицину. В кардиохирургии DLC-покрытия используются благодаря своим уникальным свойствам, включая снижение адгезии тромбоцитов и предотвращение тромбообразования. Исследования показывают, что поверхность стентов, обработанная DLC-покрытиями, демонстрирует значительное уменьшение риска образования тромбов. Известно, что в течение 6 мес. после имплантации рестеноз был выявлен в 11% случаев [25]. С течением накопления опыта применения DLC-покрытия появляются модификации, направленные на ликвидацию недостатков, в частности комбинация с кремнием, титаном и его оксидами [41, 42].

Заключение

Покрытия представляют собой важный инструмент в решении ключевых задач современной медицины. Их способность модифицировать поверхность материалов, улучшая биосовместимость, антитромбогенные свойства и устойчивость к воспалительным реакциям, открывает горизонты для создания медицинских устройств нового поколения. Покрытия на основе фосфатов кальция, диоксида кремния, нитинола с легированием различными элементами, карбида кремния, демонстрируют значительный потенциал в снижении таких осложнений, как рестеноз и тромбоз, за счет контроля взаимодействия материалов с биологическими системами. Однако успех применения неорганических покрытий зависит от комплексного подхода, учитывающего не только их физико-химические свойства, но и биологические реакции in vivo. Несмотря на оптимистичные результаты in vitro, трансляция этих достижений ограничивается вариабельностью ответа тканей, долгосрочной стабильностью покрытий и влиянием на процессы ремоделирования сосудов. Кроме того, вопросы масштабируемости производства и стоимости остаются критическими для широкого внедрения.

Перспективы развития направления связаны с комбинацией неорганических покрытий с биоактивными молекулами (например, антикоагулянтами) для создания гибридных систем с программируемым функционалом. Углубленное изучение механизмов клеточного взаимодействия, а также стандартизация протоколов тестирования in vivo позволят устранить существующие противоречия в данных и оптимизировать дизайн покрытий. В конечном итоге интеграция инженерных и биологических знаний может привести к прорыву в создании материалов, которые не только имитируют естественные ткани, но и активно модулируют восстановительные процессы, в частности неоэндотелизацию с высвобождением NO, что делает неорганические покрытия незаменимым элементом персонализированной медицины будущего.

Несмотря на достигнутые результаты, исследования имеют ограничения. В частности, требуются более детальное изучение взаимодействия покрытий с биологическими системами в долгосрочной перспективе, а также анализ эффективности различных технологий нанесения в реальных клинических условиях. Будущие исследования могут быть направлены на разработку новых материалов с улучшенными характеристиками, интеграцию нанотехнологий и изучение адаптивных покрытий, способных реагировать на изменения в организме.

В заключение можно отметить, что исследование неорганических покрытий стентов в кардиохирургии является важным шагом на пути к улучшению качества лечения сердечно-сосудистых заболеваний. Разработка и внедрение эффективных покрытий с учетом их биосовместимости, долговечности и способности предотвращать тромбо-

образование играет ключевую роль в повышении клинической успешности процедур. Остается не менее значимый вопрос – можно ли избежать коррозии нанесением особого покрытия. Дальнейшие исследования в этой области позволят раскрыть новые возможности для совершенствования технологий и улучшения здоровья пациентов в раннем и отдаленном послеоперационном периоде.

Комментарий авторов

В обзоре литературы обсуждены различные типы неорганических покрытий для стентов. Акцент сделан на сильных и слабых сторонах, рисках рестеноза и тромбообразования в раннем и отдаленном послеоперационном периоде. Результаты современных исследований подчеркивают значимость дальнейших разработок в области создания оптимального покрытия стентов с низкими рисками осложнений.

Конфликт интересов

А.В. Протопопов заявляет об отсутствии конфликта интересов. М.О. Жульков заявляет об отсутствии конфликта интересов. Д.А. Сирота заявляет об отсутствии конфликта интересов. Я.М. Смирнов заявляет об отсутствии конфликта интересов. А.С. Гренадёров заявляет об отсутствии конфликта интересов. М.А. Суровцева заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование

Исследование выполнено в рамках проекта № 25-15-20002 (соглашение № 25-15-20002 от 21.05.2025 с Российским научным фондом и соглашение № 30-2025-000854 от 21.04.2025 с министерством науки и инновационной политики Новосибирской области).

Информация об авторах

Протопопов Андрей Владимирович, аспирант, младший научный сотрудник научно-исследовательского отдела хирургии аорты, коронарных и периферических артерий института патологии кровообращения федерального государственного бюджетного учреждения «Национальный медицинский исследовательский центр имени академика Е.Н. Мешалкина» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Новосибирск, Российская Федерация; **ORCID** 0000-0002-2617-2447

Жульков Максим Олегович, кандидат медицинских наук научный сотрудник научно-исследовательского отдела хирургии аорты, коронарных и периферических артерий института патологии кровообращения федерального государственного бюджетного учреждения «Национальный медицинский исследовательский центр имени академика Е.Н. Мешалкина» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Новосибирск, Российская Федерация; **ORCID** 0000-0001-7976-596X

Сирота Дмитрий Андреевич, доктор медицинских наук заведующий научно-исследовательским отделом хирургии аорты, коронарных и периферических артерий института патологии кровообращения федерального государственного бюджетного учреждения «Национальный медицинский исследовательский центр имени академика Е.Н. Мешалкина» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Новосибирск, Российская Федерация; доцент кафедры сердечно-сосудистой хирургии факультета повышения квалификации и профессиональной переподготовки федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации Российской Федерации, Новосибирск, Российская Федерация; **ORCID** 0000-0002-9940-3541

Смирнов Ярослав Максимович, медицинский брат-анестезист отделения анестезиологии и реанимации для взрослого населения федерального государственного бюджетного учреждения «Национальный медицинский исследовательский центр имени академика Е.Н. Мешалкина» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Новосибирск, Российская Федерация; студент лечебного факультета Института медицины и психологии В. Зельмана

Author Information Form

Protopopov Andrey V., Postgraduate Student, Junior Researcher, Center for Surgery of the Aorta, Coronary and Peripheral Arteries, Institute of Circulation Pathology, Federal State Budgetary Institution “Meshalkin National Medical Research Center” of the Ministry of Healthcare of Russian Federation, Novosibirsk, Russian Federation; **ORCID** 0000-0002-2617-2447

Zhulkov Maxim O., MD, PhD, Researcher, Center for Surgery of the Aorta, Coronary and Peripheral Arteries, Institute of Circulation Pathology, Federal State Budgetary Institution “Meshalkin National Medical Research Center” of the Ministry of Healthcare of Russian Federation, Novosibirsk, Russian Federation; **ORCID** 0000-0001-7976-596X

Sirota Dmitry A., MD, PhD, Head of the Center for Surgery of the Aorta, Coronary and Peripheral Arteries, Institute of Circulation Pathology, Federal State Budgetary Institution “Meshalkin National Medical Research Center” of the Ministry of Healthcare of Russian Federation, Novosibirsk, Russian Federation; Associate Professor, Department of Cardiovascular Surgery, Faculty of Advanced Training and Professional Retraining, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Novosibirsk State Medical University” Ministry of Healthcare of the Russian Federation Russian Federation, Novosibirsk, Russian Federation; **ORCID** 0000-0002-9940-3541

Smirnov Yaroslav M., Anesthesia Nurse, Department of Anesthesiology and Intensive Care for Adult Patients, Federal State Budgetary Institution “Meshalkin National Medical Research Center” of the Ministry of Healthcare of Russian Federation, Novosibirsk, Russian Federation; Medical Student, Faculty of Medicine, V. Zelman Institute of Medicine and Psychology, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “Novosibirsk National Research State

федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет», Новосибирск, Российская Федерация; **ORCID** 0009-0000-2435-9868

Гренадёров Александр Сергеевич, доктор технических наук старший научный сотрудник лаборатории прикладной электроники, заместитель директора по научной работе федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт сильноточной электроники» Сибирского отделения Российской академии наук, Томск, Российская Федерация; **ORCID** 0000-0001-6013-0200

Суровцева Мария Александровна, кандидат медицинских наук лаборант лаборатории экспериментальной хирургии и морфологии института экспериментальной биологии и медицины федерального государственного бюджетного учреждения «Национальный медицинский исследовательский центр имени академика Е.Н. Мешалкина» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Новосибирск, Российская Федерация; **ORCID** 0000-0002-4752-988X

University", Novosibirsk, Russian Federation; **ORCID** 0009-0000-2435-9868

Grenadyorov Alexander S., PhD, Senior Researcher, Laboratory of Applied Electronics, Deputy Director for Research, Federal State Budgetary Institution of Science "Institute of High Current Electronics" of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russian Federation; **ORCID** 0000-0001-6013-0200

Surovtseva Maria A., MD, PhD, Laboratory Assistant, Laboratory of Experimental Surgery and Morphology, Institute of Experimental Biology and Medicine, Federal State Budgetary Institution "Meshalkin National Medical Research Center" of the Ministry of Healthcare of Russian Federation, Novosibirsk, Russian Federation; **ORCID** 0000-0002-4752-988X

Вклад авторов в статью

ПАВ – вклад в концепцию исследования, написание и корректировка статьи, утверждение окончательной версии для публикации, полная ответственность за содержание

ЖМО – вклад в концепцию исследования, корректировка статьи, утверждение окончательной версии для публикации, полная ответственность за содержание

СДА – вклад в концепцию исследования, корректировка статьи, утверждение окончательной версии для публикации, полная ответственность за содержание

СЯМ – вклад в концепцию исследования, корректировка статьи, утверждение окончательной версии для публикации, полная ответственность за содержание

ГАС – вклад в концепцию исследования, корректировка статьи, утверждение окончательной версии для публикации, полная ответственность за содержание

СМА – вклад в концепцию исследования, корректировка статьи, утверждение окончательной версии для публикации, полная ответственность за содержание

Author Contribution Statement

PAV – contribution to the concept of the study, manuscript writing, editing, approval of the final version, fully responsible for the content

ZhMO – contribution to the concept of the study, editing, approval of the final version, fully responsible for the content

SDA – contribution to the concept of the study, editing, approval of the final version, fully responsible for the content

SYaM – contribution to the concept of the study, editing, approval of the final version, fully responsible for the content

GAS – contribution to the concept of the study, editing, approval of the final version, fully responsible for the content

SMA – contribution to the concept of the study, editing, approval of the final version, fully responsible for the content

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Vaduganathan M., Mensah G.A., Turco J.V., Fuster V., Roth G.A. The Global Burden of Cardiovascular Diseases and Risk: A Compass for Future Health. J Am Coll Cardiol. 2022;80(25):2361-2371. doi: 10.1016/j.jacc.2022.11.005.

2. Ahadi F., Azadi M., Biglari M, Bodaghi M., Khaleghian A. Evaluation of coronary stents: A review of types, materials, processing techniques, design, and problems. Heliyon. 2023;9(2):e13575. doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e13575.

3. Scafa Udriște A., Niculescu A.G., Grumezescu A.M., Bădilă E. Cardiovascular Stents: A Review of Past, Current, and Emerging Devices. Materials (Basel). 2021;14(10):2498. doi: 10.3390/ma14102498.

4. Wassif, H., Welt, F. G. P. Restenosis of Stented Coronary Arteries. SCAI Interventional Cardiology Board Review: Second Edition, 2023. 10–15. https://doi.org/10.3109/9780203213810-14

5. Yigit, O., Topuz, M., Dikici, B. Multifunctional coatings for biomedical applications. In: Multi-Scale and Multifunctional Coatings and Interfaces for Tribological Contacts. Behera A., Saxena K.K., Rajak D.K., Sehgal S. Eds. London: CRC Press. 2025. 217–244. https://doi.org/10.1201/9781032635347-14

6. Takeda M., Shiba N. Non-invasive recanalization of first-generation sirolimus-eluting stent thrombosis due to stent fracture and coronary artery aneurysm after clopidogrel treatment 15 years after implantation. J Cardiol Cases. 2024;29(5):209-213. doi: 10.1016/j.jccase.2024.01.004.

7. Serruys P. W., Kutryk M. J. B., Ong A. T. L. Coronary-artery stents. N Engl J Med. 2006; 354(5): 483–495. doi:10.1056/NEJMRA051091

8.Ong A.T., McFadden E.P., Regar E., de Jaegere P.P., van Domburg R.T., Serruys P.W. Late angiographic stent thrombosis (LAST) events with drug-eluting stents. J Am Coll Cardiol. 2005;45(12):2088-92. doi: 10.1016/j.jacc.2005.02.086.

9. Togni M., Windecker S., Cocchia R., Wenaweser P., Cook S., Billinger M., Meier B., Hess O.M. Sirolimus-eluting stents associated with paradoxic coronary vasoconstriction. J Am Coll Cardiol. 2005;46(2):231-6. doi: 10.1016/j.jacc.2005.01.062.

10. Udriște A.S., Burdușel A.C., Niculescu A.G., Rădulescu M., Grumezescu A.M. Coatings for Cardiovascular Stents-An Up-to-Date Review. Int J Mol Sci. 2024;25(2):1078. doi: 10.3390/ijms25021078.

11. Chen Y., Chen Z., Zheng Z., Xia Y. Bio-inspired

nanocomposite coatings on orthodontic archwires with corrosion resistant and antibacterial properties. Front Bioeng Biotechnol. 2023;11:1272527. doi: 10.3389/fbioe.2023.1272527.

12. Zhao Y., Wang Z., Bai L., Zhao F., Liu S., Liu Y., Yao X., Hang R. Regulation of endothelial functionality through direct and immunomodulatory effects by Ni-Ti-O nanospindles on NiTi alloy. Mater Sci Eng C Mater Biol Appl. 2021;123:112007. doi: 10.1016/j.msec.2021.112007.

13. Dulski M., Gawecki R., Sułowicz S., Cichomski M., Kazek-Kęsik A., Wala M., Leśniak-Ziółkowska K., Simka W., Mrozek-Wilczkiewicz A., Gawęda M., Sitarz M., Dudek K. Key Properties of a Bioactive Ag-SiO2/TiO2 Coating on NiTi Shape Memory Alloy as Necessary at the Development of a New Class of Biomedical Materials. Int J Mol Sci. 2021;22(2):507. doi: 10.3390/ijms22020507.

14. Dudek K., Dulski M., Łosiewicz B. Functionalization of the NiTi Shape Memory Alloy Surface by HAp/SiO2/Ag Hybrid Coatings Formed on SiO2-TiO2 Glass Interlayer. Materials (Basel). 2020;13(7):1648. doi: 10.3390/ma13071648.

15. Li P., Liang F., Wang L., Jin D., Shang Y., Liu X., Pan Y., Yuan J., Shen J., Yin M. Bilayer vascular grafts with on-demand NO and H2S release capabilities. Bioact Mater. 2023;31:38-52. doi: 10.1016/j.bioactmat.2023.07.020.

16. Høl P.J., Gjerdet N.R., Jonung T. Corrosion and metal release from overlapping arterial stents under mechanical and electrochemical stress - An experimental study. J Mech Behav Biomed Mater. 2019;93:31-35. doi: 10.1016/j.jmbbm.2019.02.001.

17. Zhang B., Hu Y., Du H., Han S., Ren L., Cheng H., Wang Y., Gao X. et al. Tissue engineering strategies for spiral ganglion neuron protection and regeneration. J Nanobiotechnology. 2024;22(1):458. doi: 10.1186/s12951-024-02742-8.

18. Жульков М.О., Гренадёров А.С., Корнеев Д.С., Агаева Х.А., Чернявский А.М., Хлусов И.А. Исследование реакции тромбоцитов на a-C:H:SiOx покрытие, полученное методом плазмохимического осаждения с использованием импульсного биполярного смещения. Бюллетень сибирской медицины. 2020; 19 (3): 15-21. doi:10.20538/1682-0363-2020-3-15-21.

19. Tatami Y., Tanaka A., Ohashi T., Kubota R., Kaneko S., Shinoda M., Uemura Y., Takagi K. et al.; N-registry investigators. Clinical features, future cardiac events, and prognostic factors following percutaneous coronary intervention in young female patients. Heart Vessels. 2024;39(6):505-513. doi: 10.1007/s00380-024-02369-7.

20. Grenadyorov A. S., Solovyev Oskomov K. V., Yakovlev E. V., Zhulkov M. O. AISI 316L stainless steel modification by surface alloy and a-C:H:SiOx coating synthesis. Vacuum. 2022;204: 111369. doi:10.1016/J.VACUUM.2022.111369

21. Khlusov I.A., Grenadyorov A.S., Solovyev A.A., Semenov V.A., Zhulkov M.O., Sirota D.A., Chernyavskiy A.M., Poveshchenko O.V., Surovtseva M.A., Kim I.I., Bondarenko N.A., Semin V.O. Endothelial Cell Behavior and Nitric Oxide Production on a-C:H:SiOx-Coated Ti-6Al-4V Substrate. Int J Mol Sci. 2023;24(7):6675. doi: 10.3390/ijms24076675.

22. Grenadyorov A. S., Solovyev Ivanova N. M., Zhulkov M. O., Chernyavskiy A. M., Malashchenko V. V., Khlusov, I. A. Enhancement of the adhesive strength of antithrombogenic and hemocompatible a-C:H:SiOx films to polypropylene. Surface and Coatings Technology.2020;399:126132. doi:10.1016/J.SURFCOAT.2020.126132

23. Bajeu I.T., Niculescu A.G., Scafa-Udriște A., Andronescu E. Intrastent Restenosis: A Comprehensive Review. Int J Mol Sci. 2024;25(3):1715. doi: 10.3390/ijms25031715.

24. Anderson D.E.J., Le H.H., Vu H., Johnson J., Aslan J.E., Goldman J., Hinds M.T. Thrombogenicity of biodegradable metals. Bioact Mater. 2024;38:411-421. doi: 10.1016/j.bioactmat.2024.05.002.

25. Khlusov I.A., Grenadyorov A.S., Solovyev A.A., Semenov V.A., Zhulkov M.O., Sirota D.A., Chernyavskiy A.M., Poveshchenko O.V., Surovtseva M.A., Kim I.I., Bondarenko N.A., Semin V.O. Endothelial Cell Behavior and Nitric Oxide Production on a-C:H:SiOx-Coated Ti-6Al-4V Substrate. Int J Mol Sci. 2023;24(7):6675. doi: 10.3390/ijms24076675.

26. Beshchasna N., Saqib M., Kraskiewicz H., Wasyluk Ł., Kuzmin O., Duta O.C., Ficai D., Ghizdavet Z. et al. Recent Advances in Manufacturing Innovative Stents. Pharmaceutics. 2020;12(4):349. doi: 10.3390/pharmaceutics12040349.

27. Makhlouf A. S. H. Current and advanced coating technologies for industrial applications. Nanocoatings and Ultra-Thin Films. 2011:3–23. doi:10.1533/9780857094902.1.3

28. Ahadi F., Azadi M., Biglari M., Bodaghi M., Khaleghian A. Evaluation of coronary stents: A review of types, materials, processing techniques, design, and problems. Heliyon. 2023;9(2):e13575. doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e13575.

29. Ермакова Т.А., Фомичев В.Т., Мордвинкин Д.В. Создание лекарственных покрытий медицинских артериальных стентов электрохимическим методом. NBI-technologies. 2022;16 (1): 27-32. doi:10.15688/NBПVJVOLSU.2022.1.5

30. Carvalho I., Dias N., Henriques M., Calderon V.S., Ferreira P., Cavaleiro A., Carvalho S. Antibacterial Effects of Bimetallic Clusters Incorporated in Amorphous Carbon for Stent Application. ACS Appl Mater Interfaces. 2020;12(22):24555-24563. doi: 10.1021/acsami.0c02821.

31. Бойцова Е.Л., Леонова Л.А., Пустовалова А.А. Допинированые азотом нанопленки диоксида титана для медицинского применения. Известия высших учебных заведений. Серия «Химия и химическая технология». 2020; 63(3): 54-59. doi:10.6060/ivkkt.20206303.6087

32. Windecker S., Billinger M., Hess O.M. Stent coating with titanium-nitride-oxide for prevention of restenosis. EuroIntervention. 2006;2(2):146-8.

33. Czollner L., Papaplioura E., Linder T., Liu R., Li Y., Atanasov A. G., Dirsch V. M., Schnürch M., Mihovilovic M. D. A silver-coated copper wire as inexpensive drug eluting stent model: determination of the relative releasing properties of leoligin and derivatives. Monatsh Chem. 2023;154(12): 1317–1326. do:10.1007/S00706-020-02677-4.

34. Mikhalovska L., Chorna N., Lazarenko O., Haworth P., Sudre A., Mikhalovsky S. Inorganic coatings for cardiovascular stents: In vitro and in vivo studies. J Biomed Mater Res B Appl Biomater. 2011;96(2):333-41. doi: 10.1002/jbm.b.31772.

35. Raikar A.S., Priya S., Bhilegaonkar S.P., Somnache S.N., Kalaskar D.M. Surface Engineering of Bioactive Coatings for Improved Stent Hemocompatibility: A Comprehensive Review. Materials. 2023; 16(21):6940. doi:10.3390/ma16216940

36. Tanajura L.F., Sousa J.E., Sousa A.G., Abizaid A., Paula J.E., Albertal M., Feres F., Mattos L.A., Staico R., Pinto I.M. Estudo prospectivo e randomizado de pacientes tratados com e sem stents revestidos com carbeto de silício amorfo para a prevenção da reestenose coronariana. Avaliação ultrasonográfica [Randomized intravascular ultrasound comparison between endoprostheses with and without amorphous silicon-carbide]. Arq Bras Cardiol. 2004;83 Spec No:59-63. (Portuguese).

37. Mani G., Feldman M.D., Patel D., Agrawal C.M. Coronary stents: a materials perspective. Biomaterials. 2007;28(9):1689-710. doi: 10.1016/j.biomaterials.2006.11.042.

38. Biswas H. S., Datta J., Mandal P., Poddar S., Kundu A. K., Saha I. Optimized study of the annealing effect on the electrical and structural properties of HDLC thin-films. RSC Adv. 2022; 12(46): 29805–29812. doi:10.1039/D2RA06255K.

39. Roy A., Bennett A., Pruitt L. Feasibility of using diamond-like carbon films in total joint replacements: a review. J Mater Sci Mater Med. 2024;35(1):47. doi: 10.1007/s10856-024-06814-x.

40. Ahmed Baduruthamal Z., Mohammed A.S., Kumar A.M., Hussein M.A., Al-Aqeeli N. Tribological and Electrochemical Characterization of UHMWPE Hybrid Nanocomposite Coating for Biomedical Applications. Materials (Basel). 2019;12(22):3665. doi: 10.3390/ma12223665.

41. Khlusov I.A., Grenadyorov A.S., Solovyev A.A.,

Semenov V.A., Zhulkov M.O., Sirota D.A., Chernyavskiy A.M., Poveshchenko O.V., Surovtseva M.A., Kim I.I., Bondarenko N.A., Semin V.O. Endothelial Cell Behavior and Nitric Oxide Production on a-C:H:SiOx-Coated Ti-6Al-4V Substrate. Int J Mol Sci. 2023;24(7):6675. doi: 10.3390/ijms24076675.

42. Grenadyorov A.S., Solovyev A.A., Oskomov K.V., Semenov V.A., Zhulkov M.O., Sirota D.A., Chernyavskiy A.M., Karmadonova N.A. et al. Morphofunctional reaction of leukocytes and platelets in in vitro contact with a-C:H:SiOx -coated Ti-6Al-4V substrate. J Biomed Mater Res A. 2023;111(3):309-321. doi: 10.1002/jbm.a.37470.

REFERENCES

1. Vaduganathan M., Mensah G.A., Turco J.V., Fuster V., Roth G.A. The Global Burden of Cardiovascular Diseases and Risk: A Compass for Future Health. J Am Coll Cardiol. 2022;80(25):2361-2371. doi: 10.1016/j.jacc.2022.11.005.

2. Ahadi F., Azadi M., Biglari M, Bodaghi M., Khaleghian A. Evaluation of coronary stents: A review of types, materials, processing techniques, design, and problems. Heliyon. 2023;9(2):e13575. doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e13575.

3. Scafa Udriște A., Niculescu A.G., Grumezescu A.M., Bădilă E. Cardiovascular Stents: A Review of Past, Current, and Emerging Devices. Materials (Basel). 2021;14(10):2498. doi: 10.3390/ma14102498.

4. Wassif, H., Welt, F. G. P. Restenosis of Stented Coronary Arteries. SCAI Interventional Cardiology Board Review: Second Edition, 2023. 10–15. https://doi.org/10.3109/9780203213810-14

5. Yigit, O., Topuz, M., Dikici, B. Multifunctional coatings for biomedical applications. In: Multi-Scale and Multifunctional Coatings and Interfaces for Tribological Contacts. Behera A., Saxena K.K., Rajak D.K., Sehgal S. Eds. London: CRC Press. 2025. 217–244. https://doi.org/10.1201/9781032635347-14

6. Takeda M., Shiba N. Non-invasive recanalization of first-generation sirolimus-eluting stent thrombosis due to stent fracture and coronary artery aneurysm after clopidogrel treatment 15 years after implantation. J Cardiol Cases. 2024;29(5):209-213. doi: 10.1016/j.jccase.2024.01.004.

7. Serruys P. W., Kutryk M. J. B., Ong A. T. L. Coronary-artery stents. N Engl J Med. 2006; 354(5): 483–495. doi:10.1056/NEJMRA051091

8.Ong A.T., McFadden E.P., Regar E., de Jaegere P.P., van Domburg R.T., Serruys P.W. Late angiographic stent thrombosis (LAST) events with drug-eluting stents. J Am Coll Cardiol. 2005;45(12):2088-92. doi: 10.1016/j.jacc.2005.02.086.

9. Togni M., Windecker S., Cocchia R., Wenaweser P., Cook S., Billinger M., Meier B., Hess O.M. Sirolimus-eluting stents associated with paradoxic coronary vasoconstriction. J Am Coll Cardiol. 2005;46(2):231-6. doi: 10.1016/j.jacc.2005.01.062.

10. Udriște A.S., Burdușel A.C., Niculescu A.G., Rădulescu M., Grumezescu A.M. Coatings for Cardiovascular Stents-An Up-to-Date Review. Int J Mol Sci. 2024;25(2):1078. doi: 10.3390/ijms25021078.

11. Chen Y., Chen Z., Zheng Z., Xia Y. Bio-inspired nanocomposite coatings on orthodontic archwires with corrosion resistant and antibacterial properties. Front Bioeng Biotechnol. 2023;11:1272527. doi: 10.3389/fbioe.2023.1272527.

12. Zhao Y., Wang Z., Bai L., Zhao F., Liu S., Liu Y., Yao X., Hang R. Regulation of endothelial functionality through direct and immunomodulatory effects by Ni-Ti-O nanospindles on NiTi alloy. Mater Sci Eng C Mater Biol Appl. 2021;123:112007. doi: 10.1016/j.msec.2021.112007.

13. Dulski M., Gawecki R., Sułowicz S., Cichomski M., Kazek-Kęsik A., Wala M., Leśniak-Ziółkowska K., Simka W., Mrozek-Wilczkiewicz A., Gawęda M., Sitarz M., Dudek K. Key Properties of a Bioactive Ag-SiO2/TiO2 Coating on NiTi Shape Memory Alloy as Necessary at the Development of a New Class of Biomedical Materials. Int J Mol Sci. 2021;22(2):507. doi: 10.3390/ijms22020507.

14. Dudek K., Dulski M., Łosiewicz B. Functionalization of the NiTi Shape Memory Alloy Surface by HAp/SiO2/Ag Hybrid Coatings Formed on SiO2-TiO2 Glass Interlayer. Materials (Basel). 2020;13(7):1648. doi: 10.3390/ma13071648.

15. Li P., Liang F., Wang L., Jin D., Shang Y., Liu X., Pan Y., Yuan J., Shen J., Yin M. Bilayer vascular grafts with on-demand NO and H2S release capabilities. Bioact Mater. 2023;31:38-52. doi: 10.1016/j.bioactmat.2023.07.020.

16. Høl P.J., Gjerdet N.R., Jonung T. Corrosion and metal release from overlapping arterial stents under mechanical and electrochemical stress - An experimental study. J Mech Behav Biomed Mater. 2019;93:31-35. doi: 10.1016/j.jmbbm.2019.02.001.

17. Zhang B., Hu Y., Du H., Han S., Ren L., Cheng H., Wang Y., Gao X. et al. Tissue engineering strategies for spiral ganglion neuron protection and regeneration. J Nanobiotechnology. 2024;22(1):458. doi: 10.1186/s12951-024-02742-8.

18. Zhulkov M.O., Grenadyorov A.S., Korneev D.S., Agaeva H.A., Chernyavsky A.M., Khlusov I.A. The study of platelet reaction on a-C:H:SiOx coatings obtained via plasma enhanced chemical vapor deposition with bipolar bias voltage. Bulletin of Siberian Medicine. 2020; 19 (3): 15–21. doi:10.20538/1682-0363- 2020-3-15-21. (In Russian)

19. Tatami Y., Tanaka A., Ohashi T., Kubota R., Kaneko S., Shinoda M., Uemura Y., Takagi K. et al.; N-registry investigators. Clinical features, future cardiac events, and prognostic factors following percutaneous coronary intervention in young female patients. Heart Vessels. 2024;39(6):505-513. doi: 10.1007/s00380-024-02369-7.

20. Grenadyorov A. S., Solovyev Oskomov K. V., Yakovlev E. V., Zhulkov M. O. AISI 316L stainless steel modification by surface alloy and a-C:H:SiOx coating synthesis. Vacuum. 2022;204: 111369. doi:10.1016/J.VACUUM.2022.111369

21. Khlusov I.A., Grenadyorov A.S., Solovyev A.A., Semenov V.A., Zhulkov M.O., Sirota D.A., Chernyavskiy A.M., Poveshchenko O.V., Surovtseva M.A., Kim I.I., Bondarenko N.A., Semin V.O. Endothelial Cell Behavior and Nitric Oxide Production on a-C:H:SiOx-Coated Ti-6Al-4V Substrate. Int J Mol Sci. 2023;24(7):6675. doi: 10.3390/ijms24076675.

22. Grenadyorov A. S., Solovyev Ivanova N. M., Zhulkov M. O., Chernyavskiy A. M., Malashchenko V. V., Khlusov, I. A. Enhancement of the adhesive strength of antithrombogenic and hemocompatible a-C:H:SiOx films to polypropylene. Surface and Coatings Technology.2020;399:126132. doi:10.1016/J.SURFCOAT.2020.126132

23. Bajeu I.T., Niculescu A.G., Scafa-Udriște A., Andronescu E. Intrastent Restenosis: A Comprehensive Review. Int J Mol Sci. 2024;25(3):1715. doi: 10.3390/ijms25031715.

24. Anderson D.E.J., Le H.H., Vu H., Johnson J., Aslan J.E., Goldman J., Hinds M.T. Thrombogenicity of biodegradable metals. Bioact Mater. 2024;38:411-421. doi: 10.1016/j.bioactmat.2024.05.002.

25. Khlusov I.A., Grenadyorov A.S., Solovyev A.A., Semenov V.A., Zhulkov M.O., Sirota D.A., Chernyavskiy A.M., Poveshchenko O.V., Surovtseva M.A., Kim I.I., Bondarenko N.A., Semin V.O. Endothelial Cell Behavior and Nitric Oxide Production on a-C:H:SiOx-Coated Ti-6Al-4V Substrate. Int J Mol Sci. 2023;24(7):6675. doi: 10.3390/ijms24076675.

26. Beshchasna N., Saqib M., Kraskiewicz H., Wasyluk Ł., Kuzmin O., Duta O.C., Ficai D., Ghizdavet Z. et al. Recent Advances in Manufacturing Innovative Stents. Pharmaceutics. 2020;12(4):349. doi: 10.3390/pharmaceutics12040349.

27. Makhlouf A. S. H. Current and advanced coating technologies for industrial applications. Nanocoatings and Ultra-Thin Films. 2011:3–23. doi:10.1533/9780857094902.1.3

28. Ahadi F., Azadi M., Biglari M., Bodaghi M., Khaleghian A. Evaluation of coronary stents: A review of types, materials,

processing techniques, design, and problems. Heliyon. 2023;9(2):e13575. doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e13575.

29. Ermakova T.A., Fomichev V.T., Mordvinkin D.V. Sozdanie lekarstvennyh pokrytij medicinskih arterial'nyh stentov jelektrohimicheskim metodom. NBI-technologies. 2022;16 (1): 27-32. doi:10.15688/NBPVJVOLSU.2022.1.5 (In Russian)

30. Carvalho I., Dias N., Henriques M., Calderon V.S., Ferreira P., Cavaleiro A., Carvalho S. Antibacterial Effects of Bimetallic Clusters Incorporated in Amorphous Carbon for Stent Application. ACS Appl Mater Interfaces. 2020;12(22):24555-24563. doi: 10.1021/acsami.0c02821.

31. Boytsova E. L., Leonova L. A., Pustovalova, A. A. Nitrogen-doped titanium dioxide nanofilms for medical application. Izv.Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol. 2020;. 63(3): 54–59. doi:10.6060/IVKKT.20206303.6087 (In Russian)

32. Windecker S., Billinger M., Hess O.M. Stent coating with titanium-nitride-oxide for prevention of restenosis. EuroIntervention. 2006;2(2):146-8.

33. Czollner L., Papaplioura E., Linder T., Liu R., Li Y., Atanasov A. G., Dirsch V. M., Schnürch M., Mihovilovic M. D. A silver-coated copper wire as inexpensive drug eluting stent model: determination of the relative releasing properties of leoligin and derivatives. Monatsh Chem. 2023;154(12): 1317–1326. do:10.1007/S00706-020-02677-4.

34. Mikhalovska L., Chorna N., Lazarenko O., Haworth P., Sudre A., Mikhalovsky S. Inorganic coatings for cardiovascular stents: In vitro and in vivo studies. J Biomed Mater Res B Appl Biomater. 2011;96(2):333-41. doi: 10.1002/jbm.b.31772.

35. Raikar A.S., Priya S., Bhilegaonkar S.P., Somnache S.N., Kalaskar D.M. Surface Engineering of Bioactive Coatings for Improved Stent Hemocompatibility: A Comprehensive Review. Materials. 2023; 16(21):6940. doi:10.3390/ma16216940

36. Tanajura L.F., Sousa J.E., Sousa A.G., Abizaid A., Paula J.E., Albertal M., Feres F., Mattos L.A., Staico R., Pinto I.M. Estudo prospectivo e randomizado de pacientes tratados com e sem stents revestidos com carbeto de silício amorfo para a prevenção da reestenose coronariana. Avaliação ultrasonográfica [Randomized intravascular ultrasound comparison between endoprostheses with and without amorphous silicon-carbide]. Arq Bras Cardiol. 2004;83 Spec No:59-63. (Portuguese).

37. Mani G., Feldman M.D., Patel D., Agrawal C.M. Coronary stents: a materials perspective. Biomaterials. 2007;28(9):1689-710. doi: 10.1016/j.biomaterials.2006.11.042.

38. Biswas H. S., Datta J., Mandal P., Poddar S., Kundu A. K., Saha I. Optimized study of the annealing effect on the electrical and structural properties of HDLC thin-films. RSC Adv. 2022; 12(46): 29805–29812. doi:10.1039/D2RA06255K.

39. Roy A., Bennett A., Pruitt L. Feasibility of using diamond-like carbon films in total joint replacements: a review. J Mater Sci Mater Med. 2024;35(1):47. doi: 10.1007/s10856-024-06814-x.

40. Ahmed Baduruthamal Z., Mohammed A.S., Kumar A.M., Hussein M.A., Al-Aqeeli N. Tribological and Electrochemical Characterization of UHMWPE Hybrid Nanocomposite Coating for Biomedical Applications. Materials (Basel). 2019;12(22):3665. doi: 10.3390/ma12223665.

41. Khlusov I.A., Grenadyorov A.S., Solovyev A.A., Semenov V.A., Zhulkov M.O., Sirota D.A., Chernyavskiy A.M., Poveshchenko O.V., Surovtseva M.A., Kim I.I., Bondarenko N.A., Semin V.O. Endothelial Cell Behavior and Nitric Oxide Production on a-C:H:SiOx-Coated Ti-6Al-4V Substrate. Int J Mol Sci. 2023;24(7):6675. doi: 10.3390/ijms24076675.

42. Grenadyorov A.S., Solovyev A.A., Oskomov K.V., Semenov V.A., Zhulkov M.O., Sirota D.A., Chernyavskiy A.M., Karmadonova N.A. et al. Morphofunctional reaction of leukocytes and platelets in in vitro contact with a-C:H:SiOx -coated Ti-6Al-4V substrate. J Biomed Mater Res A. 2023;111(3):309-321. doi: 10.1002/jbm.a.37470.

Для цитирования: *Протопопов А.В., Жульков М.О., Сирота Д.А., Смирнов Я.М., Гренадёров А.С., Суровцева М.А. Неорганическое покрытие имплантов в сердечно-сосудистой хирургии: текущее состояние проблемы (обзор литературы). Комплексные проблемы сердечно-сосудистых заболеваний. 2025;14(3): 192-202. DOI: 10.17802/2306-1278-2025-14-3-192-202*

To cite: *Protopopov A.V., Zhulkov M.O., Sirota D.A., Smirnov Ya.M., Grenadyorov A.S., Surovtseva M.A. Inorganic coatings for implants in cardiovascular surgery: current state of the art (a review article). Complex Issues of Cardiovascular Diseases. 2025;14(3): 192-202. DOI: 10.17802/2306-1278-2025-14-3-192-202*