

DOI: 10.37988/1811-153X_2026_2_192

[С.С. Иванов](#)²,

ассистент кафедры челюстно-лицевой хирургии и хирургической стоматологии

[Л.Л. Бороздкин](#)¹,

к.м.н., доцент кафедры челюстно-лицевой хирургии

[К.А. Щербаков](#)³,

ведущий инженер лаборатории «Бионанофотоника»

[Д.И. Целиков](#)³,

ассистент, инженер лаборатории «Бионанофотоника»

[С.М. Климентов](#)³,

к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник, начальник Центра нанобиомедицины

[Д.Д. Краснер](#)¹,

аспирант кафедры челюстно-лицевой хирургии

¹ Первый МГМУ им. И.М. Сеченова, 119991, Москва, Россия² РУДН, 117198, Москва, Россия³ НИЯУ МИФИ, 115409, Москва, Россия

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Иванов С.С., Бороздкин Л.Л., Щербаков К.А., Целиков Д.И., Климентов С.М., Краснер Д.Д. Формирование поверхности дентальных имплантатов: методы модификации, их клинические преимущества и различия. — *Клиническая стоматология*. — 2026; 29 (2): 192—201. DOI: 10.37988/1811-153X_2026_2_192

Формирование поверхности дентальных имплантатов: методы модификации, их клинические преимущества и различия

Аннотация. Несмотря на обилие методов модификации поверхности дентальных имплантатов, существует разрыв между их лабораторной эффективностью и уровнем доказательных клинических данных, что затрудняет выбор оптимальной технологии для конкретных клинических сценариев. **Цель** — провести сравнительный анализ современных методов модификации поверхности (химическое травление, анодирование, плазменное напыление, лазерная обработка, нанотехнологии) с оценкой их клинических преимуществ, ограничений и перспектив применения на основе систематического обзора литературы. **Материалы и методы.** Проведен анализ публикаций за 2015—2025 гг. из баз данных PubMed, Scopus, Web of Science, eLibrary, РИНЦ. Применены критерии включения/исключения для отбора рецензируемых статей, включая оригинальные исследования, обзоры, мета-анализы и клинические испытания. **Результаты.** Установлено, что каждый метод формирует поверхность с уникальными параметрами (микро- и нанотопография, химический состав, биоактивность), что определяет различия в их клинической эффективности. Химическое травление и анодирование демонстрируют высокую остеоинтеграцию и подтверждены долгосрочными исследованиями. Плазменное напыление гидроксиапатита эффективно в сложных случаях, но имеет риски деградации покрытия. Лазерная обработка и нанотехнологии предлагают высочайшую точность и multifunctionality, но требуют дальнейших долгосрочных клинических исследований. **Выводы.** Выбор метода модификации поверхности должен быть основан на учете его доказательных преимуществ и ограничений для конкретных клинических условий. Перспективы развития связаны с комбинированием технологий и созданием интеллектуальных поверхностей с управляемыми свойствами. Для интеграции передовых методов в практику необходима разработка стандартов и долгосрочные рандомизированные исследования.

Ключевые слова: дентальные имплантаты, модификация поверхности, остеоинтеграция, химическое травление, анодирование, плазменное напыление, лазерная обработка, нанотехнологии, биосовместимость, клинические преимущества

[S.S. Ivanov](#)²,

assistant at the Oral and maxillofacial surgery Department

[L.L. Borozdtkin](#)¹,

PhD in Medical Sciences, associate professor of the Maxillofacial surgery Department

[K.A. Scherbakov](#)³,

leading engineer of Bionanophotonics Lab

[D.I. Tselikov](#)³,

assistant, engineer of Bionanophotonics Lab

[S.M. Klimentov](#)³,

PhD in Physics and Mathematics, leading researcher, head of Center of Bionanomedicine

[D.D. Krasner](#)¹,

postgraduate at the Maxillofacial surgery Department

¹ Sechenov University, 119991, Moscow, Russia² RUDN University, 117198, Moscow, Russia³ Moscow Engineering Physics Institute, 115409, Moscow, Russia

Surface modification of dental implants: processing techniques, clinical advantages and comparative analysis

Annotation. Despite the abundance of dental implant surface modification methods, a gap exists between their laboratory efficacy and the level of evidence-based clinical data, complicating the selection of the optimal technology for specific clinical scenarios. **Aim:** to conduct a comparative analysis of modern surface modification methods (chemical etching, anodization, plasma spraying, laser treatment, nanotechnology) by evaluating their clinical advantages, limitations, and application prospects based on a systematic literature review. **Materials and methods.** An analysis of publications from 2015—2025 was conducted using the PubMed, Scopus, Web of Science, eLibrary, and RSCI databases. Inclusion/exclusion criteria were applied to select peer-reviewed articles, including original research, reviews, meta-analyses, and clinical trials. **Results.** It was established that each method creates a surface with unique parameters (micro- and nanotopography, chemical composition, bioactivity), which determines the differences in their clinical efficacy. Chemical etching and anodization demonstrate high osseointegration and are supported by long-term studies. Plasma spraying of hydroxyapatite is effective in complex cases but carries risks of coating degradation. Laser treatment and nanotechnology offer the highest precision and multifunctionality but require further long-term clinical studies. **Conclusions.** The choice of a surface modification method should be based on considering its evidence-based advantages and limitations for specific clinical conditions. Future development prospects are associated with the combination

of technologies and the creation of intelligent surfaces with controllable properties. The integration of advanced methods into practice requires the development of standards and long-term randomized studies.

Key words: dental implants, surface modification, osseointegration, chemical etching, anodization, plasma spraying, laser treatment, nanotechnology, biocompatibility

ВВЕДЕНИЕ

Долгосрочный успех дентальной имплантации критически зависит от достижения и поддержания стабильной остеоинтеграции. Современные исследования убедительно демонстрируют, что ключевым фактором, определяющим биологический ответ организма на имплантат, являются свойства его поверхности — топография, химический состав, энергия и заряд [1–5]. Эти параметры напрямую влияют на адгезию, пролиферацию и дифференцировку остеогенных клеток, скорость и качество костеобразования, обеспечивая не только первичную стабильность, но и долговременный функциональный результат. В связи с этим, целенаправленная модификация поверхностного слоя дентальных имплантатов остается одной из наиболее динамично развивающихся и актуальных областей стоматологической науки и практики.

Несмотря на обилие разработанных методов модификации — от классических подходов, таких как пескоструйная обработка и химическое травление, до передовых технологий, включая анодирование, лазерную обработку и применение наноматериалов, — в данной области сохраняется ряд нерешенных проблем. Наблюдается значительный разрыв между многообещающими результатами доклинических исследований (*in vitro*, *in vivo*) и данными масштабных долгосрочных рандомизированных клинических испытаний (РКИ). Многие технологически сложные методы демонстрируют превосходство в лабораторных условиях, но не имеют достаточной доказательной базы для однозначных рекомендаций в широкой клинической практике. Кроме того, существующая литература часто носит фрагментарный характер: многочисленные публикации посвящены анализу отдельных методов, тогда как систематизированные работы, объективно сопоставляющие их клинические преимущества, ограничения и различия применительно к специфическим клиническим сценариям (остеопороз, немедленная нагрузка, сложные анатомические условия), остаются востребованными. Эта ситуация затрудняет для клинициста осознанный и дифференцированный выбор имплантационной системы.

Целью настоящего систематического обзора является проведение сравнительного анализа современных методов модификации поверхности дентальных имплантатов с фокусом на оценку их доказательных клинических преимуществ, ограничений и перспектив применения. Научная новизна работы заключается в попытке преодоления упомянутого разрыва между технологическими аспектами и клинической практикой. В статье не только описаны физико-химические основы методов, но и предпринята попытка критической оценки уровня клинической доказательности каждого

FOR CITATION:

Ivanov S.S., Borozdkin L.L., Scherbakov K.A., Tselikov D.I., Klimentov S.M., Krasner D.D. Surface modification of dental implants: processing techniques, clinical advantages and comparative analysis. *Clinical Dentistry (Russia)*. 2026; 29 (2): 192—201 (In Russian). DOI: 10.37988/1811-153X_2026_2_192

из них, проанализирована корреляция между технологическими параметрами обработки и отдаленными клиническими исходами, такими как выживаемость имплантатов, уровень резорбции маргинальной кости и частота развития периимплантита.

Настоящий обзор основан на анализе рецензируемых источников, включая мета-анализы, систематические обзоры и данные рандомизированных клинических испытаний, и структурирован таким образом, чтобы предоставить не только детальное описание технологий, но и практико-ориентированные выводы для их обоснованного применения в клинической стоматологии.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для подготовки обзора использовался систематический подход к сбору и анализу литературы. Были проанализированы публикации за последние 10 лет, включая статьи из международных журналов, а также отечественные исследования. Использованы базы данных: PubMed, Scopus, eLibrary, Российская государственная библиотека.

Ключевые слова для поиска включали: «дентальные имплантаты», «модификация поверхности», «остеоинтеграция», «химическое травление», «анодирование», «плазменное напыление», «лазерная обработка», «нанотехнологии», «биосовместимость», «клинические преимущества».

В обзор включены 54 источника. Критерии включения:

- научные статьи (оригинальные исследования, обзоры, метаанализы), клинические исследования (рандомизированные контролируемые испытания, когортные исследования), лабораторные исследования (*in vitro*, *in vivo*) на русском и английском языках не старше 10 лет (2015—2025 гг.).
 - тематика публикаций:
 - методы модификации поверхности дентальных имплантатов (химическая обработка, анодирование, плазменное напыление, лазерная обработка, нанотехнологии).
 - влияние модификации поверхности на остеоинтеграцию, биосовместимость, коррозионную стойкость и антимикробные свойства;
 - клинические и экспериментальные данные, подтверждающие эффективность методов;
 - источники — PubMed, Scopus, Web of Science, eLibrary, РИНЦ, рецензируемые журналы с высоким импакт-фактором.
- Критерии исключения:
- тезисы конференций без полнотекстового доступа, неопубликованные данные, препринты,

диссертации (если не представлены в рецензируемых журналах), газетные статьи, популярные обзоры без научной основы.

- исследования, не связанные с модификацией поверхности имплантатов; работы, посвященные другим типам имплантатов (например, ортопедическим, кардиологическим).
- Методологические недостатки:
 - исследования с малым размером выборки (<10 для клинических работ);
 - отсутствие контрольной группы в экспериментальных исследованиях;
 - недостаточное описание методов или статистического анализа.

Систематизация и анализ данных

Отобранные публикации систематизированы по методам модификации поверхности. Для каждого метода анализировались следующие аспекты:

- технологические принципы и параметры обработки;
- влияние на физико-химические характеристики поверхности (топография, химический состав, энергия);
- данные доклинических исследований (*in vitro*, *in vivo*) о клеточном ответе и остеоинтеграции;
- уровень клинической доказательности на основе имеющихся данных долгосрочных исследований, мета-анализов и рандомизированных контролируемых испытаний (РКИ);
- выявленные преимущества, ограничения и рекомендуемые клинические сценарии применения.

На основе проведенного анализа сформирована сравнительная таблица, обобщающая ключевые характеристики методов.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате исследования литературы можно сделать вывод, что самыми распространенными методами являются: химическое травление и пассивация, анодирование, плазменное напыление, лазерная модификация, использование наноструктур и комбинированные подходы [6–8].

Химическое травление и пассивация

Химическая обработка остается одним из наиболее распространенных и экономически эффективных методов модификации поверхности титановых имплантатов. Ее принцип основан на контролируемом химическом растворении поверхностного слоя металла для создания специфической микро топографии и формирования стабильного оксидного слоя [9, 10].

Стандартный процесс включает несколько этапов:

- Очистка поверхности для удаления органических загрязнений и оксидных пленок с использованием щелочных и кислотных растворов.
- Непосредственно травление с применением сильных кислот (соляной HCl, серной H₂SO₄, плавиковой HF). Процесс основан на селективном растворении, в результате которого формируется

микропористая структура с увеличением площади поверхности [9, 11].

- Пассивация, заключающаяся в формировании плотного и стабильного оксидного слоя (в основном, диоксида титана TiO₂), который резко повышает коррозионную стойкость имплантата [9, 12]. Современные подходы часто включают двухэтапное травление (например, протравливание с последующей обработкой HCl для создания гидрофильной поверхности, как в системе SLActive) и фторирование для повышения биоактивности [13].

Химическое травление позволяет создавать микрошероховатость с размером неровностей от 0,5 до 2 мкм [9, 14]. Такая топография характеризуется высокой площадью контакта и способствует механическому зацеплению формирующейся костной ткани. Пассивированный оксидный слой TiO₂ является химически инертным и биосовместимым, а его модификация (например, фторирование) позволяет повысить гидрофильность поверхности, что ускоряет первичную адгезию белков и клеток [13].

Многочисленные исследования подтверждают, что микропористая поверхность, полученная химическим травлением, значительно улучшает клеточный ответ:

- Протравленные поверхности демонстрируют *in vitro* лучшую адгезию и пролиферацию остеобластоподобных клеток по сравнению с гладкими или только пескоструйными поверхностями [10, 13]. Исследования показывают увеличение скорости пролиферации клеток на 20–30% на таких поверхностях [11].
- Гистологические исследования на животных моделях свидетельствуют о более быстром и плотном костном контакте (Bone-to-Implant Contact, BIC) с протравленной поверхностью. Например, в работе [10] было зафиксировано увеличение BIC на 25–40% по сравнению с непротравленными контрольными образцами.

Клиническая эффективность химически модифицированных поверхностей подтверждена долгосрочными наблюдениями:

- **Выживаемость.** Систематические обзоры и мета-анализы показывают, что имплантаты с современными протравленными поверхностями (такими как SLA или SLActive) демонстрируют уровень выживаемости более 98% в течение 5–10 лет [6, 15].
- **Стабильность костной ткани.** Наблюдается статистически значимое снижение маргинальной резорбции кости вокруг имплантатов с протравленной поверхностью по сравнению с имплантатами первого поколения с гладкой поверхностью [6, 16].
- **Сроки остеоинтеграции.** Гидрофильные протравленные поверхности (например, SLActive) позволяют сократить сроки заживления и успешно применяются в протоколах немедленной и ранней нагрузки, что подтверждается высокой первичной стабильностью и отсутствием повышенного риска отторжения [6, 16].

Пассивация является критически важным этапом, значительно повышающим долговечность имплантата. Исследования коррозионного поведения демонстрируют, что пассивированный слой TiO₂ снижает скорость

коррозии в моделируемой биологической среде на несколько порядков [17, 18]. Это минимизирует риск высвобождения ионов металла в окружающие ткани, предотвращая развитие неблагоприятных иммунных реакций и перимплантита [17, 19].

Таким образом, метод химического травления и пассивации, благодаря своей отработанности, воспроизводимости и доказанной клинической эффективности, остается «золотым стандартом» в формировании поверхности дентальных имплантатов, особенно в сочетании с другими методами, такими как пескоструйная обработка, для создания комбинированной микро- и макротекстуры.

Анодирование

Анодирование (анодное окисление) представляет собой электрохимический метод модификации поверхности, позволяющий создавать плотные, адгезивные и наноструктурированные оксидные пленки на титане и его сплавах. Данный метод обеспечивает точный контроль над топографией и химическим составом поверхности, что делает его высокоэффективным для улучшения остеоинтеграции [20, 21].

В процессе анодирования титановый имплантат, выступающий в роли анода, погружается в кислотный электролит (например, серную, фосфорную, уксусную кислоту). При подаче напряжения происходит электрохимическое окисление, в результате которого на поверхности формируется слой TiO_2 . Ключевыми контролируемыми параметрами являются напряжение, состав электролита, температура и время обработки, которые напрямую определяют морфологию, толщину и кристаллическую структуру получаемого оксидного слоя [20, 22]. Высокие напряжения (порядка 200–350 В) используются в методе плазменного электролитического оксидирования (РЕО) для создания толстых, пористых и обогащенных биоактивными элементами покрытий [23].

Анодирование позволяет создавать поверхности с широким спектром топографии — от гладких до высокопористых и наноструктурированных. Метод позволяет формировать упорядоченные нанопоры и нанотрубки диаметром от 20 до 100 нм, что эффективно имитирует нанометрический рельеф естественной костной ткани [24, 25]. Помимо TiO_2 , в оксидный слой можно вводить биоактивные ионы (кальция, фосфора, стронция) путем использования насыщенных электролитов, что значительно повышает остеоиндуктивный потенциал поверхности [26]. Анодированные поверхности, особенно сразу после обработки, демонстрируют высокую гидрофильность, что способствует быстрому смачиванию и адсорбции белков из крови [27].

Модифицированные анодированием поверхности показывают превосходные результаты в доклинических исследованиях:

- Исследования *in vitro* демонстрируют, что нанотрубчатые и пористые поверхности, полученные анодированием, значительно усиливают адгезию, пролиферацию и остеогенную дифференцировку мезенхимальных стромальных клеток и остеобластов по сравнению с механически обработанными поверхностями [24, 28]. Работа N. Ohtsu и соавт. (2019)

подтверждает, что именно нанотекстура, а не только химия поверхности, является преобладающим фактором, усиливающим клеточный ответ [27].

- Гистоморфометрические анализы на животных моделях показывают значительное увеличение показателя костно-имплантатного контакта и прочности сцепления с костью у анодированных имплантатов. Например, в исследовании X. Li и соавт. (2016) на модифицированном $\text{Ti}_{24}\text{Nb}_4\text{Zr}_{7,9}\text{Sn}$ сплаве было зафиксировано увеличение BIC на 30% и прочности вырыва на 40% по сравнению с нетронутой поверхностью сплава [25].

Хотя долгосрочных масштабных РКИ конкретно для анодированных поверхностей меньше, чем для классических протравленных, имеющиеся клинические данные обнадеживают:

- **Выживаемость.** Имплантаты с поверхностью, полученной методом микро-арк оксидирования (МАО) или РЕО, демонстрируют высокие показатели кратко- и среднесрочной выживаемости, сопоставимые с другими современными поверхностями [21].
 - **Стабильность.** Анодированные барьерные мембраны, используемые для направленной костной регенерации, показали отличную биосовместимость и эффективность в поддержании пространства для регенерации, способствуя формированию зрелой костной ткани [29].
 - **Гибридные подходы.** Комбинирование анодирования с предварительной пескоструйной обработкой и травлением (технология SAO — Sandblasted, Acid-etched, Anodized) демонстрирует синергетический эффект, обеспечивая как макро- и микро-, так и наношероховатость. Имплантаты с SAO-поверхностью показывают превосходную стабильность и быстрое заживление в клинических условиях [28].
- Плотный, однородный оксидный слой, формируемый при анодировании, служит высокоэффективным барьером, коренным образом повышая коррозионную стойкость титана в агрессивной среде организма [17, 18]. Это свойство является ключевым для долговечности имплантата и минимизации риска неблагоприятных реакций, связанных с выделением ионов [19].

Таким образом, анодирование является высокоперспективным методом, который позволяет не просто пассивировать поверхность, а целенаправленно создавать биоактивные наноструктурированные покрытия с улучшенными остеоинтегративными свойствами. Его потенциал особенно раскрывается при создании гибридных поверхностей и имплантатов для сложных клинических случаев.

Плазменное напыление

Плазменное напыление — это высокоэнергетический метод нанесения толстых (50–200 мкм) покрытий, широко используемый для создания биоактивных поверхностей на дентальных имплантатах. Основное его применение — нанесение гидроксипатита (ГАП) и других фосфатов кальция, которые обладают остеокондуктивными свойствами и напрямую связываются с костной тканью [23, 30].

В процессе напыления инертный газ (аргон, гелий) пропускается через электрическую дугу, генерируя высокотемпературную плазму (до 15 000°C). Порошковый материал (например, гидроксиапатит) вводится в плазменную струю, где частицы плавятся и с высокой скоростью выбрасываются на поверхность титанового имплантата, формируя плотно сцепленное покрытие [31, 32]. К современным тенденциям относится создание легированных покрытий, где в состав ГАП вводятся ионы цинка, стронция, магния или фтора для придания дополнительных свойств: антимикробных, остеоиндуктивных или усиливающих устойчивость к рассасыванию [33, 34].

Плазменное напыление создает шероховатую поверхность с макро- и микропористостью, что обеспечивает отличную механическую интерлокируемость с формирующейся костью [30, 35]. Однако контроль нанорельефа данным методом ограничен. Покрытие состоит преимущественно из гидроксиапатита, химически близкого к минеральной фазе кости. Ключевая проблема — контроль кристалличности и чистоты фазы. Высокие температуры плазмы могут приводить к разложению ГАП на менее стабильные фазы (например, α - и β -трикальцийфосфат, оксид кальция), что ухудшает стабильность покрытия *in vivo* [36, 37].

Легирование ионами, такими как цинк или стронций, значительно повышает биоактивность покрытий, стимулируя остеогенную дифференцировку клеток и угнетая остеокластическую резорбцию [33, 34].

Биологические эффекты:

- Покрытия из ГАП демонстрируют превосходную способность поддерживать адгезию и пролиферацию остеобластов. Исследования *in vitro* подтверждают, что легированные покрытия (например, с цинком) дополнительно подавляют рост патогенных бактерий, таких как *S. aureus*, без цитотоксического эффекта на остеобласты [33].
- Многочисленные исследования на животных моделях показывают ускоренную остеоинтеграцию и более высокие значения прочности сцепления с костью у имплантатов с ГАП-покрытием по сравнению с чистым титаном. Исследование Zhong и соавт. продемонстрировало, что комбинация плазменного напыления с наногидроксиапатитом приводит к значительному увеличению костно-имплантатного контакта и прочности на вырыв у кроликов. Работа Н.Н. Ноу и соавт. (2023) показала, что пористые покрытия, легированные Zn, Sr и Mg, индуцируют более активное новообразование кости *in vivo* [34].

Клинический опыт применения плазменно-напыленных покрытий обширен, но неоднозначен:

- **Выживаемость.** Систематический обзор В.А. van Oirschot и соавт. (2016) указывает, что имплантаты с ГАП-покрытием демонстрируют высокую выживаемость (>95%) в краткосрочной и среднесрочной перспективе (5–10 лет). Однако в долгосрочной перспективе (>10 лет) некоторые исследования фиксируют повышенный риск отказа по сравнению с современными макропористыми титановыми поверхностями, что связывают с возможным расслоением и деградацией покрытия [38].

- **Стабильность.** Основным ограничением метода является долговечность адгезии покрытия к титановой подложке и его стабильность *in vivo*. Со временем может происходить расслоение покрытия, его растворение и фрагментация, что в редких случаях может провоцировать воспалительную реакцию [19, 39].

- **Применение.** Несмотря на риски, ГАП-покрытия остаются ценным решением для специфических клинических сценариев, таких как операции у пациентов с остеопорозом или в случаях, требующих максимально быстрой остеоинтеграции, где их остеоиндуктивные свойства раскрываются в полной мере [8, 23].

Плазменно-напыленное ГАП-покрытие служит эффективным барьером, изолирующим титановую основу от физиологического раствора. Исследования коррозии, такие как работа Н.А. Nameed и соавт. (2021), подтверждают, что такие покрытия значительно снижают плотность пассивационного тока и повышают коррозионную стойкость системы «титан—покрытие» по сравнению с непокрытым титаном [18].

Таким образом, плазменное напыление является мощным инструментом для создания высокобиоактивных покрытий, однако его успех в долгосрочной перспективе критически зависит от контроля качества покрытия, его кристалличности и адгезии. Современные разработки в области легированных и наноструктурированных покрытий направлены на преодоление этих ограничений.

Нанотехнологии

Нанотехнологии в контексте модификации поверхности дентальных имплантатов представляют собой передовое направление, нацеленное на создание наноструктурированных поверхностей, которые максимально точно имитируют естественную внеклеточную матрицу костной ткани. Этот подход позволяет управлять биологическими реакциями на молекулярном и клеточном уровнях, выходя за рамки простого улучшения механической фиксации [3, 40, 41].

Сущность метода заключается в целенаправленном создании структур с размерами элементов менее 100 нм на поверхности имплантата. Для этого используется широкий спектр технологических подходов:

- Физические методы включают лазерную абляцию и ионно-плазменное напыление для формирования нанорельефа [42].
- Химические методы, такие как наноструктурирование с помощью анодирования (создание нанотрубок TiO_2), химическое травление и золь-гель процессы для нанесения тонких пленок [24, 41].
- Функционализация поверхности — ковалентное присоединение биоактивных молекул (пептидов, факторов роста) к наноструктурированной поверхности для придания ей остеоиндуктивных свойств [43].
- Интеллектуальные покрытия — разработка нанопористых резервуаров или нанокапсул для контролируемого высвобождения терапевтических агентов

(антибиотиков, остеогенных препаратов) непосредственно в зоне имплантации [4, 44].

Нанотехнологии позволяют создавать поверхности с контролируемой наношероховатостью, нанопорами, наностолбиками и нановолокнами. Такая топография не только увеличивает удельную площадь поверхности, но и обеспечивает оптимальный топографический сигнал для клеток [3, 45]. Методы, такие как анодное оксидирование, позволяют одновременно формировать нанотопографию и модифицировать химический состав оксидного слоя, повышая его биоактивность и гидрофильность, что критически важно для первичной адсорбции белков [27, 41]. Наноинженерия позволяет создавать многофункциональные поверхности, сочетающие, например, остеоинтегративный потенциал с антимикробной активностью за счет включения наночастиц серебра или оксида цинка [3, 44].

Наноструктурированные поверхности демонстрируют превосходство в доклинических исследованиях:

- Многочисленные работы *in vitro* подтверждают, что нанотопография значительно усиливает адгезию, распластывание, пролиферацию и остеогенную дифференцировку мезенхимальных стромальных клеток по сравнению с микроструктурированными поверхностями. Исследование N.L. Bergholt и соавт. (2018) показывает, что именно нанотопография, а не только химия поверхности, является доминирующим фактором, направляющим клеточное поведение [45].
- Эксперименты на животных моделях показывают ускоренную остеоинтеграцию и более высокие значения прочности костно-имплантационного соединения у наномодифицированных имплантатов. Концепция «местной терапии» реализуется за счет имплантатов с нанопокрывтиями, высвобождающими остеогенные препараты, что приводит к усиленному образованию кости вокруг имплантата в экспериментальных условиях [44].

Несмотря на обширные доклинические данные, этап клинического перевода нанотехнологий находится в активной фазе. Первые коммерчески доступные имплантаты с наномодифицированной поверхностью (например, с детерминированной нанотекстурой, нанесенной методом окисления) уже представлены на рынке. Ретроспективные клинические исследования и ранние РКИ показывают их высокую краткосрочную выживаемость, сопоставимую или превосходящую таковую у лучших микроструктурированных аналогов [43].

Ключевым вопросом, требующим долгосрочных исследований, является биобезопасность и судьба наночастиц или продуктов деградации наноструктур *in vivo*. Хотя современные методы направлены на создание прочно связанных наноструктур, риски долгосрочного высвобождения частиц и их потенциальное провоспалительное действие остаются предметом пристального изучения [41, 46].

Концепция «fit and forget» («установил и забыл») предполагает создание умных имплантатов, которые не только интегрируются, но и активно мониторят состояние окружающих тканей и высвобождают

терапевтические агенты по мере необходимости, что является основной целью современных исследований [43]. Плотные, однородные нанопокрывтия, такие как упорядоченные нанотрубки TiO_2 , формируемые анодированием, служат исключительно эффективным барьером против коррозии. Исследования демонстрируют, что такие наноинженерные поверхности значительно повышают коррозионную стойкость титана, снижая риск выделения ионов и повышая долговечность имплантата [17, 44].

Таким образом, нанотехнологии открывают путь к созданию имплантатов следующего поколения с программируемыми биологическими откликами и терапевтическими функциями. Несмотря на существующие вызовы, связанные с стандартизацией и долгосрочной безопасностью, это направление обладает наибольшим потенциалом для революционных изменений в дентальной имплантологии.

Лазерная обработка поверхности имплантата

Лазерная обработка представляет собой высокоточную и универсальную технологию модификации поверхности, которая позволяет создавать заданные топографии на имплантатах без физического контакта и риска внесения загрязнений. Этот метод обеспечивает уникальный контроль над микро- и нанорельефом поверхности, что делает его перспективным для создания имплантатов с улучшенными остеоинтегративными и антимикробными свойствами [42, 47].

В основе метода лежит воздействие сфокусированного лазерного луча на поверхность имплантата, приводящее к локальному плавлению, испарению или перестройке материала. Ключевыми преимуществами являются гибкость и программируемость процесса. Выделяют несколько основных видов лазерной обработки:

- лазерное текстурирование (Laser Surface Texturing) — создание регулярных микро- и наноструктур (пор, канавок, кратеров) для управления смачиваемостью и клеточным ответом [42];
- лазерное легирование (Laser Surface Alloying) — введение в поверхностный слой имплантата антимикробных элементов (например, серебра или меди) для придания бактериостатических свойств [47];
- лазерная полировка — сглаживание поверхности для снижения адгезии бактерий и облегчения гигиены [48].
- селективное лазерное плавление (SLM) — использование лазера для аддитивного производства имплантатов со сложной пористой архитектурой, имитирующей трабекулярную кость [49].

Лазерная обработка позволяет с высокой точностью создавать детерминированные микро- и нанорельефы, которые невозможно получить традиционными методами. Это включает в себя формирование периодических канавок для направленной ориентации клеток или сложных трехмерных пор для улучшения остеоинтеграции [42, 50]. Поскольку процесс происходит в контролируемой атмосфере, он исключает риск перекрестного загрязнения, характерный для абразивных методов. Одновременно лазерное легирование позволяет локально изменять химический состав поверхностного слоя [47].

Путем изменения параметров лазера можно получать как супергидрофильные, так и супергидрофобные поверхности, что позволяет управлять скоростью и качеством первичной адсорбции белков [50].

Биологические эффекты:

- Исследования *in vitro* демонстрируют, что лазерно-текстурированные поверхности способствуют лучшей адгезии и распространению остеобластов по сравнению с механически обработанными поверхностями. Регулярные микроструктуры, созданные лазером, могут направлять рост клеток, что потенциально ускоряет формирование организованной костной ткани [47].
- Гистологические исследования на животных моделях подтверждают, что лазерная модификация поверхности приводит к увеличению показателя ВИС и прочности сцепления с костью. Кроме того, доказана эффективность лазеров (например, диодных) в хирургическом лечении периимплантита и последующим повторном остеointegrировании (реостеоинтеграции) имплантатов [48, 51].

Клиническое применение лазерной обработки разбивается в двух основных направлениях: модификация имплантатов и сопровождение их установки и лечения.

Сравнительное клиническое исследование S. Hegazy и соавт. (2016) показало, что ранненагружаемые имплантаты с лазерно-модифицированной поверхностью демонстрируют сопоставимую, а по некоторым параметрам (стабильность уровня кости) даже лучшую клиническую эффективность, чем имплантаты

с наномодифицированной поверхностью [52]. Лазеры успешно используются для проведения вестибулопластики в периимплантатной зоне, обеспечивая минимальную инвазивность, бескровность и снижение послеоперационного дискомфорта [51]. Систематический обзор S. Patil и соавт. (2023) подтверждает, что применение лазерной дезинфекции (например, с использованием диодного или Er:YAG-лазера) является эффективным адъювантным методом при лечении периимплантита, способствуя дезинтеграции бактериальной биопленки и созданию условий для реостеоинтеграции [48]. Лазерная обработка, особенно полировка и легирование, способствует формированию однородного и плотного оксидного слоя, свободного от примесей и дефектов. Это значительно повышает коррозионную стойкость титана в биологической среде, обеспечивая долговечность имплантата [17].

Таким образом, лазерная обработка является мощным и многофункциональным инструментом в арсенале современной имплантологии. Она позволяет не только создавать имплантаты с превосходными функциональными поверхностями, но и используется как терапевтический инструмент для обеспечения их долгосрочного успеха, что соответствует принципам персонализированной и минимально инвазивной медицины.

ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенный анализ позволил не просто перечислить методы модификации поверхности, но и провести их углубленное сравнение, выявив четкие корреляции

Сравнение методов модификации поверхности имплантатов

Comparison of surface modification techniques for dental implants

Метод	Параметры поверхности	Уровень доказательности	Рекомендуемые клинические сценарии	Ограничения
Химическая обработка и пассивация	Микрошероховатость 0,5–2 мкм, гидрофильность после активации, тонкий оксидный слой TiO ₂ [11, 13, 22]	Высокий — подтверждено 5–10 летними исследованиями [6, 19, 53]	Стандартные случаи, протоколы немедленной/ранней нагрузки (гидрофильные поверхности), пациенты с риском коррозии [6, 53]	Ограниченная способность создания наноструктур. Эффективность может быть недостаточной в сложных случаях (остеопороз)
Анодирование	Нанопоры/нанотрубки 20–100 нм, толстый оксидный слой, возможность легирования Ca, P, Sr, Zn [20, 24, 26]	Средний для нанотрубок и легированных покрытий. Высокий для микропористых поверхностей [21, 28]	Случаи, требующие ускоренной остеointegrации; имплантаты в эстетической зоне (контроль цвета); направленная костная регенерация (мембраны) [29]	Высокая стоимость, сложность стандартизации для наноструктур, риск хрупкости толстых покрытий
Плазменное напыление	Толстые покрытия 50–200 мкм, макро- и микропористость, состав — ГАП, легированный Zn, Sr ГАП [8, 30, 33]	Высокий (краткосрочная). Средний/низкий (долгосрочная) >10 лет из-за риска деградации [38]	Пациенты с остеопорозом, сложные случаи, требующие максимальной биоактивности [30, 35]	Риск расслоения и деградации покрытия <i>in vivo</i> . Потенциальное провоспалительное действие частиц [46, 54]
Нанотехнологии	Детерминированная шероховатость <100 нм, высокая удельная площадь поверхности, функционализация биоактивными молекулами [3, 40, 41]	Средний — данные ограничены ретроспективными исследованиями и ранними РКИ [41]	Персонализированные имплантаты, высокие эстетические требования, пациенты с сопутствующими заболеваниями	Высокая стоимость, недостаток долгосрочных данных о безопасности [46]
Лазерная обработка	Программируемый микро- и нанорельеф, высокая чистота поверхности, местное легирование (напр., Ag) [42, 47]	Средний — подтверждена эффективность в раннем заживлении и при реостеоинтеграции [48, 52]	Сложные макродизайны (аддитивное производство), зоны с высоким риском периимплантита, персонализированные имплантаты [49]	Высокая стоимость оборудования, низкая скорость обработки больших поверхностей

между технологией, получаемыми свойствами поверхности и клиническими исходами (см. таблицу).

Ключевым выводом является необходимость дифференцированного подхода к выбору метода модификации поверхности в зависимости от клинической задачи. Так, химическое травление и анодирование формируют поверхность с превосходной остеоинтеграцией, подтвержденной многочисленными долгосрочными исследованиями, что делает их «золотым стандартом» для большинства клинических случаев, включая протоколы немедленной нагрузки [6, 19, 53]. В то же время, плазменное напыление гидроксиапатита, несмотря на риски долгосрочной деградации покрытия [46, 54], остается незаменимым инструментом в случаях, требующих максимальной биоактивности, например, у пациентов с остеопорозом [30, 35].

Наиболее перспективные, но и наименее изученные в долгосрочной перспективе методы — лазерная обработка и нанотехнологии. Они позволяют перейти от пассивной остеоинтеграции к активному управлению биологическим ответом. Лазерная обработка открывает возможности для создания персонализированных имплантатов со сложной архитектурой и встроенной антимикробной защитой [47, 49]. Нанотехнологии же приближают нас к реализации концепции «интеллектуального» имплантата, способного к контролируемой доставке лекарственных средств [43, 44].

Несмотря на значительный прогресс, систематизация данных выявила и существенные пробелы. Главным из них остается недостаток долгосрочных (более 10 лет) рандомизированных клинических исследований для большинства передовых методов, особенно нанотехнологий и сложных гибридных поверхностей. Это не позволяет в полной мере оценить риски, такие как долгосрочная стабильность нанопокровов, их биобезопасность и потенциальное провоспалительное действие продуктов деградации [46]. Кроме того, отсутствие единых международных стандартов для оценки и воспроизводимости многих методов, особенно анодирования и лазерной текстуризации, затрудняет их прямое сравнение и широкое внедрение.

Таким образом, будущее направление развития лежит не в противопоставлении методов, а в их разумной интеграции (комбинированные поверхности) и переходе

к созданию персонализированных и «интеллектуальных» имплантатов. Для этого необходима консолидация усилий материаловедов, клиницистов и регуляторных органов для организации масштабных долгосрочных исследований и разработки четких стандартов качества.

ВЫВОДЫ

Проведенный анализ позволяет заключить, что формирование поверхности дентальных имплантатов эволюционировало от простого увеличения шероховатости к целенаправленному созданию сложных микро- и наноструктур, управляющих биологическими процессами остеоинтеграции. Современные методы модификации демонстрируют различный потенциал и уровень клинической подтвержденности, что диктует необходимость дифференцированного подхода к их применению. Химическое травление и анодирование, обладая устойчивыми данными долгосрочных исследований, остаются фундаментом современной имплантологии, обеспечивая предсказуемо высокие результаты в большинстве клинических ситуаций. В то же время, плазменное напыление гидроксиапатита, несмотря на определенные риски долгосрочной стабильности, сохраняет свою нишу для решения специфических задач, таких как остеопороз и сложные костные дефекты.

Наиболее перспективные направления связаны с лазерной обработкой и нанотехнологиями, которые открывают путь к созданию персонализированных и многофункциональных имплантатов. Однако их широкое внедрение в клиническую практику сдерживается недостатком долгосрочных исследований безопасности и эффективности.

Таким образом, будущее развития поверхностей имплантатов лежит не в поиске единственного универсального метода, а в стратегической комбинации технологий для создания интеллектуальных поверхностей, адаптирующихся к конкретным условиям организма пациента, чему должна способствовать разработка международных стандартов и проведение масштабных рандомизированных исследований.

Поступила/Received: 29.08.2025

Принята в печать/Accepted: 23.06.2026

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES:

1. Салеев Р.А., Гришин П.О., Салеева Г.Т., Калинин Е.А., Мубарак Л.Н. Факторы, влияющие на долговременный успех проведения дентальной имплантации. — *Проблемы стоматологии*. — 2021; 1: 91—98. [eLibrary ID: 45699803](#)
[Saleev R., Grishin P., Saleeva G., Kalinnikova E., Mubarakova L. Factors influencing the long-term success of dental implantation. — *Actual Problems in Dentistry*. — 2021; 1: 91—98 (In Russian)]. [DOI: 10.18481/2077-7566-20-17-1-91-98](#)
2. Мельников Ю.А., Жолудев С.Е., Владимиров Е.В., Заикин Д.А. Прецизионность изготовления провизорной коронки с помощью технологии 3d-печати. Немедленная временная реставрация после дентальной имплантации. — *Проблемы стоматологии*. — 2020; 4: 109—114. [eLibrary ID: 44667786](#)

[Melnikov Y., Zholudev S., Vladimirova E., Zaikin D. Precision of production crown manufacturing using 3d-printing technology. Immediate temporary restoration after dental implantation. — *Actual Problems in Dentistry*. — 2020; 4: 109—114 (In Russian)]. [DOI: 10.18481/2077-7566-20-16-4-109-114](#)

3. Мирсаева Ф.З., Ханов Т.В., Байкова А.Ю. Ближайшие и отдаленные результаты хирургического лечения больных хроническим генерализованным пародонтитом, ассоциированным грибами рода *Candida*. — *Проблемы стоматологии*. — 2022; 2: 131—138. [eLibrary ID: 49318686](#)
[Mirsaeva F., Hanov T., Baykova A. Surgical treatment of patients with chronic generalized periodontitis associated with *Candida*

- fungi. — *Actual Problems in Dentistry*. — 2022; 2: 131—138 (In Russian). DOI: [10.18481/2077-7566-2022-18-2-131-138](https://doi.org/10.18481/2077-7566-2022-18-2-131-138)
4. Чельшев Ю.А., Гришин П.О., Савранский Ф.З., Гафуров М.Р., Калинин Е.А., Чигарина С.Е. Изучение методом электронного парамагнитного резонанса влияния физико-химических и структурных характеристик костной ткани на процессы остеоинтеграции дентальных имплантатов с различной микроструктурой поверхности. — *Проблемы стоматологии*. — 2020; 4: 122—129. eLibrary ID: [44667788](https://elibrary.ru/44667788) [Chelyshev Y., Grishin P., Savranskiy F., Gafurov M., Kalinnikova E., Chigarina S. Study by the method of electronic paramagnetic resonance of the influence of physics-chemical and structural characteristics of bone tissue on the processes of osseointegration of dental implants with different microstructure of the surface. — *Actual Problems in Dentistry*. — 2020; 4: 122—129 (In Russian)]. DOI: [10.18481/2077-7566-20-16-4-122-129](https://doi.org/10.18481/2077-7566-20-16-4-122-129)
5. Тарасенко С.В., Калинин С.А., Абросимов Д.С. Вестибулопластика со свободным десневым трансплантатом в области дентальных имплантатов с применением лазерных технологий. — *Проблемы стоматологии*. — 2024; 4: 144—149. eLibrary ID: [80315649](https://elibrary.ru/80315649) [Tarasenko S., Kalinin S., Abrosimov D. Vestibuloplasty with free gingival graft in the area of dental implants using laser technologies. — *Actual Problems in Dentistry*. — 2024; 4: 144—149 (In Russian)]. DOI: [10.18481/2077-7566-2024-20-4-144-149](https://doi.org/10.18481/2077-7566-2024-20-4-144-149)
6. Smeets R., Stadlinger B., Schwarz F., Beck-Broichsitter B., Jung O., Precht C., Kloss F., Gröbe A., Heiland M., Ebker T. Impact of dental implant surface modifications on osseointegration. — *Biomed Res Int*. — 2016; 2016: 6285620. PMID: [27478833](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27478833/)
7. Седов Ю.Г., Аванесов А.М., Салеев Р.А., Салеева Г.Т., Ярулина З.И. Классификация вариантов применения хирургических направляющих шаблонов для дентальной имплантации. — *Стоматология*. — 2021; 1: 84—88. eLibrary ID: [44618892](https://elibrary.ru/44618892) [Sedov Yu.G., Avanesov A.M., Saleev R.A., Saleeva G.T., Yarulina Z.I. A classification of surgical guides application for dental implantation. — *Stomatology*. — 2021; 1: 84—88 (In Russian)]. DOI: [10.17116/stomat202110001184](https://doi.org/10.17116/stomat202110001184)
8. Мураев А.А., Мурзабеков А.И., Орлов Е.А., Тарасов Ю.В. Плазменное электролитическое оксидирование для формирования поверхности дентальных имплантатов. — *Гены и Клетки*. — 2022; 3: 156—157. [Muraev A.A., Murzabekov A.I., Orlov E.A., Tarasov Y.V. Plasma-assisted electrolytic oxidation for surface modification of dental implants. — *Genes and Cells*. — 2022; 3: 156—157 (In Russian)]. eLibrary ID: [49902644](https://elibrary.ru/49902644)
9. Jemat A., Ghazali M.J., Razali M., Otsuka Y. Surface modifications and their effects on titanium dental implants. — *Biomed Res Int*. — 2015; 2015: 791725. PMID: [26436097](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26436097/)
10. Сманалиев М.Д., Юлдашев И.М. Возможности покрытия поверхности дентальных титановых имплантатов nano частицами из nano раствора серебра. — *Бюллетень науки и практики*. — 2021; 9: 308—314. eLibrary ID: [46616859](https://elibrary.ru/46616859) [Smanaliev M., Yuldashev I. Possibilities of dental titanium implants surface coating with nano particles from nano silver solution. — *Bulletin of Science and Practice*. — 2021; 9: 308—314 (In Russian)]. DOI: [10.33619/2414-2948/70/26](https://doi.org/10.33619/2414-2948/70/26)
11. Menhall A., Lahoud P., Yang K.R., Park K.B., Razukevicius D., Traini T., Makary C. The mineral apposition rate on implants with either a sand-blasted acid-etched implant surface (SLA) or a nanostructured calcium-incorporated surface (XPEED®): A histological split-mouth, randomized case/control human study. — *Materials (Basel)*. — 2024; 17 (13): 3341. PMID: [38998421](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38998421/)
12. Liu Y., Rath B., Tingart M., Eschweiler J. Role of implants surface modification in osseointegration: A systematic review. — *J Biomed Mater Res A*. — 2020; 108 (3): 470—484. PMID: [31664764](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31664764/)
13. Xu Y., et al. iTRAQ-based proteomic analysis reveals potential osteogenesis-promoted role of ATM in strontium-incorporated titanium implant. — *J Biomed Mater Res A*. — 2022; 110 (4): 964—975. PMID: [34897987](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34897987/)
14. Li N., Shang Z., Zhao Y., Wang H., Min Q. Optimization of surface roughness for titanium alloy based on multi-strategy fusion snake algorithm. — *PLoS One*. — 2025; 20 (1): e0310365. PMID: [39820785](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39820785/)
15. Pandey C., Rokaya D., Bhattarai B.P. Contemporary concepts in osseointegration of dental implants: A review. — *Biomed Res Int*. — 2022; 2022: 6170452. PMID: [35747499](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35747499/)
16. Marković A., Đinić A., Calvo Guirado J.L., Tahmaseb A., Šćepanović M., Janjić B. Randomized clinical study of the peri-implant healing to hydrophilic and hydrophobic implant surfaces in patients receiving anticoagulants. — *Clin Oral Implants Res*. — 2017; 28 (10): 1241—1247. PMID: [27539149](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27539149/)
17. Mombelli A., Hashim D., Cionca N. What is the impact of titanium particles and biocorrosion on implant survival and complications? A critical review. — *Clin Oral Implants Res*. — 2018; 29 Suppl 18: 37—53. PMID: [30306693](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30306693/)
18. Hameed H.A., Hasan H.A., Alam M.K. Evaluation of corrosion behavior by measuring passivation current density of dental implant coated with bioceramic materials. — *Biomed Res Int*. — 2021; 2021: 9934073. PMID: [34222489](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34222489/)
19. Messous R., Henriques B., Bousbaa H., Silva F.S., Teughels W., Souza J.C.M. Cytotoxic effects of submicron- and nano-scale titanium debris released from dental implants: an integrative review. — *Clin Oral Investig*. — 2021; 25 (4): 1627—1640. PMID: [33616805](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33616805/)
20. Pou P., Riveiro A., del Val J., Comesaña R., Penide J., Arias-González F., Soto R., Lusquiños F., Pou J. Laser surface texturing of titanium for bioengineering applications. — *Procedia Manufacturing*. — 2017; 13: 694—701. DOI: [10.1016/j.promfg.2017.09.102](https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.09.102)
21. Mishra S.K., Kumar M.A., Chowdhary R. Anodized dental implant surface. — *Indian J Dent Res*. — 2017; 28 (1): 76—99. PMID: [28393822](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28393822/)
22. Blanco A.F., Crecente-Campo J., Alonso M.J. Functionalization of implantable systems for controlled drug delivery and beyond. — *Regenerative Engineering and Translational Medicine*. — 2025; 11: 831—848. DOI: [10.1007/s40883-025-00401-4](https://doi.org/10.1007/s40883-025-00401-4)
23. Мураев А.А., Мурзабеков А.И., Иванов С.Ю., Тарасов Ю.В., Орлов Е.А., Долгалева А.А. Модификация поверхности дентальных имплантатов с помощью плазменного электролитического оксидирования. — *Современные технологии в медицине*. — 2023; 3: 18—25. eLibrary ID: [54092419](https://elibrary.ru/54092419) [Muraev A.A., Murzabekov A.I., Ivanov S.Yu., Tarasov Yu.V., Orlov E.A., Dolgaleva A.A. Plasma electrolytic oxidation for dental implant surface treatment. — *Modern Technologies in Medicine*. — 2023; 3: 18—25 (In Russian)]. DOI: [10.17691/stm2023.15.3.02](https://doi.org/10.17691/stm2023.15.3.02)
24. Cheng A., Schwartz Z., Kahn A., Li X., Shao Z., Sun M., Ao Y., Boyan B.D., Chen H. Advances in porous scaffold design for bone and cartilage tissue engineering and regeneration. — *Tissue Eng Part B Rev*. — 2019; 25 (1): 14—29. PMID: [30079807](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30079807/)
25. Li X., Chen T., Hu J., Li S., Zou Q., Li Y., Jiang N., Li H., Li J. Modified surface morphology of a novel Ti-24Nb-4Zr-7.9Sn titanium alloy via anodic oxidation for enhanced interfacial biocompatibility and osseointegration. — *Colloids Surf B Biointerfaces*. — 2016; 144: 265—275. PMID: [27100853](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27100853/)
26. Graziani G., Bianchi M., Sassoni E., Russo A., Maricci M. Ion-substituted calcium phosphate coatings deposited by plasma-assisted techniques: A review. — *Mater Sci Eng C Mater Biol Appl*. — 2017; 74: 219—229. PMID: [28254288](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28254288/)
27. Ohtsu N., Kuji T., Hirano M., Yamasaki K. Predominant surface property of an anodized titanium that enhances the cell response. — *Biointerphases*. — 2019; 14 (4): 041002. PMID: [31357867](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31357867/)
28. Kim M.H., Park K., Choi K.H., Kim S.H., Kim S.E., Jeong C.M., Huh J.B. Cell adhesion and in vivo osseointegration of sandblasted/acid etched/anodized dental implants. — *Int J Mol Sci*. — 2015; 16 (5): 10324—36. PMID: [25955650](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25955650/)
29. An H.W., Lee J., Park J.W. Surface characteristics and in vitro biocompatibility of surface-modified titanium foils as a regenerative barrier membrane for guided bone regeneration. — *J Biomater Appl*. — 2023; 37 (7): 1228—1242. PMID: [36205350](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36205350/)
30. Телегин С.В., Лясников В.Н., Гоц И.Ю. Морфология поверхности титана, модифицированной импульсной лазерной обработкой. — *Вестник Саратовского государственного технического университета*. — 2015; 1 (80): 101—106.

- [Telegin S.V., Lyasnikov V.N., Gots I.Y. Morphology of the titanium surface modified by pulsed laser processing. — *Vestnik of Saratov State Technical University*. — 2015; 1 (80): 101—106 (In Russian)]. [eLibrary ID: 25443461](#)
31. Фурцев Т.В., Зеер Г.М. Сравнительное исследование поверхностей трех типов имплантатов (TiUnite, SLA, RBM) с контрольным образцом, перимплантитом, обработанных лазером Er; Cr; YSGG длиной волны 2780 нм. — *Стоматология*. — 2019; 3: 52—55. [eLibrary ID: 39131032](#)
[Furtsev T.V., Zeer G.M. Comparative research of implants with three types of surface processing (TiUnite, SLA, RBM), control, with periimplantitis and processed by 2780 nm Er; Cr; YSGG laser. — *Stomatology*. — 2019; 3: 52—55 (In Russian)]. [DOI: 10.17116/stomat20199803152](#)
 32. Новиков С.В., Тамазов И.Д., Тополянский П.А., Тополянский А.П. Модификация поверхности титановых дентальных имплантатов и их ортопедических компонентов. — *Медико-фармацевтический журнал Пульс*. — 2023; 9: 78—84.
[Novikov S.V., Tamazov I.D., Topoljanskij P.A., Topoljanskij A.P. Modification of the surface of titanium dental implants and their orthopedic components. — *Medical and pharmaceutical journal Pulse*. — 2023; 9: 78—84 (In Russian)]. [eLibrary ID: 54664134](#)
 33. Bhattacharjee A., Bandyopadhyay A., Bose S. Plasma sprayed fluoride and zinc doped hydroxyapatite coated titanium for load-bearing implants. — *Surf Coat Technol.* — 2022; 440: 128464. [PMID: 36311855](#)
 34. Hou H.H., Lee B.S., Liu Y.C., Wang Y.P., Kuo W.T., Chen I.H., He A.C., Lai C.H., Tung K.L., Chen Y.W. Vapor-induced pore-forming atmospheric-plasma-sprayed zinc-, strontium-, and magnesium-doped hydroxyapatite coatings on titanium implants enhance new bone formation — An in vivo and in vitro investigation. — *Int J Mol Sci.* — 2023; 24 (5): 4933. [PMID: 36902368](#)
 35. Зайнуллина Л.И., Фаррахов Р.Г., Рамазанов И.А., Хаматдинов Р.З., Дюрягин В.С., Парфенов Е.В. Влияние пескоструйной обработки и плазменно-электролитического оксидирования на качество поверхности дентальных имплантатов. — *Современные технологии в медицине*. — 2023; 6: 40—48. [eLibrary ID: 59061291](#)
[Zaynullina L.I., Farrakhov R.G., Ramazanov I.A., Khamatdinov R.Z., Dyuryagin V.S., Parfenov E.V. Impact of sandblasting and plasma electrolytic oxidation on surface quality of dental implants. — *Modern Technologies in Medicine*. — 2023; 6: 40—48 (In Russian)]. [DOI: 10.17691/stm2023.15.6.05](#)
 36. Vahabzadeh S., Roy M., Bandyopadhyay A., Bose S. Phase stability and biological property evaluation of plasma sprayed hydroxyapatite coatings for orthopedic and dental applications. — *Acta Biomater.* — 2015; 17: 47—55. [PMID: 25638672](#)
 37. Ong J.L., Chan D.C.N. A review of hydroxyapatite and its use as a coating in dental implants. — *Crit Rev Biomed Eng.* — 2017; 45 (1—6): 411—451. [PMID: 29953385](#)
 38. van Oirschot B.A., Bronkhorst E.M., van den Beucken J.J., Meijer G.J., Jansen J.A., Junker R. A systematic review on the long-term success of calcium phosphate plasma-spray-coated dental implants. — *Odontology*. — 2016; 104 (3): 347—56. [PMID: 26886570](#)
 39. Купряхин С.В. Тестирование поверхностей дентальных имплантатов различной подготовки на цитотоксичность, на мезенхимальных стромальных клетках. — *Вестник медицинского института «РЕАВИЗ»: реабилитация, врач и здоровье*. — 2019; 1 (37): 103—108.
[Kupryakhin S.V. Testing cytotoxicity of various dental implant surfaces using mesenchymal stromal cells. — *Bulletin of Medical Institute "REAVIZ": Rehabilitation, Doctor and Health*. — 2019; 1 (37): 103—108 (In Russian)]. [eLibrary ID: 37634609](#)
 40. Auciello O., Renou S., Kang K., Tasat D., Olmedo D. A biocompatible ultranano-crystalline diamond (UNCD) coating for a new generation of dental implants. — *Nanomaterials (Basel)*. — 2022; 12 (5): 782. [PMID: 35269268](#)
 41. Gulati K., Zhang Y., Di P., Liu Y., Ivanovski S. Research to clinics: Clinical translation considerations for anodized nano-engineered titanium implants. — *ACS Biomater Sci Eng.* — 2022; 8 (10): 4077—4091. [PMID: 34313123](#)
 42. Иванов С.Ю., Мураев А.А., Гажва Ю.В., Бунёв А.А., Рукина Е.В. Российская система стоматологических имплантатов: опыт 3 летнего клинического использования. — *Российский вестник дентальной имплантологии*. — 2016; 1 (33): 60—66.
[Ivanov S.Yu., Murayev A.A., Gazhva Yu.V., Bunev A.A., Rukina E.V. The russian system of dental implants: three-year experience of clinical use. — *Russian Bulletin of Dental Implantology*. — 2016; 1 (33): 60—66 (In Russian)]. [eLibrary ID: 53830385](#)
 43. Gulati K., Chopra D., Kocak-Oztug N.A., Verron E. Fit and forget: The future of dental implant therapy via nanotechnology. — *Adv Drug Deliv Rev.* — 2023; 199: 114900. [PMID: 37263543](#)
 44. Guo T., Scimeca J.C., Ivanovski S., Verron E., Gulati K. Enhanced corrosion resistance and local therapy from nano-engineered titanium dental implants. — *Pharmaceutics*. — 2023; 15 (2): 315. [PMID: 36839638](#)
 45. Bergholt N.L., Foss M., Saeed A., Gadegaard N., Lysdahl H., Lind M., Foldager C.B. Surface chemistry, substrate, and topography guide the behavior of human articular chondrocytes cultured in vitro. — *J Biomed Mater Res A*. — 2018; 106 (11): 2805—2816. [PMID: 29907992](#)
 46. Kim C., Lee J.W., Heo J.H., Park C., Kim D.H., Yi G.S., Kang H.C., Jung H.S., Shin H., Lee J.H. Natural bone-mimicking nanopore-incorporated hydroxyapatite scaffolds for enhanced bone tissue regeneration. — *Biomater Res.* — 2022; 26 (1): 7. [PMID: 35216625](#)
 47. Hindy A., Farahmand F., Tabatabaei F.S. In vitro biological outcome of laser application for modification or processing of titanium dental implants. — *Lasers Med Sci.* — 2017; 32 (5): 1197—1206. [PMID: 28451816](#)
 48. Patil S., Bhandi S., Alzaharani K.J., Alnfai M.M., Testarelli L., Soffe B.W., Licari F.W., Awan K.H., Tanaka E. Efficacy of laser in re-osseointegration of dental implants — A systematic review. — *Lasers Med Sci.* — 2023; 38 (1): 199. [PMID: 37658921](#)
 49. Onder M.E., Culhaoglu A., Ozgul O., Tekin U., Atıl F., Taze C., Yasa E. Biomimetic dental implant production using selective laser powder bed fusion melting: In-vitro results. — *J Mech Behav Biomed Mater.* — 2024; 151: 106360. [PMID: 38194786](#)
 50. Мураев А.А., Иванов С.Ю., Гажва Ю.В., Мухаметшин Р.Ф., Рябова В.М., Мруз А.Х., Короткова Н.Л. Математическое обоснование и результаты клинического использования коротких имплантатов ИРИС. — *Стоматология*. — 2018; 5: 65—70. [eLibrary ID: 36318507](#)
[Muraev A.A., Ivanov S.Yu., Gazhva Yu.V., Muhametshin R.F., Ryabova V.M., Mrue A.H., Korotkova N.L. Mathematical rationale and results of clinical use of IRIS short implants. — *Stomatology*. — 2018; 5: 65—70 (In Russian)]. [DOI: 10.17116/stomat20189705165](#)
 51. Трунин Д.А., Вырмаскин С.И., Афанасьев В.В. Опыт применения лазеров для вестибулопластики в перимплантатной зоне. — *Медико-фармацевтический журнал Пульс*. — 2021; 6: 87—92. [eLibrary ID: 46113079](#)
[Trunin D.A., Vyrmaskin S.I., Afanasev V.V. Experience of using lasers for vestibuloplasty in pery-implant area. — *Medical and pharmaceutical journal Pulse*. — 2021; 6: 87—92 (In Russian)]. [DOI: 10.26787/nydha-2686-6838-2021-23-6-87-92](#)
 52. Hegazy S., Elmekawy N., Emera R.M. Peri-implant outcomes with laser vs nanosurface treatment of early loaded implant-retaining mandibular overdentures. — *Int J Oral Maxillofac Implants.* — 2016; 31 (2): 424—30. [PMID: 27004289](#)
 53. Salou L., Hoornaert A., Louarn G., Layrolle P. Enhanced osseointegration of titanium implants with nanostructured surfaces: an experimental study in rabbits. — *Acta Biomater.* — 2015; 11: 494—502. [PMID: 25449926](#)
 54. Гришин П.Г., Калинин Е.А., Савранский Ф.З., Чигарина С.Е., Хайкин М.Б. Влияние макро- и микроструктуры поверхности имплантатов на процессы остеоинтеграции и стабилизации. — *Вятский медицинский вестник*. — 2020; 4 (68): 44—48. [eLibrary ID: 44292592](#)
[Grishin P.G., Kalinnikova E.A., Savransky F.Z., Chigarina S.E., Khaykin M.B. The influence of the macro- and microstructure of the implant surface on the processes of osseointegration and stabilization. — *Medical Newsletter of Vyatka*. — 2020; 4 (68): 44—48 (In Russian)]. [DOI: 10.24411/2220-7880-2020-10129](#)