

Переосмысление адгезионных интерфейсов: новый физико-химический подход УФ-фотофункционализации раскрывает адгезионный потенциал титана и цементных материалов.

Кэйдзи Комацу^{a,b}, Тошикацу Судзумура^a, Эри Комацу^a, Таканори Мацуура^{a,c},

Рунэ Сибата^a, Юкако Кусуноки^a, Джастин Чхве^a, Такахиро Огава^{a,d,*}

^a Центр реконструктивной биотехнологии Вайнтрауба, Факультет стоматологии Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе (UCLA), Лос-Анджелес, Калифорния 10833, США

^b Кафедра наук о здоровье полости рта на протяжении жизни, Высшая школа медицинских и стоматологических наук, Исследовательский институт Токио (Science Tokyo), Токио 113-8549, Япония

^c Кафедра пародонтологии, Исследовательский институт Токио (Science Tokyo), Токио 113-8549, Япония

^d Отделение регенеративных и реконструктивных наук, Факультет стоматологии Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе (UCLA), Лос-Анджелес, Калифорния 10833, США

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

Ключевые слова:

Ультрафиолетовое излучение

Титан

Фотофункционализация

Стеклоиономерный цемент

Прочность соединения

АННОТАЦИЯ

Цели: Механическое придание шероховатости и химическое праймирование являются традиционными методами улучшения адгезии материалов, однако имеют присущие им ограничения. Настоящее исследование было направлено на изучение нового физико-химического подхода — УФ-фотофункционализации — для усиления адгезионных характеристик между титаном и стеклоиономерным цементом.

Методы: Испытания на прочность соединения при сдвиге проводились с использованием коммерчески чистого титана 4 класса и стеклоиономерного цемента, модифицированного смолой. Оценивались как гладкие механически обработанные титановые поверхности, так и поверхности, подвергнутые пескоструйной обработке, с применением и без применения 1-минутной УФ-фотофункционализации.

Результаты: УФ-фотофункционализация снизила содержание поверхностного углерода на титане более чем с 35 % до 20 % и изменила смачиваемость поверхности с гидрофобной на гидрофильную. Данная физико-химическая модификация значительно улучшила адгезионные свойства. На механически обработанных поверхностях УФ-излучение увеличивало предел текучести и модуль упругости до 4 раз, а межфазную энергию — более чем в 9 раз. Эффект УФ-обработки был сопоставим с эффектом пескоструйной обработки и в ряде аспектов превышал его. При применении УФ-фотофункционализации к поверхностям, обработанных пескоструйным методом, наблюдалось дальнейшее усиление показателей: предел текучести и модуль упругости увеличивались в 2 раза, а межфазная энергия — приблизительно в 3 раза. Синергетическое применение методов придания шероховатости поверхности и УФ-фотофункционализации обеспечивало увеличение предела текучести в 7 раз и увеличение межфазной энергии до 19 раз по сравнению с механически обработанной поверхностью. После проведения испытаний на сдвиг выявлены значительные остатки цемента на образцах после УФ-обработки, свидетельствуя, что фактическая межфазная адгезия могла быть ещё выше, чем показывают измеренные значения.

Значимость: УФ-фотофункционализация в течение одной минуты представляет собой мощный неинвазивный физико-химический метод модификации поверхности, существенно улучшающий адгезию между титаном и стеклоиономерным цементом, модифицированным смолой, без изменения морфологии поверхности. Данная стратегия формирует новую парадигму в адгезии стеклоиономерного цемента, модифицированного смолой, к титану за счет повышения межфазной совместимости и энергии, предлагая перспективную альтернативу традиционным механическим или химическим методам модификации поверхности.

1. Введение

Адгезия между металлическими материалами и стоматологическим цементом играет ключевую роль в стоматологии, напрямую влияя на долговечность и надежность ортопедических конструкций и протезов. Достижение прочной и стабильной адгезии на границе раздела различных реставрационных материалов — таких как титан, керамика и сплавы благородных металлов — и стоматологического цемента остается давней проблемой и обусловило разработку многочисленных методов обработки поверхности. В клинической практике для повышения адгезионных характеристик обычно применяются механическое придание шероховатости поверхности [1–9] — посредством пескоструйной обработки — и химическое кондиционирование [10–15], включая металлическое праймирование. Эти методы направлены на увеличение площади поверхности и механического зацепления [1,2] либо внедрение реакционноспособных химических групп, способствующих адгезии [16].

Хотя как механические, так и химические подходы в целом эффективны, они обладают существенными ограничениями. К примеру, механическое придание шероховатости может нарушать структурную целостность материала за счет образования микротрещин, которые служат очагами начала разрушения или усталостного растрескивания [17–21]. Это особенно актуально для материалов с низкой вязкостью разрушения, таких как диоксид циркония, которые характеризуются высокой склонностью к образованию трещин [22,23]. С другой стороны, металлические праймеры, содержащие МДП, химически связываются с оксидными слоями на таких субстратах, как титан или цирконий, через фосфатные

группы. Такая химическая реактивность обеспечивает адгезию к металлической поверхности при одновременной сополимеризации с мономерами смолы в составе цемента. Однако их адгезионная эффективность зависит от надлежащей подготовки поверхности, что продемонстрировано в исследованиях, где показатели варьировали в зависимости от метода предварительной обработки [24,25]. Более того, повышение прочности соединения, достигаемое при использовании металлических праймеров, часто менее выражено по сравнению с результатами механической обработки поверхности [6,26].

Фотофункционализация ультрафиолетовым (УФ) излучением рассматривается как инновационный метод обработки поверхности титана, преимущественно направленный на усиление таких биологических ответов, как остеоинтеграция [27–36]. Данный процесс включает кратковременное (обычно 1–30 минут) воздействие УФ-излучения на титановую поверхность [37–41], что приводит к удалению органических углеродсодержащих загрязнений (углеводородов) и переходу поверхности из гидрофобного состояния в супергидрофильное. Этот подход сочетает физическое воздействие высокоэнергетического фотонного излучения с последующими химическими реакциями на поверхности титана, формируя физико-химическую модификацию поверхности [42]. Такая физико-химическая модификация значительно повышает биологическую аффинность титановой поверхности, способствуя адгезии, пролиферации и функциональной активности остеобластов [43–45]. Соответственно, УФ-обработанные имплантационные поверхности демонстрируют ускоренное и усиленное формирование костной ткани [46–50]. Помимо остеоинтеграции, УФ-фотофункционализация также улучшает интеграцию мягких тканей за счёт усиления ответа фибробластов [51–55].

*Адрес для корреспонденции: Центр реконструктивной биотехнологии Вайнтрауба и Отделение регенеративных и реконструктивных наук, Факультет стоматологии Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе (UCLA), Лос-Анджелес, Калифорния, США.

Адрес эл. почты: togawa@dentistry.ucla.edu (Т. Огава).

<https://doi.org/10.1016/j.dental.2025.08.002>

Получено 23 апреля 2025 г.; получено в пересмотренном виде 19 июля 2025 г.; принято 6 августа 2025 г.

Онлайн-версия опубликована 19 августа 2025 г.

0109-5641/© 2025 Авторы. Опубликовано издательством «Эльзевир Инк.» от имени Академии стоматологических материалов. Данная статья размещена в открытом доступе и распространяется в соответствии с лицензией Creative Commons типа BY (с указанием авторства) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Поверхности имплантатов и абатментов, независимо от клинического или экспериментального использования, как правило, на 35–80 % покрыты углеводородными загрязнениями [35,56–61], что обуславливает их гидрофобность [62–64]. УФ-обработка способна уменьшать данное загрязнение до уровня ниже 20 %, восстанавливая исходную поверхностную энергию и реакционную способность материала [36,63,65].

Важно отметить, что УФ-фотофункционализация не изменяет морфологию поверхности или механические свойства обрабатываемых материалов [66,67]. Кроме того, её эффективность продемонстрирована не только для коммерчески чистого титана, но и для титановых сплавов, кобальт-хромовых сплавов и диоксида циркония [58,67–71]. Это свидетельствует о более широкой применимости УФ-обработки за пределами исключительно биологически обусловленных интерфейсов и указывает на её потенциальную эффективность для усиления небологической межфазной адгезии, в том числе между стоматологическими материалами и фиксирующим цементом.

Титан широко применяется в различных ортопедических стоматологических конструкциях, включая абатменты имплантатов, коронки и мостовидные протезы. В последние годы сформировался клинический протокол, при котором титановые компоненты фиксируются к ортопедическим конструкциям экстраорально, а затем устанавливаются интраорально, зачастую с фиксацией винтом в случаях имплантационного лечения [72,73]. Данный так называемый гибридный подход минимизирует риск избытка цемента и облегчает возможность снятия конструкции. В этих клинических ситуациях надёжная адгезия между титаном и фиксирующим цементом является ключевым фактором долгосрочного успеха лечения. Хотя композитные цементы часто используются благодаря их высокой прочности сцепления, они требуют выполнения нескольких чувствительных к технике этапов, таких как праймирование и контроль влажности. В отличие от них, стеклоиономерный цемент, модифицированный смолой (RMGIC), обеспечивает упрощённый клинический протокол при приемлемых показателях клинической эффективности и экономической целесообразности, что делает его пригодной альтернативой для экстраоральной фиксации к титану.

В настоящем пилотном исследовании мы рассматриваем УФ-фотофункционализацию как новый, неинвазивный метод, сохраняющий морфологию поверхности, для повышения адгезионной прочности соединения между титаном и стоматологическим цементом. Для установления принципиальной осуществимости метода в клинически релевантных и стандартизированных условиях в качестве фиксирующего материала был выбран RMGIC, широко применяемый для фиксации металлических ортопедических компонентов в клинической практике. В частности, мы выдвинули гипотезу о том, что однократная одноминутная УФ-фотофункционализация гладкой механически обработанной (фрезерованной) титановой поверхности, представляющей собой базовую минимально обработанную форму титана, может существенно повысить прочность её адгезионного соединения с RMGIC.

Дополнительно были проверены ещё две гипотезы: (1) что улучшение адгезии, достигаемое посредством УФ-фотофункционализации, сопоставимо с эффектом, получаемым при традиционной пескоструйной обработке; и (2) что между УФ-фотофункционализацией и пескоструйной обработкой существует синергетический эффект, приводящий к большему увеличению межфазной прочности сцепления по сравнению с каждым методом в отдельности. Результаты данного исследования могут открыть новые перспективы в разработке протоколов обработки поверхности в ортопедической стоматологии, где механическая целостность и биосовместимость имеют принципиальное значение.

2. Материалы и методы

2.1. Подготовка титановых образцов и характеристика поверхности

Прямоугольные титановые образцы (14,0 × 6,4 × 2,0 мм; DIO Corporation, Пусан, Республика Корея) были изготовлены из медицинского коммерчески чистого титана (класс 4) методом прецизионного машинного фрезерования (рис. 1 А). Эти образцы использовались в качестве механически обработанной поверхности. Часть образцов подвергали стандартизированной воздушно-абразивной обработке частицами оксида алюминия (Aluminum Oxide White 50 Micro Coarse, Pearson Dental Supply, США) в течение 30 с на образец с расстояния 5,0 мм. Данная процедура формировала микроскопически шероховатую топографию поверхности, репрезентативную для клинически релевантных шероховатых поверхностей, и такие образцы обозначались как пескоструйно обработанные (рис. 1 А). Все образцы были подготовлены компанией DIO Corporation (Пусан, Республика Корея), после чего подвергались тщательной очистке и окончательной стерилизации методом гамма-облучения.

Фотофункционализация ультрафиолетовым (УФ) излучением применялась к обоим типам поверхностей с использованием вакуумного УФ-излучения (ВУФ) с длиной волны 172 нм (выходная мощность ок. 60 мВт/см²; UV Activator, DIO Implant Corporation) в течение 1 минуты [38,39,51,67] (рис. 1 В). Образцы помещали внутрь полых цилиндрических ампул (внутренний диаметр 10 мм, высота 25 мм, толщина стенки 1 мм), изготовленных из синтетического кварцевого стекла, обеспечивающего эффективное пропускание УФ-излучения (рис. 1 С). Кварцевые ампулы размещали внутри источника УФ-излучения таким образом, чтобы свет излучался со всех направлений (360°), обеспечивая полное воздействие на поверхности образцов. Образцы, не подвергавшиеся ВУФ-обработке, использовали в качестве контрольных.

Морфология поверхности характеризовалась с использованием сканирующей электронной микроскопии (SEM; Nova 230 Nano SEM, FEI, Хиллсборо, Орегон, США) и оптического профилометра (Mx, Alicona Imaging GmbH, Раба, Грац, Австрия) для трехмерной визуализации и количественного анализа шероховатости. Были рассчитаны средняя высота неровностей (S_a),

максимальная высота (S_z) и развитое межфазное отношение площади поверхности (S_{dr}).

Смачиваемость поверхности оценивали путём измерения краевого угла смачивания капли объемом 3 мкл дважды дистиллированной воды (ддН₂O), нанесенной на образец до и после УФ-обработки. Для оценки химических изменений поверхности, индуцированных УФ-фотофункционализацией, непосредственно после обработки проводилась рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (XPS; Axis Ultra DLD, Kratos Analytical, Shimadzu, Киото, Япония) с целью определения элементного состава.

2.2. Фиксация и испытание на сдвиг для оценки межфазной адгезии титан-цемент

Для оценки межфазной прочности соединения стеклоиономерный цемент, модифицированный смолой (RMGIC; Fuji Plus, GC Corporation, Токио, Япония), наносили между испытательной титановой пластиной и пластиной-носителем из титана класса 4 (рис. 1 D). Адгезионная поверхность пластины-носителя (2,0 мм × 6,4 мм) подвергалась травлению для создания равномерной

микротекстурированной поверхности, после чего обрабатывалась УФ-излучением, как описано выше, с целью максимизации удержания цемента.

Капсула RMGIC смешивалась в соответствии с инструкциями производителя

2.3. Морфология и химический состав границы раздела после испытания на сдвиг

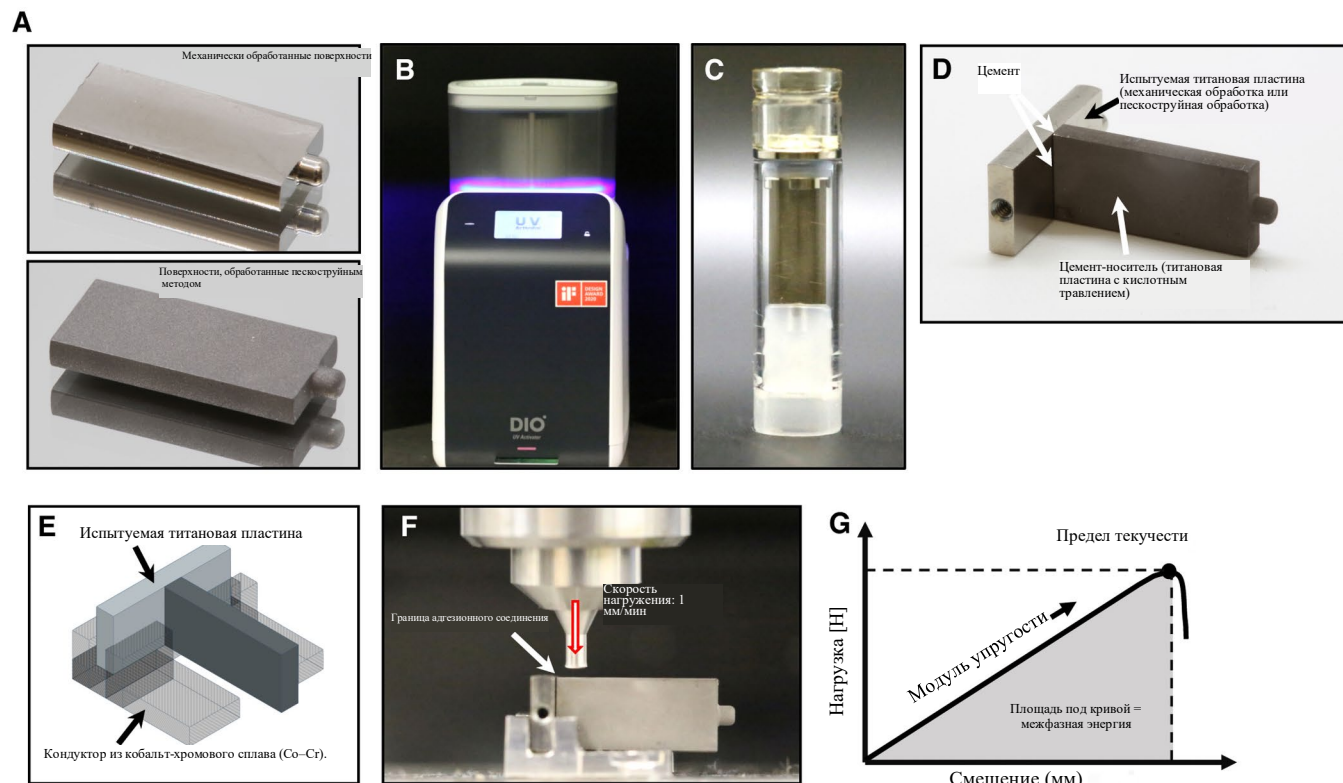


Рис. 1. Экспериментальная установка. (А) Образцы в виде прямоугольных пластин (14,0 x 6,4 x 2,0 мм) с механически обработанной поверхностью и поверхностью, обработанной пескоструйным методом. (В) Устройство, используемое для проведения вакуумной ультрафиолетовой (ВУФ) обработки. (С) Образец титана, помещенный в полую кварцевую ампулу для обработки ВУФ-обработкой. (D) Пластины-носители из цемента фиксировались к испытуемым пластинам с использованием RMGIC в Т-образной конфигурации. (Е) Зафиксированный образец, установленный в кондукторе; испытание на сдвиг проводилось путем приложения нагрузки к пластине-носителю до наступления межфазного разрушения (F). (G) Схематическое изображение кривой «напряжение-деформация» с определением механических показателей, использованных в настоящем исследовании: **Предел текучести**: напряжение, при котором место соединения материалов достигает точки разрушения. **Модуль упругости**: наклон начального линейного участка кривой «напряжение-деформация», характеризующий жесткость границы

и равномерно наносилась на адгезионную поверхность. Фиксация проводилась с использованием индивидуально изготовленного силиконового кондуктора, удерживающего пластину-носитель перпендикулярно и по центру на испытательном образце, обеспечивая воспроизводимое позиционирование и стандартизированное сжатие в период отверждения. Через 4 минуты форму извлекали, а излишки цемента аккуратно удаляли микрозондом. Образцы выдерживали в темной камере при комнатной температуре ($23 \pm 1^\circ\text{C}$) в течение 24 часов перед проведением механических испытаний. Состав RMGIC представлен в таблице 1.

Испытания на сдвиг проводились с использованием универсальной испытательной машины (Instron 5544, Instron, Кантон, Массачусетс, США) с тензодатчиком на 2000 Н и толкателем из нержавеющей стали диаметром 1,9 мм. Узел «титан-цемент» фиксировали в кондукторе из сплава Co-Cr (рис. 1Е), сжимающую нагрузку прикладывали к цементной пластине-носителю в точке на расстоянии 2,0 мм от границы раздела при скорости перемещения траверсы 1,0 мм/мин до наступления межфазного разрушения (рис. 1F). Нагрузку и перемещение регистрировали непрерывно. Предел текучести (определяемый как максимальная нагрузка, деленная на площадь поверхности границы раздела), модуль упругости (наклон линейного участка кривой «нагрузка-деформация») и межфазную энергию (площадь под кривой «напряжение-деформация» до момента разрушения) рассчитывали, как показано на аналитической схеме (рис. 1G).

Анализ после сдвига выполнялся с целью определения типа разрушения и характеристики границы раздела титан-цемент. В исследованиях данного типа понимание характера разрушения — адгезионный по границе раздела или когезионный внутри цемента — имеет критическое значение для интерпретации механических результатов и разработки более надежных границ раздела из биоматериалов. В связи с этим титановые поверхности после разрушения анализировались методом SEM для оценки характера остаточного цемента. Энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия (EDX) применялась для выявления элементных сигнатур остаточного цемента на поверхности титана, что позволяло подтвердить тип разрушения и характеристики межфазного взаимодействия.

2.4. Статистический анализ

Все статистические анализы проводились с использованием программного обеспечения GraphPad Prism 9.0 (GraphPad, Чикаго, Иллинойс, США). Сравнение необработанных поверхностей и поверхностей после УФ-фотофункционализации выполнялось с применением парного *t*-критерия Стьюдента. При сравнении более чем двух групп использовали однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA) с последующим ретроспективным анализом Бонферрони. Испытания на сдвиг проводили на десяти независимых образцах в каждой группе ($n = 10$). Измерение шероховатости поверхности выполняли в трех различных точках на каждом образце ($n = 3$). Значение $p < 0,05$ считалось статистически значимым.

Таблица 1

Состав стеклоиономерного цемента, модифицированного смолой, использованного в настоящем исследовании.

Материалы	Состав	Тип	Ссылка
Fuji Plus (GC Corporation, Токио, Япония)	Порошок: фторсодержащее алюмосиликатное стекло, пигмент, инициатор Жидкость: НЕМА (2-гидроксиэтилметакрилат), винная кислота, малеиновая кислота, сополимер акриловой кислоты, химические инициаторы, вода.	Химическое отверждение	[94]

3. Результаты

3.1. Морфология поверхности образцов титана

Морфология поверхности играет ключевую роль в определении физических и механических взаимодействий на границе раздела материал–цемент. Изображения, полученные методом сканирующей электронной микроскопии (SEM), показали, что механически обработанные титановые поверхности имели относительно гладкую текстуру, без выраженных топографических особенностей, за исключением параллельных царапин и следов механической обработки, характерных для токарных процессов (рис. 2А). В отличие от этого, титановые поверхности, обработанные пескоструйным методом, демонстрировали однородные неровности на микроуровне, равномерно распределенные по поверхности. Трехмерные изображения, полученные методом оптической профилометрии, дополнительно подчеркивали различия: механически обработанная поверхность имела монотонную топографию без выраженных выступов, тогда как поверхность после пескоструйной обработки имела выраженную шероховатость с выступами и углублениями, возникающими в результате воздействия абразивных частиц. Глубина этих неровностей составляла от 20 до 30 мкм (рис. 2В). Количественные параметры шероховатости поверхности — включая среднюю арифметическую высоту (S_a), максимальную высоту (S_z) и развитое отношение площади поверхности (S_{dr}) — были статистически значимо выше для пескоструйно обработанных поверхностей по сравнению с механически обработанными (рис. 2С), что подтверждает их повышенную сложность и увеличение площади поверхности после шероховатости. Примечательно, что значения S_{dr} свидетельствовали об увеличении площади поверхности после пескоструйной обработки более чем на 50% относительно плоской поверхности, тогда как для механически обработанных поверхностей показатель S_{dr} составлял лишь 0,3%, что указывает на отсутствие увеличения площади поверхности.

3.2. Физико-химические свойства титановых образцов

Для оценки физико-химических изменений, индуцированных УФ-фотофункционализацией, определяли смачиваемость поверхности и её химический состав до и после обработки. Изначально гидрофобные (краевой угол смачивания водой 77°) механически обработанные титановые поверхности после одноминутной УФ-обработки становились гидрофильными, демонстрируя резкое снижение краевого угла до 6° (рис. 3А). Это изменение сопровождалось значительным снижением содержания поверхностного углерода — с 32 до 20%, что подтверждено методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (XPS) (рис. 3В). Аналогичные изменения наблюдались и для поверхностей титана после пескоструйной обработки. После УФ-обработки краевой угол смачивания снижался до 0° , что свидетельствует о полной смачиваемости поверхности (рис. 3С), а содержание углерода уменьшалось с 35 до 15% (рис. 3D). Эти результаты подтверждают, что УФ-фотофункционализация эффективно удаляет углеводородные загрязнения и повышает поверхностную энергию независимо от исходной топографии поверхности.

3.3. Прочность межфазного соединения механически обработанного

Для оценки механической целостности границы раздела титан–цемент проводились испытания на сдвиг. Типичная кривая «напряжение–деформация» показала, что механически обработанные титановые поверхности с УФ-фотофункционализацией характеризовались более высоким пределом текучести и большей деформацией до разрушения по сравнению с необработанными поверхностями (рис. 4А), что свидетельствует о более прочном и более пластичном межфазном соединении.

Для валидации результатов испытаний на сдвиг анализировали поверхность разрушения цементной пластины-носителя. Межфазная граница не демонстрировала характерной микротопографии, присущей протравленному титану (рис. 4В). Вместо этого по всей поверхности наблюдалась монотонная цементоподобная структура без выявления сигнала титана при энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDX) (рис. 4С). Дополнительный элементный анализ подтвердил наличие углерода, кислорода, фтора и алюминия — ключевых компонентов стеклоиномерного цемента (рис. 4D). Эти данные указывают на то, что разрушение происходило по поверхности испытываемой титановой пластины, а не по пластине-носителю.

Количественно предел текучести УФ-обработанных поверхностей был примерно в 4 раза выше, чем у механически обработанных поверхностей (рис. 4Е). Значения для УФ-группы составили от 7,40 до 13,60 МПа, тогда как для необработанной группы — от 1,48 до 5,27 МПа. Модуль упругости, отражающий жесткость межфазного соединения, также был приблизительно в 2 раза выше в группе УФ-обработки (рис. 4F). Соответственно, межфазная энергия — характеризующая суммарную механическую эффективность границы раздела — увеличивалась более чем в 9 раз после УФ-фотофункционализации (рис. 4G), что подчеркивает существенное усиление адгезионной способности даже без механического шероховатости поверхности.

3.4. Характеристики разрушения на границе раздела механически обработанного титана и цемента.

Для более глубокого понимания природы разрушения в зоне адгезионного соединения был проведен анализ механизма разрушения. Изображения после испытания на сдвиг показали, что поверхности после УФ-фотофункционализации удерживали значительно большее количество остаточного цемента по сравнению с необработанными образцами, что подтверждено как визуально, так и количественным анализом изображений (рис. 5А). Сканирующая электронная микроскопия в сочетании с энергодисперсионной рентгеновской спектроскопией (SEM/EDX) подтвердила указанные результаты. На необработанных

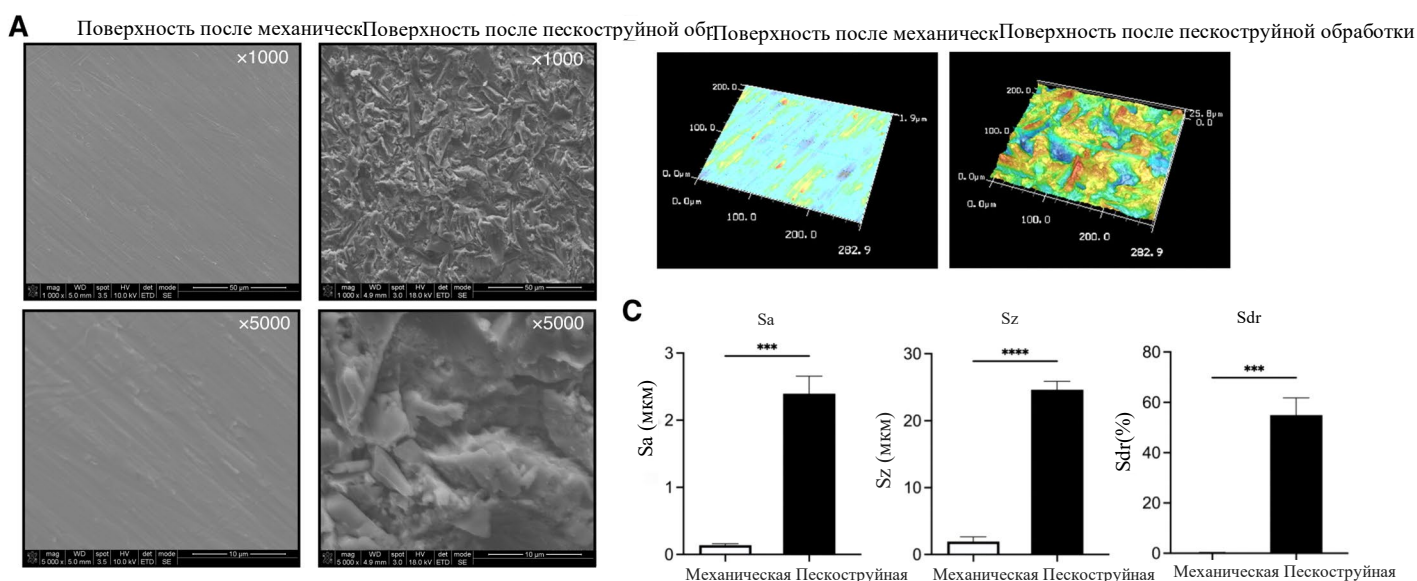


Рис. 2. Морфология поверхности титановых испытательных пластин. (А) SEM-изображения поверхностей после механической и пескоструйной обработки. (В) Трехмерные изображения топографии поверхности, полученные методом оптической профилометрии. (С) Количественные параметры шероховатости поверхности: S_a (средняя арифметическая высота); S_z (максимальная высота); S_{dr} (развитое отношение площади межфазной поверхности). *** $p < 0,001$, **** $p < 0,0001$

титана и стеклоиномерного цемента

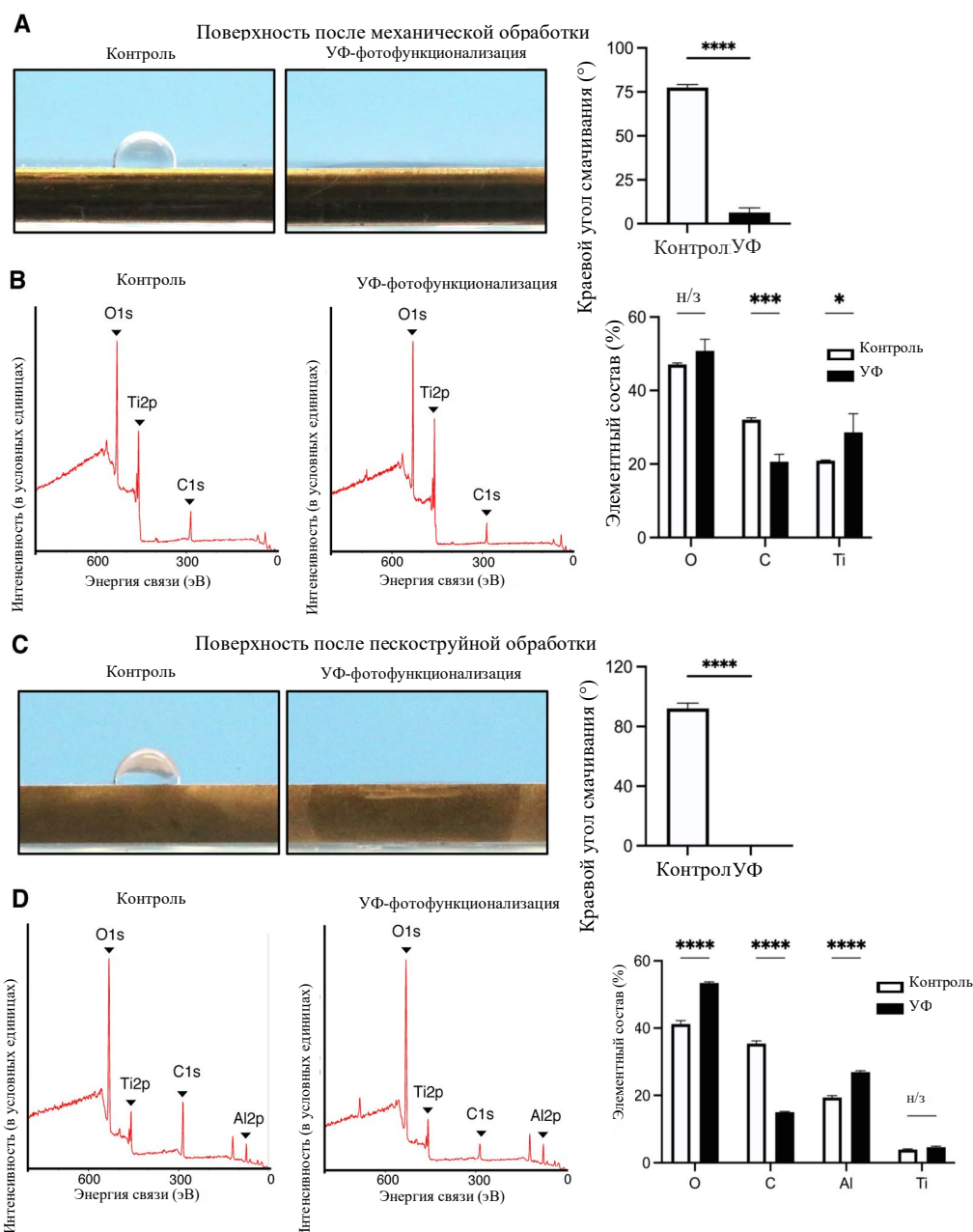


Рис. 3. Физико-химические свойства испытуемых титановых пластин до и после УФ-фотофункционализации. (А) Боковые изображения капель объемом 3 мкл дважды дистиллированной воды (ддН₂O) на механически обработанных титановых поверхностях, а также значения краевого угла смачивания, измеренные до и после УФ-фотофункционализации. **** $p < 0,0001$ — статистически значимые различия между необработанными и УФ-обработанными поверхностями. (В) Химический состав поверхности механически обработанного титана, определенный методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (XPS). Представлены обзорные спектры и количественный элементный анализ. * $p < 0,05$; *** $p < 0,001$ — статистически значимые различия

поверхностях спектры EDX напоминали спектры исходного механически обработанного титана, демонстрируя лишь разрозненные элементные сигналы, связанные с цементом — в частности F, Al и Si — в изолированных участках (рис. 5В и С). В отличие от этого, поверхности после УФ-фотофункционализации характеризовались повсеместным присутствием элементов, относящихся к цементу (C, O, F, Al и Si), равномерно распределенных по поверхности (рис. 5Д), что свидетельствует о значительном количестве остаточного цемента. Эти результаты свидетельствуют, что УФ-обработка значительно усиливает прочность межфазного соединения, предотвращая адгезионное разрушение по границе раздела и способствуя частичному когезионному разрушению внутри самого цемента.

3.5. Прочность межфазного соединения титана, обработанного пескоструйным методом, и стеклоиономерного цемента

Чтобы оценить, может ли УФ-фотофункционализация дополнительно усилить адгезию на уже шероховатых поверхностях, аналогичная УФ-обработка применялась к титану, обработанному пескоструйным методом. Кривые «напряжение-деформация» показали выраженное улучшение адгезионных характеристик после УФ-обработки (рис. 6А). Предел текучести титана после пескоструйной обработки и УФ-обработки был более чем в 2 раза выше по

сравнению с титаном с пескоструйной обработкой без УФ-обработки (рис. 6В). Кроме того, значительно увеличился модуль упругости (рис. 6С), что сопровождалось приблизительно трехкратным повышением межфазной энергии (рис. 6Д). Эти результаты свидетельствуют о том, что УФ-фотофункционализация оказывает аддитивный эффект даже на механически шероховатых поверхностях, дополнительно усиливая границу раздела материал-цемент.

3.6. Непропорциональный эффект УФ-фотофункционализации и её синергия с шероховатением поверхности

Влияние УФ-фотофункционализации, по-видимому, отличалось в зависимости от исходной морфологии поверхности. На гладких механически

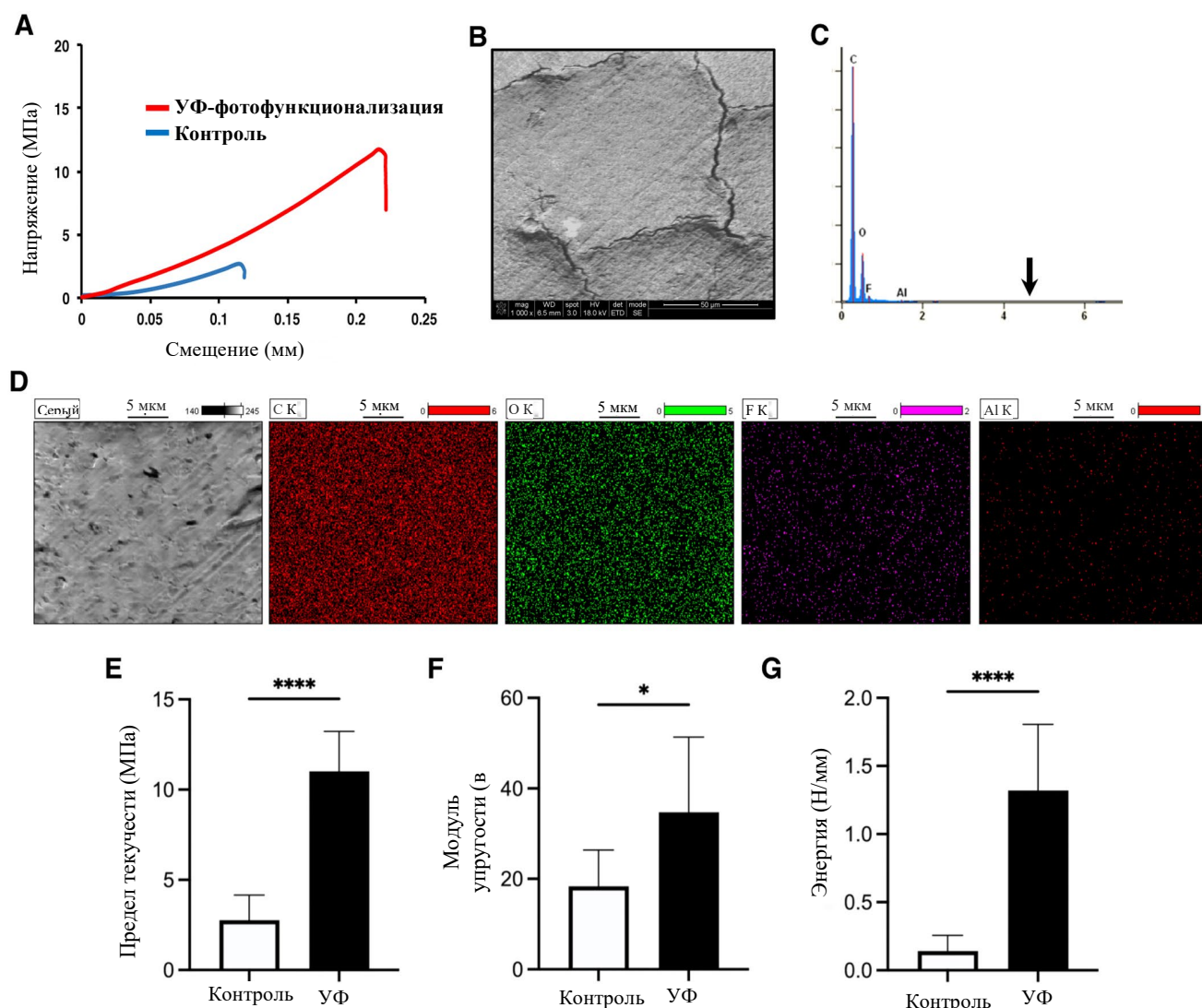


Рис. 4. Влияние УФ-фотофункционализации на межфазную адгезию между механически обработанным титаном и RMGIC. (А) Кривые «напряжение-деформация», полученные при испытаниях на сдвиг для механически обработанных титановых поверхностей с УФ-обработкой и без нее. (В) SEM-изображения границы раздела цементной пластины-носителя после испытания. Спектры EDX (С) и элементное картирование (D) границы раздела цемента. Черная стрелка указывает на отсутствие сигнала титана в зоне разрушения. Значения предела текучести (Е), модуля упругости (F) и межфазной энергии (G),

обработанных поверхностях УФ-обработка приводила к выраженному повышению прочности адгезионного соединения, доводя её до уровня пескоструйно обработанных поверхностей и выше. Хотя относительный эффект УФ-обработки был менее выражен на пескоструйно обработанных поверхностях, улучшение оставалось статистически и механически существенным. Важно отметить, что при сочетании УФ-фотофункционализации с пескоструйной обработкой наблюдался синергетический эффект (рис. 7). По сравнению с исходной механически обработанной поверхностью межфазная энергия увеличивалась приблизительно в 19 раз, а предел текучести — в 7 раз. Такой синергизм свидетельствует, что два метода воздействуют на различные аспекты оптимизации поверхности: пескоструйная обработка повышает механическое сцепление и прочность на растяжение за счёт увеличения шероховатости и площади поверхности, тогда как УФ-обработка улучшает физико-химическую совместимость и поверхностную энергию. Совместно они формируют эффективную стратегию максимизации межфазной адгезии между титаном и стоматологическими цементами.

4. Обсуждение

Настоящее исследование продемонстрировало, что УФ-фотофункционализация значительно улучшает адгезионные характеристики между титаном и стеклоиономерным цементом, модифицированным смолой, за счет изменения физико-химических свойств поверхности без изменения её топографии. В частности, титан после УФ-обработки характеризовался значительным снижением содержания поверхностного углерода — с более чем 35 % до 20 % — а также переходом от гидрофобного состояния к супергидрофильному. Эти изменения поверхности привели к выраженному улучшению механических

показателей адгезии: увеличению предела текучести и модуля упругости до 4 раз, а также увеличению межфазной энергии на гладком механически обработанном титане более чем в 9 раз. Примечательно, что УФ-фотофункционализация превосходила или соответствовала эффекту традиционного механического шероховатости методом пескоструйной обработки, а при их сочетании обеспечивала синергетический эффект — увеличение прочности в 7 раз и увеличение межфазной энергии в 19 раз. Анализ поверхности после испытаний на сдвиг выявил наличие значительных остатков цемента на титане после УФ-обработки, что указывает на отсутствие чистого адгезионного разрушения по границе раздела. Данные наблюдения свидетельствуют о частичном когезионном разрушении внутри цемента, а не о чисто адгезионном разрушении на границе раздела титан-цемент. Следовательно, истинная прочность адгезионного соединения границы раздела после УФ-обработки могла быть занижена в рамках примененной модели испытаний.

С механистической точки зрения повышение прочности соединения при сдвиге после УФ-обработки, вероятно, обусловлено сочетанием увеличения поверхностной энергии и усиления молекулярных взаимодействий на границе раздела. Удаляя углеводородные загрязнения и восстанавливая чистую гидрофильную титановую поверхность, УФ-фотофункционализация может способствовать смачиванию и проникновению цемента в микроскопические

неровности на поверхности, усиливая физическое и химическое межфазное

источников УФ-С излучения (например, 254 нм), которые преимущественно

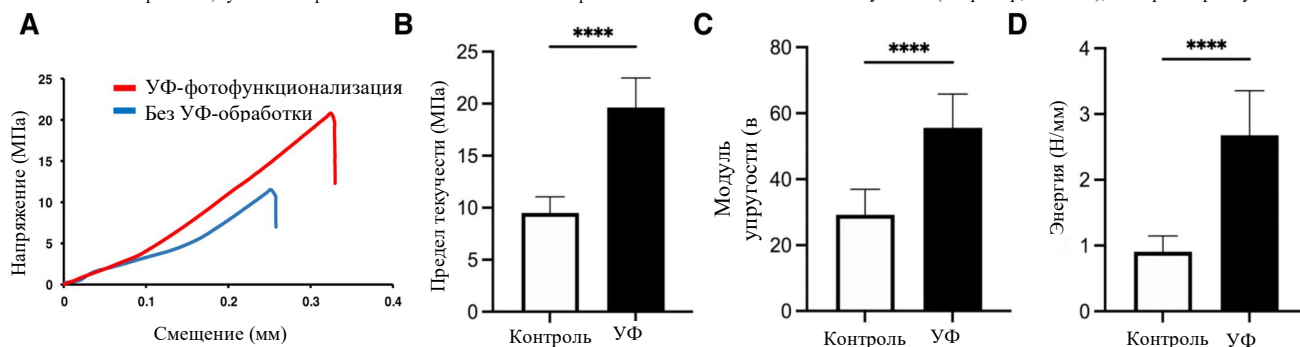


Рис. 6. Влияние УФ-фотофункционализации на межфазную адгезию между титаном, обработанным пескоструйным методом, и RMGIC. (А) Кривые «напряжение-деформация», полученные при испытаниях на сдвиг для контрольных титановых поверхностей и поверхностей, обработанных пескоструйным методом, с УФ-фотофункционализацией. Значения предела текучести (В), модуля упругости (С) и межфазной энергии (D), полученные в ходе испытаний.

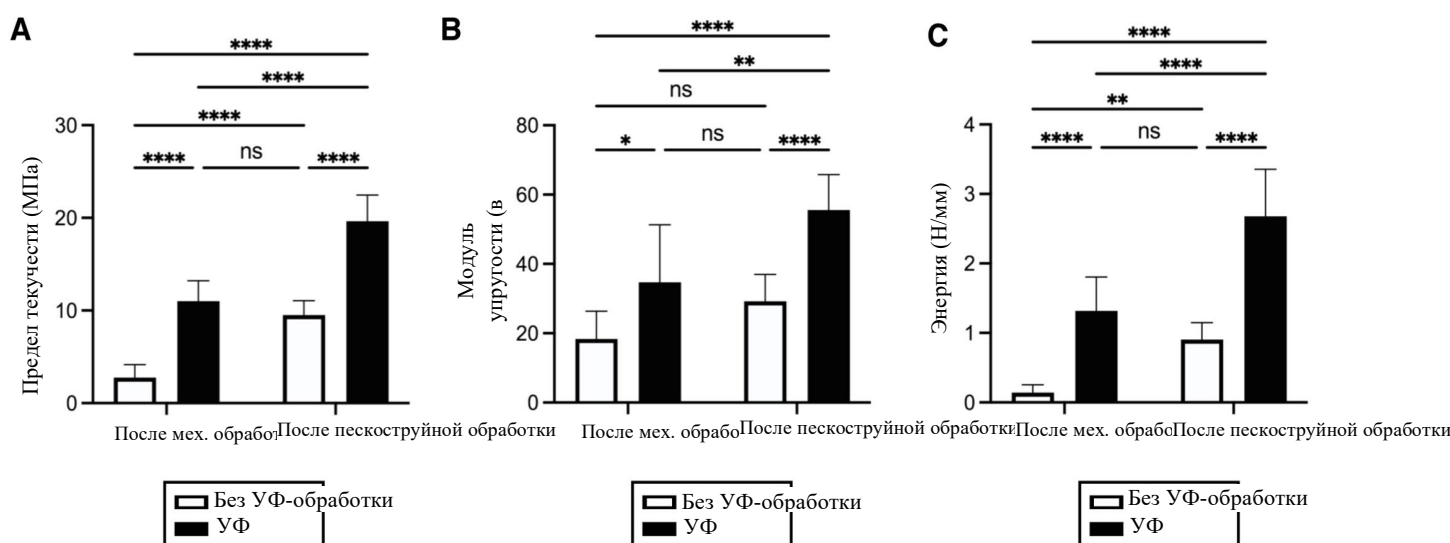


Рис. 7. Комбинированное влияние пескоструйной обработки и УФ-фотофункционализации на межфазную адгезию титана к стеклоиономерному цементу. Сравнение значений предела текучести (В), модуля упругости (С) и межфазной энергии (D) для всех вариантов обработки поверхности. $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; **** $p < 0,0001$ — статистически значимые различия между указанными группами.

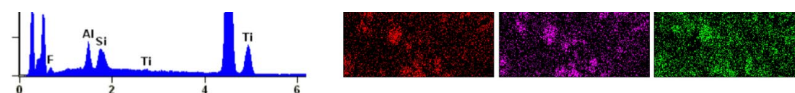


Рис. 5. Морфология и химический состав границы раздела титан-цемент для оценки характера разрушения после испытаний на сдвиг. (А) SEM-изображения и количественная оценка площади покрытия остаточным цементом на механически обработанных титановых поверхностях после испытаний на сдвиг в группе контроля и УФ-обработки. Спектры EDX и элементное картирование исходного механически обработанного титана (В), границы раздела

сцепление. Эти изменения напрямую способствуют увеличению механической прочности, регистрируемой при испытаниях на сдвиг.

Основной механизм УФ-индуцированной функционализации поверхности заключается в удалении адсорбированных, неизбежных углеродных загрязнений с поверхности титана. Эти углеводороды, естественно накапливающиеся в результате атмосферного воздействия и контакта с окружающей средой, пассивируют титан, маскируя его внутреннюю реакционную способность и снижая его поверхностную энергию[47,57,74]. Ультрафиолетовое излучение — особенно в диапазоне УФ-С (длина волны < 250 нм) — обладает достаточной энергией фотонов для инициирования фотокаталитических реакций в слое диоксида титана (TiO_2), который естественным образом формируется на поверхности титана[75,76]. Этот фотокаталитический процесс приводит к генерации электронно-дырочных пар, которые, в свою очередь, образуют активные формы кислорода (АФК), включая супероксид-анионы и гидроксильные радикалы[77-79]. Эти АФК быстро окисляют и разлагают поверхностные углеводороды до летучих соединений, таких как CO_2 и H_2O , которые десорбируются с поверхности, восстанавливая подлежащую структуру TiO_2 до чистого, каталитически активного состояния.

Третий, ещё более мощный механизм заключается в прямом фотоллизе углеводородов под действием высокоэнергетических фотонов УФ-излучения — в частности вакуумного ультрафиолета (ВУФ) с длиной волны 172 нм, примененного в настоящем исследовании. В отличие от традиционных

опираются на фотокаталитические и озон-опосредованные процессы и обычно требуют 20–30 минут облучения, ВУФ-излучение обладает энергией фотонов, превышающей энергию диссоциации многих органических связей (C–H, C–C и C–O)[39,67]. Это позволяет осуществлять прямое расщепление углеводородных цепей посредством фотолитического разложения без необходимости использования катализатора или вторичных окислителей. В результате ВУФ-облучение способно практически мгновенно устранять поверхностные углеводороды, обеспечивая сопоставимую или более эффективную деконтаминацию всего за 1 минуту. Такая высокая эффективность в сочетании с быстрым восстановлением гидрофильности делает ВУФ-фотофункционализацию исключительно мощным и клинически применимым методом активации титановой поверхности[33].

В качестве вторичного эффекта удаления углеводородов поверхность титана претерпевает переход от гидрофобного состояния к супергидрофильному. Это изменение обусловлено экспозицией гидроксильных (–OH) групп и полярных кислородсодержащих соединений на реактивированной поверхности TiO_2 [80–82]. Эти функциональные группы повышают аффинность поверхности к воде и полярным молекулам, существенно снижая краевой угол смачивания практически до нулевых значений. Такой переход к безуглеродной и гидрофильной поверхности улучшает растекаемость цемента и способствует более тесному контакту на границе раздела титан–цемент, что является критически важным для прочного межфазного соединения.

Предыдущие исследования в основном были сосредоточены на механических методах шероховатости — таких как пескоструйная обработка или кислотное

травление — для повышения адгезии к титановым поверхностям за счет увеличения площади поверхности и микромеханического сцепления. Несмотря на эффективность, эти методы часто сопровождаются вариабельностью результатов, загрязнением абразивными частицами и необратимыми изменениями поверхности. В отличие от них, УФ-фотофункционализация представляет собой чистый неинвазивный метод повышения адгезионных характеристик путем химической реактивации поверхности без изменения её топографии. Сообщалось, что УФ-обработка улучшает адгезию смоляных фиксирующих цемента к неметаллическим субстратам, таким как стекловолоконные штифты [83] и непряная реставрация после искусственного старения [84], а также повышает прочность соединения между ПММА и сплавом Co-Cr [85], однако её прямое применение для адгезии между титаном и стеклоиономерным цементом ранее не изучалось. Таким образом, настоящее исследование демонстрирует, что УФ-фотофункционализация может эффективно улучшать адгезию к металлическим поверхностям при использовании стеклоиономерного цемента — в клинически значимой, но ранее недостаточно исследованной области.

Помимо предела текучести, увеличение межфазной энергии после УФ-фотофункционализации имеет особое значение для прогнозирования клинической эффективности. Межфазная энергия отражает объем механической работы, необходимой для разделения двух соединенных поверхностей на единицу площади. В отличие от предела текучести, характеризующего напряжение, при котором начинается необратимая деформация, межфазная энергия учитывает как прочность, так и вязкость границы раздела, отражая суммарную энергию, поглощенную до разрушения. Эта концепция имеет ключевое значение в адгезиологии, поскольку более высокая межфазная энергия указывает на более прочное и устойчивое соединение, менее подверженное образованию и распространению трещин. В полости рта, где неизбежны циклические нагрузки и микроперемещения, такая устойчивость критически важна для предотвращения расщепления. В настоящем исследовании титановые поверхности с УФ-обработкой продемонстрировали значительно более выраженное увеличение межфазной энергии (до 19 раз) по сравнению с увеличением предела текучести (до 7 раз). Это наблюдение является клинически значимым, поскольку в полости рта действуют сложные и повторяющиеся нагрузки, а не простые статические силы. Таким образом, более высокая межфазная энергия коррелирует с повышенной усталостной стойкостью и долговременной механической стабильностью в условиях циклических нагрузок — концепция, хорошо известная в материаловедении и стоматологии. Усталостное разрушение часто возникает в месте соединения, и повышенное поглощение энергии в этой зоне снижает вероятность распространения трещин и адгезионного разрушения с течением времени. Учитывая выраженное увеличение межфазной энергии, наблюдавшееся в настоящем исследовании, УФ-фотофункционализация может существенно снижать микроподвижность, межфазную усталость и случаи расщепления, тем самым способствуя увеличению срока службы ортопедических конструкций и снижению технических осложнений.

Кроме того, данное исследование предоставляет количественное сравнение между поверхностями с УФ-обработкой и пескоструйной обработкой, демонстрируя, что гладкий титан после УФ-обработки может достигать адгезионных характеристик, сопоставимых с показателями титана после пескоструйной обработки. При сочетании обоих методов наблюдался синергетический эффект, что указывает на различие и взаимодополняемость механизмов: увеличение межфазной энергии и усиление механического сцепления за счет шероховатости поверхности, а также химическое/физико-химическое улучшение вследствие УФ-активации. Повышенная шероховатость поверхности способствует не только микромеханическому сцеплению, но и усилению химической реакционной способности за счет увеличения доступной площади поверхности для молекулярных взаимодействий и реакций. Как показано в количественном анализе шероховатости, поверхности, обработанные пескоструйным методом, демонстрировали значения S_z более 20 мкм и S_d более 50 %, что отражает выраженную степень механической модификации. Примечательно, что УФ-фотофункционализация обеспечивала сопоставимый уровень адгезионных характеристик, что позволяет рассматривать её как альтернативу или дополнение к традиционным методам подготовки поверхности в ортопедической стоматологии.

С клинической точки зрения УФ-обработка представляет собой перспективный метод подготовки поверхности титановых компонентов, применяемых в ортопедической и имплантационной стоматологии, включая абатменты имплантатов, балки, каркасы, и, возможно, коронки и мостовидные протезы. Практичный аппаратный метод легко интегрируется в существующие клинические и лабораторные протоколы, обеспечивая повышение адгезии без необходимости повторной механической обработки или нанесения покрытия. Однако, несмотря на пригодность метода для компонентов с доступными поверхностями, такие ортопедические конструкции, как коронки и мосты, часто имеют сложную геометрию с внутренними поверхностями и поднутрениями, где прямое воздействие УФ-излучения может быть ограничено. Тем не менее, как обсуждалось ранее, механизмы УФ-индуцированной деконтаминации не ограничиваются прямым фотолизом. УФ-излучение — особенно в диапазоне вакуумного УФ — также инициирует косвенные процессы, включая озон-опосредованное окисление и генерацию активных форм кислорода (АФК). Эти реакционноспособные промежуточные соединения могут проникать в труднодоступные или затенённые области, потенциально обеспечивая определенную степень активации поверхности даже при отсутствии прямой видимости.

В частности, выраженное улучшение адгезионных характеристик между титаном и RMGIC после УФ-фотофункционализации открывает возможность замены высокоэффективных смоляных фиксирующих цемента в определённых клинических условиях. Хорошо известно, что адгезивные цементы на основе смол

обычно превосходят RMGIC по прочности сцепления с металлическими субстратами, демонстрируя увеличение предела текучести в 2–4 раза в стандартных условиях без предварительной обработки [86–90]. Однако результаты настоящего исследования показывают, что УФ-фотофункционализация сама по себе повышает предел текучести при фиксации RMGIC к титану до 4 раз, а при сочетании с пескоструйной обработкой — до 7 раз; при этом межфазная энергия возрастает более чем в 9 раз и до 19 раз соответственно при комбинированной обработке. Эти показатели не только соответствуют или превышают известные различия в эксплуатационных характеристиках между RMGIC и смоляными адгезивными цементами, но и указывают на то, что применение RMGIC с УФ-обработкой может устранить клиническую необходимость использования смоляных адгезивов в ситуациях, где их преимущество традиционно обосновывалось более высокой прочностью соединения.

Кроме того, возможность достижения высокой эффективности адгезии без применения агрессивных праймеров или смоляных адгезивов обеспечивает ряд клинических и материаловедческих преимуществ. Стеклоиономерные цементы обладают определёнными преимуществами, включая высвобождение фторидов, низкую усадку, экономическую эффективность, легкость извлечения и простоту обращения. В частности, биосовместимость стеклоиономерных цемента значительно выше по сравнению с материалами на основе смол, которые нередко проявляют цитотоксичность и раздражающее действие на ткани. Окислительный стресс и цитотоксичность смоляных материалов, обусловленные образованием свободных радикалов и остаточным мономером, широко документированы [91–93]. Существенным недостатком стеклоиономерных цемента традиционно считалась их ограниченная эффективность при фиксации к металлам из-за меньшего механического сцепления. Однако при использовании УФ-фотофункционализации, значительно повышающей поверхностную энергию и химическую совместимость на границе раздела титана, данные ограничения могут быть эффективно нивелированы. Это открывает возможности применения более простых и биосовместимых фиксирующих материалов в ортопедической и имплантационной стоматологии, снижая чувствительность к технике выполнения и потенциальную цитотоксичность, связанные с системами на основе смол. Несмотря на необходимость дальнейшей валидации в различных клинических условиях и ортопедических конфигурациях, УФ-фотофункционализация может способствовать смене парадигмы в выборе цемента, расширяя применение таких материалов, как RMGIC или даже традиционные GIC, в случаях, где ранее они считались недостаточно эффективными.

Вместе с тем данное исследование имеет ряд ограничений. Эксперименты проводились в контролируемых лабораторных условиях, а прочность соединения оценивалась в статической среде. Хотя испытания на сдвиг широко применяются благодаря простоте и воспроизводимости, они моделируют однонаправленную статическую нагрузку и не воспроизводят сложную многовекторную циклическую нагрузку, возникающую в полости рта. Кроме того, концентрация напряжений в зоне приложения нагрузки может приводить к преждевременному разрушению, потенциально занижая истинные показатели межфазной прочности. Дополнительно такие факторы, как термостерилирование и механическая усталость, могут существенно влиять на долговременную стабильность адгезионного соединения. Следовательно, несмотря на ценность испытаний на сдвиг для сравнительной оценки методов обработки поверхности, интерпретация результатов должна осуществляться с осторожностью.

Учитывая, что УФ-фотофункционализация повышала не только предел текучести, но и модуль упругости и межфазную энергию, можно ожидать улучшения устойчивости к усталостному расщеплению. Тем не менее для подтверждения этого предположения будущие исследования должны включать термостерилирование, усталостные испытания и протоколы искусственного старения, более точно моделирующие сложные условия полости рта. Кроме того, в настоящем исследовании оценивали лишь один класс титана и один тип цемента; применимость УФ-активации к другим фиксирующим материалам (например, смоляным цементам, поликарбоксилатным цементам) и различным титановым сплавам (например, Ti-6Al-4V) требует дополнительного изучения. Ещё одним важным аспектом является временная нестабильность гидрофильности, индуцированной УФ-обработкой: она постепенно снижается вследствие повторной адсорбции углеводородов на поверхности («биологическое старение») [33,36]. В данном исследовании фиксация и анализ поверхности выполнялись сразу после УФ-обработки, что соответствует стандартной практике, когда адгезия осуществляется непосредственно после подготовки поверхности. Однако для клинического применения могут потребоваться немедленная фиксация после обработки или хранение в среде, защищенной от УФ-индуцированной повторной контаминации; дальнейшие исследования должны оценить временные эффекты возможной повторной контаминации в реальной клинической практике.

5. Заключение

Данное исследование продемонстрировало, что УФ-фотофункционализация значительно улучшает адгезионные характеристики между титаном и RMGIC за счет снижения содержания поверхностного углерода и повышения гидрофильности. Эти изменения приводят к выраженному увеличению прочности соединения и межфазной энергии, превосходящему эффект, достигаемый при традиционной пескоструйной обработке. Наблюдаемый синергетический эффект при сочетании с механическим шерохованием дополнительно подтверждает клинический потенциал УФ-обработки в качестве простого неинвазивного метода усиления адгезии между титаном и RMGIC в ортопедической и имплантационной стоматологии.

Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии известных конкурирующих финансовых интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, описанную в настоящей статье.

Благодарность

Данная работа выполнена при поддержке «ДИО Корпорейшн». Авторы выражают благодарность компании World Lab США (Ирвайн, Калифорния) за изготовление деталей, необходимых для механических испытаний.

Список используемых источников

- 1] Уно М., Хаяси М., Озава Р., Сарута Д., Ишигами Х., Огава Т. Механическая ретенционная способность титана в зависимости от морфологии поверхности и топографических параметров. Журнал стоматологии и биологии полости рта 2020; 5:1163.
- 2] Уно М., Озава Р., Хамадзима К., Сарута Д., Ишигами Х., Огавас Т. Вариативность способности титановых поверхностей с различной топографией удерживать остеоциты. Журнал стоматологии и биологии полости рта 2020; 5:1169.
- 3] Кям К., Иркайек А., Вангаева Е., Эль-Хомси Ф. Сравнение циркониевых коронок, подвергнутых пескоструйной обработке, шлифованию и расплавному травлению, по показателям прочности адгезии к смоляному цементу. Исследования в области биоматериалов в стоматологии 2019; 6:1-5. <https://doi.org/10.1080/23337931.2019.1621179>.
- 4] Хата К., Комагата Ю., Нагамура Ю., Масаки С., Хосокава Р., Икеда Х. Прочность адгезионного соединения пескоструйно обработанного РЕЕК со стоматологическим цементом на основе метилметакрилата или композитным смоляным цементом. Полимеры 2023; 15. <https://doi.org/10.3390/polym15081830>.
- 5] Ре Д., Аугустин Д., Аугустин Г., Джованнетти А. Ранняя прочность адгезионного соединения с цирконием, подвергнутым пескоструйной обработке при низком давлении: оценка самоадгезивного цемента. Европейский журнал эстетической стоматологии 2012; 7:164-75.
- 6] Эмерсон Дж. С., Джонсон Г. Х., Кронстроме М. Х. Сравнение фиксации монолитных циркониевых коронок с внутренней поверхностью, обработанной и не обработанной абразивными частями оксида алюминия, при использовании трёх различных цементов: клиническое моделирование. Журнал ортопедической стоматологии 2024; 13:100 e1-5. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2023.09.018>.
- 7] Шён Д., Ван Х., Шн И., Су З., Ханни М., Фус Б. Влияние обработки поверхности на прочность и долговечность соединения диоксида циркония. Журнал функциональных биоматериалов 2023; 14. <https://doi.org/10.3390/jfb14020089>.
- 8] Арифадас С.А. Влияние размера частиц оксида алюминия на прочность адгезионного соединения между самополимеризующейся акриловой смолой и коммерчески чистым титаном. Журнал ортопедической стоматологии 2019; 28:466-70. <https://doi.org/10.1111/jopr.12607>.
- 9] Абн-Рашед Ф.О., Мартинс С.Б., Кампос Х.А., Фонсека Р.Г. Оценка шероховатости, смачиваемости и морфологии поликристаллической керамики из тетрагонального диоксида циркония, стабилизированного оксидом иттрия, после различных протоколов абразивной обработки воздушными частицами. Журнал ортопедической стоматологии 2014; 11:1385-91. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2014.07.005>.
- 10] Джамель Р.С., Нанф М.М., Абдуллас М.А. Влияние различных методов обработки поверхности никель-хромового сплава и типов мономеров металлического праймера на прочность сцепления полимерного цемента при растяжении. Журнал стоматологии Саудовской Аравии 2019; 31:343-9. <https://doi.org/10.1016/j.sdent.2019.03.006>.
- 11] Антониадис М., Керн М., Струбе Дж. Р. Влияние нового металлического праймера на прочность сцепления между полимерным цементом и двумя сплавами высоkobлагородных металлов. Журнал ортопедической стоматологии 2000; 84:554-60. <https://doi.org/10.1067/mp.2000.109986>.
- 12] Калра С., Харсан В., Калрас Н.М. Сравнительная оценка влияния металлического праймера и пескоструйной обработки на прочность адгезионного соединения при сдвиге между термоотверждаемой акриловой базисной смолой для зубных протезов и кобальт-хромовым сплавом: исследование *in vitro*. Современная клиническая стоматология 2015; 6:386-91. <https://doi.org/10.4103/0976-237X.161895>.
- 13] Пюдлер С., Гозль П., Кар С., Бхаттачарья Дж. Исследование влияния использования металлического праймера на адгезию термоотверждаемой акриловой смолы к литому титану: исследование *in vitro*. Журнал Индийского общества ортопедической стоматологии 2014; 14:262-72. <https://doi.org/10.1007/s13191-013-0323-1>.
- 14] Ньусом Д., Юшк А., Кларк Р.К., Рэзфорд Д.Р. Исследование влияния металлического праймера и топографии поверхности на прочность адгезионного соединения при растяжении между кобальт-хромовым сплавом и композитной смолой. Европейский журнал ортопедической и реставрационной стоматологии 2011; 19:43-8.
- 15] Фрейтас А.П., Франсисконне П.А. Влияние металлического праймера на прочность адгезионного соединения на границе раздела смола-металл. Журнал прикладных наук в области оральной медицины 2004; 12:113-6. <https://doi.org/10.1590/s1678-7752004000200006>.
- 16] Любас М., Ясиньски Й. Й., Завада А., Пшерадас И. Влияние пескоструйной обработки и химического травления на прочность адгезионного соединения между титаном 99,2 и стоматологическим фарфором. Материалы 2021; 15. <https://doi.org/10.3390/ma14010116>.
- 17] Чн П. Дж., Лю С. М., Хуан С. М., Ван Дж. С., Хун С. С., Чен В. С. Оценка выживаемости сколов металлокерамических коронок с поверхностью, обработанной пескоструйным методом, и восстановленных композитной смолой после термической усталости *in vitro*. Журнал стоматологических наук 2023; 18: 1706-15. <https://doi.org/10.1016/j.jmbmb.2023.01.003>.
- 18] Фитова С., Джи П., Мертова К., Члуп З., Дучек М., Прохазка Р. и соавт. Усталостные характеристики стоматологического имплантата из ультрамелкозернистого титана класса 2 по сравнению с традиционно испытываемыми гладкими образцами. Журнал механического поведения биомедицинских материалов 2021; 123:104715. <https://doi.org/10.1016/j.jmbmb.2021.104715>.
- 19] де Кок П., Перейра Г.К.Р., Фрага С., де Ягер Н., Венгурини А.Б., Клевеландс К.Дж. Влияние внутренней шероховатости и сцепления на сопротивление разрушению и структурную надежность керамики на основе диоксида лития. Стоматологические материалы 2017; 33:1416-25. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2017.09.018>.
- 20] Шемтов-Йона К., Риттельс Д. О механической целостности извлеченных зубных имплантатов. Журнал механического поведения биомедицинских материалов 2015; 49:290-9. <https://doi.org/10.1016/j.jmbmb.2015.05.014>.
- 21] Шемтов-Йона К., Риттельс Д., Дорогойс А. Механическая оценка обработки поверхности зубных имплантатов пескоструйным методом. Журнал механического поведения биомедицинских материалов 2014; 39: 375-90. <https://doi.org/10.1016/j.jmbmb.2014.07.027>.
- 22] Дэль Пива А.М.О., Трибст Дж.П.М., Венгурини А.Б., Анами Л.К., Бонфанте Э.А., Боттино М.А. и соавт. Вероятность выживаемости керамики на основе литий-силиката, армированной цирконием: влияние состояния поверхности и профиля нагрузки при усталостных испытаниях. Стоматологические материалы 2020; 36:808-15. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2020.03.029>.
- 23] Мурильо-Гомес Ф., Эрнандес-Викес Х.Р., Сауза-Монтес де Ока Х.Р., Варгас-Варгас С., Гонсалес-Варгас Н., Вера-Болди Дж. Р. и соавт. Механические, адгезионные и поверхностные свойства цирконий-армированной литий-силикатной CAD/CAM-керамики при применении различных протоколов травления. Материалы 2024; 17. <https://doi.org/10.3390/ma17205039>.
- 24] Коминь Ф., Кимура Ф., Кубочи К., Такано Р., Накае Д., Мацумура С. Влияние методов шероховатости поверхности и праймирующих агентов на прочность адгезионного соединения при сдвиге между CAD/CAM-материалами и циркониевыми каркасами. Журнал стоматологических материалов 2021; 40:664-73. <https://doi.org/10.4012/dmj.2020-175>.
- 25] Се Х., Чен С., Дай В., Чен Г., Чжан Г. Краткосрочная адгезионная эффективность циркония после горячего кислотного травления и праймерного кондиционирования *in vitro*. Журнал стоматологических материалов 2013; 32:928-38. <https://doi.org/10.4012/dmj.2013-010>.
- 26] Собути Ф., Арьяна М., Дадгар С., Ализаде Наваи Р., Рахшан В. Влияние новых по сравнению с традиционными методов обработки поверхности фарфора на прочность адгезионного соединения ортодонтических брекетов при сдвиге: систематический обзор и метаанализ. Международный журнал биомедицинских исследований 2022; 2022:8246980. <https://doi.org/10.1155/2022.8246980>.
- 27] Пе С. В., Пак Ю. Б., Мун Х. С., Ли Дж. Х., Огава Т. Фотофункционализация усиливает контакт между костью и имплантатом, динамику межкостного остеогенеза, формирование маргинального костного уплотнения и показатель крутящего момента отвинчивания имплантатов: экспериментальное исследование на нижней челюсти собак. Имплантационная стоматология 2013; 22: 666-75. <https://doi.org/10.1097/ID.0000000000000003>.
- 28] Хирота М., Озава Т., Иван Т., Огава Т., Тонаис И. Динамика развития стабильности фотофункционализованных имплантатов, установленных в стандартных и сложных клинических случаях: исследование «случай-контроль». Международный журнал стоматологических и челюстно-лицевых имплантатов 2016; 31:676-86. <https://doi.org/10.11607/jomi.4115>.
- 29] Икеда Т., Хагивара Ю., Хирота М., Табути М., Ямада М., Сугита Ю. и соавт. Влияние фотофункционализации на наноструктурированный титан, обработанный фторидом. Журнал применения биоматериалов 2014; 28:1200-12. <https://doi.org/10.1177/0885328213501566>.
- 30] Китадзима Х., Огавас Т. Использование фотофункционализованных имплантатов в случаях низкой или крайне низкой первичной стабильности. Международный журнал стоматологических и челюстно-лицевых имплантатов 2016; 31: 439-47. <https://doi.org/10.11607/jomi.4054>.
- 31] Мацуура Т., Комацу К., Ченг Дж., Парк Г., Огавас Т. За пределами микрошероховатости: новые подходы к управлению активностью остеообластов на поверхностях имплантатов. Международный журнал имплантационной стоматологии 2024; 10:35. <https://doi.org/10.1186/s40729-024-00554-x>.
- 32] Комацу К., Мацуура Т., Огавас Т. Достижение полного покрытия коллагеном, продуцируемым человеческими десневыми фибробластами, на абатментах имплантатов посредством вакуумной ультрафиолетовой (ВУФ) фотофункционализации. Международный журнал стоматологических и челюстно-лицевых имплантатов 2024; 0:1-32. <https://doi.org/10.11607/jomi.10957>.
- 33] Парк Г., Мацуура Т., Комацу К., Огавас Т. Оптимизация остеointegrации имплантатов, реакции мягких тканей и подавления бактерий: всесторонний обзор многогранного подхода к УФ-фотофункционализации титана. Журнал исследований в области ортопедической стоматологии 2024. https://doi.org/10.2186/jpr.JPR_D_24_00086.
- 34] Китадзима Х., Хирота М., Комацу К., Исоно Х., Мацуура Т., Мицуо К. и соавт. Обработка титановых микроволновыми каркасами ультрафиолетовым излучением усиливает привлечение остеообластов и остеокондуктивность в модели вертикальной костной аугментации: 3D УФ-фотофункционализация. Клетки 2023; 12:19.
- 35] Огавас Т. УФ-фотофункционализация титановых имплантатов. Инженерия тканей полости рта и челюстно-лицевой области 2012; 2:151-8.
- 36] Атт В., Огава Т. Биологическое старение поверхности имплантатов и её восстановление с помощью обработки ультрафиолетовым излучением: новое понимание механизма остеointegrации. Международный журнал стоматологических и челюстно-лицевых имплантатов 2012; 27:753-61.
- 37] Исканья Т., Веа Х., Кида К., Морой Х., Китадзима Х., Огавас Т. Восстановление оптимальной эстетики в сложных клинических ситуациях с использованием междисциплинарной стратегии в сочетании с передовыми методами и технологиями регенеративной медицины. Журнал косметической стоматологии 2014; 29:60-72.
- 38] Судзумура Т., Мацуура Т., Комацу К., Огавас Т. Разложение органических молекул на титане с помощью вакуумного ультрафиолетового излучения для эффективной и быстрой фотофункционализации. Журнал функциональных биоматериалов 2022; 14. <https://doi.org/10.3390/jfb14010011>.
- 39] Судзумура Т., Мацуура Т., Комацу К., Огавас Т. Новый метод фотофункционализации с использованием высокоэнергетического вакуумного ультрафиолетового излучения для разложения органических молекул на поверхности титана. Международный журнал молекулярных наук 2023; 24. <https://doi.org/10.3390/jms24031978>.
- 40] Фунато А., Морон Х., Огавас Т. Направленная костная регенерация с использованием корней зубов с периодонтальной связью: клинические случаи немедленного и этапного подходов к имплантологическому лечению. Международный журнал эстетической стоматологии 2022; 17:276-91.
- 41] Хирота М., Сугита Ю., Исидзима М., Икеда Т., Сарута Дж., Маэда Х. и соавт. УФ-фотокаталитическая активность поверхности диоксида титана (TiO2), загрязненной бактериальной биофилмой: последствия для фотовосстановления остеокондуктивности. Передовые достижения в материаловедении 2021; 12.
- 42] Отани Т., Фудзисима А. Фотозлектрохимические свойства фотокатализатора TiO2 и его применение для очистки окружающей среды. Журнал фотохимии и фотобиологии С: 2012; 13:247-62. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochemrev.2012.07.001>.
- 43] Ямада М., Мицуки Т., Ямамото А., Иваса Ф., Такеучи М., Анно М. и соавт. Повышение прочности сцепления и ключевой жесткости остеообластов на зеркально отполированной титановой поверхности при помощи УФ-фотофункционализации. Труды по биоматериаловедению 2010; 6: 4578-88. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2010.07.010>.
- 44] Аита Х., Атт В., Уно Т., Ямада М., Хори Н., Иваса Ф. и соавт. Фотофункционализация титана с помощью ультрафиолетового излучения способствует миграции, прикреплению, пролиферации и дифференцировке мезенхимальных стволовых клеток человека. Труды по биоматериаловедению 2009; 5: 3247-57. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2009.04.022>.
- 45] Иваса Ф., Хори Н., Уно Т., Минамикава Х., Ямада М., Огавас Т. Усиление адгезии остеообластов к титану после УФ-фотофункционализации посредством электростатического механизма. Биоматериалы 2010; 31:2717-27. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2009.12.024>.
- 46] Сугита Ю., Хонда Й., Като И., Кубо К., Маэда Х., Огавас Т. Роль фотофункционализации в сокращении нарушений остеointegrации, связанных с диабетом 2 типа у крыс. Международный журнал стоматологических и челюстно-лицевых имплантатов 2014; 29:1293-300. <https://doi.org/10.11607/jomi.3480>.
- 47] Хори Н., Уно Т., Судзуки Т., Ямада М., Атт В., Окада С. и соавт. Обработка ультрафиолетовым излучением для восстановления возрастной деградации биоктивности титана. Международный журнал стоматологических и челюстно-лицевых имплантатов 2010; 25:49-62.
- 48] Судзуки Т., Хори Н., Атт В., Кубо К., Иваса Ф., Уно Т. и соавт. Обработка ультрафиолетовым излучением позволяет преодолеть возрастное разрушение биоктивности титана. Инженерия тканей. Часть А 2009; 15:3679-88. <https://doi.org/10.1089/ten.TEA.2008.0568>.
- 49] Уно Т., Ямада М., Хори Н., Судзуки Т., Огавас Т. Влияние ультрафиолетовой фотокатактики титана на остеointegratio в модели на крысах. Международный журнал стоматологических и челюстно-лицевых имплантатов 2010; 25:287-94.
- 50] Уно Т., Ямада М., Судзуки Т., Минамикава Х., Сато Н., Хори Н. и соавт. Улучшение профиля интеграции кости и титана с помощью УФ-фотофункционализации в модели заживления щели. Биоматериалы 2010; 31:1546-57. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2009.11.018>.
- 51] Мацуура Т., Комацу К., Судзумура Т., Ставр С., Хуанатас М.Л., Парк В. и соавт. Улучшенная функциональность и миграция фибробластов десны человека на титане, обработанном вакуумным ультрафиолетовым излучением: роль в снижении клеточного стресса и улучшении клеточной реакции вокруг имплантата. Журнал исследований в области ортопедической стоматологии 2025; 69:249-58. https://doi.org/10.2186/jpr.JPR_D_24_00071.
- 52] Комацу К., Мацуура Т., Огавас Т. Достижение полного покрытия коллагеном, продуцируемым человеческими десневыми фибробластами, на абатментах имплантатов посредством вакуумной ультрафиолетовой (ВУФ) фотофункционализации. Международный журнал стоматологических и челюстно-лицевых имплантатов 2025; 40:229-40. <https://doi.org/10.11607/jomi.10957>.
- 53] Икеда Т., Уно Т., Сарута Дж., Хирота М., Парк В., Огавас Т. Обработка титана ультрафиолетовым излучением для улучшения адгезии и удержания соединительной ткани и фибробластов слизистой оболочки полости рта. Международный журнал молекулярных наук 2021; 22. <https://doi.org/10.3390/jms22212396>.
- 54] Окубо Т., Икеда Т., Сарута Дж., Цукимира Н., Хирота М., Огавас Т. Нарушение прикрепления эпителиальных клеток после полировки титановой поверхности и его восстановление с помощью УФ-обработки. Материалы 2020; 13. <https://doi.org/10.3390/ma13183946>.
- 55] Нахан К., Исидзима М., Икеда Т., Гассеми А., Сарута Дж., Огавас Т. Обработка титана ультрафиолетовым излучением улучшает прикрепление, адгезию и удержание клеток эпителии полости рта человека за счет декарибонизации. Материалы 2020; 14. <https://doi.org/10.3390/ma14010151>.
- 56] Комацу К., Чао Д., Мацуура Т., Кидо Д., Огавас Т. Развитие исследований остеointegrации: динамическая трехмерная (3D) модель культивирования *in vitro* для зубных имплантатов. Журнал стоматологических наук 2025; 20:350-60. <https://doi.org/10.1016/j.jmbmb.2024.06.018>.
- 57] Атт В., Хори Н., Такеучи М., Оуян Дж., Ян Й., Анно М. и соавт. Зависимая от времени деградация остеокондуктивности титана: следствие биологического старения имплантационных материалов. Биоматериалы 2009; 30:5352-63. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2009.06.040>.
- 58] Атт В., Хори Н., Иваса Ф., Ямада М., Уно Т., Огавас Т. Влияние УФ-фотофункционализации на биоктивность титановых и хром-кобальтовых сплавов в зависимости от времени. Биоматериалы 2009; 30:4268-76. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2009.04.048>.
- 59] Морра М., Кассинелли Ч., Брузоно Г., Карпи А., Ди Санни Г., Джардино Р. и соавт. Поверхностные химические эффекты топографической модификации поверхностей титановых зубных имплантатов: 1. Анализ поверхности. Международный журнал стоматологических и челюстно-лицевых имплантатов 2003; 18:40-5.
- 60] Масаро С., Ротоло П., Де Риккардис Ф., Милелла Э., Наполи А., Виланд М. и соавт. Сравнительное исследование поверхностных свойств коммерческих титановых зубных имплантатов. Часть I: химический состав. Журнал материаловедения: материалы в медицине 2002; 13: 535-48. <https://doi.org/10.1023/A:1015170625506>.
- 61] Паз А., Ким С.С., Ким Х.С., Бус Й.Х. Прикрепление и пролиферация остеообластоподобных клеток на точечных, пескоструйно обработанных и анодированных титановых поверхностях. Международный журнал стоматологических и челюстно-лицевых имплантатов 2011; 26:475-81.

- [62] Рупп Ф., Шайделер Л., Эйхлер М., Гаис-Герсторферс Й. Смачивающее поведение зубных имплантатов. Международный журнал стоматологических и челюстно-лицевых имплантатов 2011; 26:1256-66.
- [63] Кидо Д., Комацу К., Судзумура Т., Мацуура Т., Ченг Дж., Ким Дж. и соавт. Влияние поверхностных загрязнений и углеводородной пленки на результаты измерений смачиваемости титана. Международный журнал молекулярных наук 2023; 24. <https://doi.org/10.3390/jms241914688>.
- [64] Ли Дж. Х., Огава Т. Биологическое старение титановых имплантатов. Имплантология 2012; 21:415-21. <https://doi.org/10.1097/ID.0b013e31826a51f4>.
- [65] Анта Х., Хори Н., Такеучи М., Судзуки Т., Ямада М., Анно М. и соавт. Влияние функционализации титана ультрафиолетовым излучением на интеграцию с костной тканью. Биоматериалы 2009; 30:1015-25. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2008.11.004>.
- [66] Мацуура Т., Комацу К., Судзумура Т., Ставр С., Хуанатас М.Л., Парк В. и соавт. Улучшенная функциональность и миграция фибробластов десны человека на титане, обработанном вакуумным ультрафиолетовым излучением: роль в снижении клеточного стресса и улучшении клеточной реакции вокруг имплантата. Журнал исследований в области ортопедической стоматологии 2024. https://doi.org/10.2186/jpr.JPR_D_24_00071.
- [67] Судзумура Т., Магукура Т., Комацу К., Сугита Ю., Маэда Х., Огава Т. Вакуумная ультрафиолетовая (ВУФ) фотофункционализация с целью индукции трансмиграции фибробластов в ротовой полости человека на диоксиде циркония. Клетки 2023; 12:2542.
- [68] Атт В., Такэути М., Судзуки Т., Кубо К., Анно М., Огава Т. Усиление функции остеобластов на цирконии, обработанном ультрафиолетовым излучением. Биоматериалы 2009; 30:1273-80.
- [69] Минимикава Х., Икеда Т., Атт В., Хагивара И., Хирота М., Табути М. и соавт. Фотофункционализация повышает биоактивность и остеокондуктивность титанового сплава Ti6Al4V. Журнал исследований биомедицинских материалов 2014; 102:3618-30. <https://doi.org/10.1002/jbm.a.35030>.
- [70] Табути М., Икеда Т., Хирота М., Накагава К., Парк В., Миядзава К. и соавт. Влияние УФ-фотофункционализации на биологические и фиксирующие свойства ортодонтических мини-винтов. Международный журнал стоматологических и челюстно-лицевых имплантатов 2015; 30:868-79. <https://doi.org/10.11607/jomi.3994>.
- [71] Табути М., Икеда Т., Накагава К., Хирота М., Парк В., Миядзава К. и соавт. Фотофункционализация ультрафиолетовым излучением повышает значения крутящего момента удаления и горизонтальную стабильность ортодонтических мини-винтов. Американский журнал ортодонтии и зубочелюстной ортопедии 2015; 148:274-82. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2015.03.022>.
- [72] Науманн М., Шольц П., Кройе Й., Швендце Ф., Шгерценбах Г., Хампе А. Монолитные гибридные абатмент-коронки (с винтовой фиксацией) в сравнении с монолитными гибридными абатментами с адгезивно фиксированными монолитными коронками. Клинические исследования в области оральной имплантологии 2023; 34:209-20. <https://doi.org/10.1111/clr.14031>.
- [73] Чжан М., Хо Д.К.Л., Пелекос Г., Фокс М.Р. Клинические результаты применения коронок на основе гибридных абатментов с опорой на имплантаты: систематический обзор и метаанализ. Журнал исследований в области ортопедической стоматологии 2024; 68:63-77. https://doi.org/10.2186/jpr.JPR_D_22_00279.
- [74] Хори Н., Атт В., Уэно Т., Сато Н., Ямада М., Саруватари Л. и соавт. Зависимая от возраста деградация способности титана к адсорбции белков. Журнал стоматологических исследований 2009; 88: 663-7. <https://doi.org/10.1177/0022034509339567>.
- [75] Гао Й., Линь Х., Чжао Й., Сой С., Лай К., Го Цз. и соавт. Очищающий эффект фотокатализа нанопроволок TiO₂-анатаза на биологическую активность титановой поверхности. Международный журнал наномедицины 2020; 15:9639-55. <https://doi.org/10.2147/IJN.S275373>.
- [76] Гао Й., Лю Й., Чжоу Л., Го Ч., Жун М., Лю С. и соавт. Влияние УФ-фотофункционализации с различной длиной волны на титан, подвергнутый микродуговому окислению. PLoS ONE (Первая Публичная Научная Библиотека) 2013; 8:e68086. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0068086>.
- [77] Буно Н., Понти Ф., Пунта К., Кандианне Г. Влияние УФ-излучения и фотокатализа с использованием TiO₂ на бактерии и вирусы в воздухе: обзор. Материалы 2021; 14. <https://doi.org/10.3390/ma14051075>.
- [78] Фу П., Ма Й., Лей Б., Ли Г., Линс С. **Разложение труднорастворимого анилин-аэрофлотного собирателя в водном растворе методом озонной/вакуумной УФ-обработки (О₂/ВУФ). Экологические технологии 2021; 42:659-70. <https://doi.org/10.1080/09593330.2019.1642389>.
- [79] Чжан Л., Ли П., Гун Ч., Лис Х. Фотокаталитическая деградация полициклических ароматических углеводородов на поверхности почвы с использованием TiO₂ под УФ-излучением. Журнал опасных материалов 2008; 158:478-84.
- [80] Такеучи М., Мартра Г., Колучни С., Аннос М. Проверка фотоадсорбции молекул H₂O на полупроводниковых поверхностях TiO₂ посредством колебательной адсорбционной спектроскопии. Журнал физической химии С 2007; 111:9811-7.
- [81] Такеучи М., Мартра Г., Колучни С., Аннос М. Исследования структуры кластеров H₂O, адсорбированные на поверхности TiO₂ методом ближнеинфракрасной адсорбционной спектроскопии. Журнал физической химии В 2005; 109:7387-91.
- [82] Такеучи М., Сакамото К., Мартра Г., Колучни С., Аннос М. Механизм фотониндированной супергидрофильности на поверхности фотокатализатора TiO₂. Журнал физической химии В 2005; 109:15422-8.
- [83] Чжун Б., Чжан И., Чжао Ц., Чен Л., Ли Д., Танс Ц. УФ-облучение улучшает прочность сцепления полимерного цемента с волоконными штифтами. Журнал стоматологических материалов 2011; 30:455-60. <https://doi.org/10.4012/dmj.2010-179>.
- [84] Исикава К., Ямаути М., Тичи А., Икеда М., Уэно Т., Вакабаша Н. и соавт. Фотофункционализация непрямым реставрационным материалам с помощью УФ-излучения улучшает сцепление с цементующим материалом на основе смолы. Международный журнал биомедицинских исследований 2021; 2021:9987860. <https://doi.org/10.1155/2021/9987860>.
- [85] Тан С.В., Такагичи А., Кадзима Й., Мохамед А., Нозаки К., Такахаши Х. и соавт. Влияние обработки ультрафиолетовым излучением на прочность сцепления при сдвиге между полиметилметакрилатом и кобальт-хром-молибденовым сплавом. Журнал стоматологических материалов 2023; 42: 748-55. <https://doi.org/10.4012/dmj.2023-058>.
- [86] Чандак М.Г., Паттанаик Н., Дасс А. Сравнительное исследование для оценки прочности сцепления RMGIC с композитной смолой при сдвиге с использованием различных адгезивных систем. Современная клиническая стоматология 2012; 3:252-5. <https://doi.org/10.4103/0976-237X.103613>.
- [87] Арора В., Кундабала М., Паролия А., Томас М.С., Паис В. Сравнение прочности сцепления RMGIC с композитной смолой при использовании различных адгезивных систем: исследование *in vitro*. Журнал консервативной стоматологии 2010; 13:80-3. <https://doi.org/10.4103/0972-0707.66716>.
- [88] Пё С.В., Парк К., Дахер Р., Квон Х.Б., Хан Дж.С., Лис Дж.Х. Сравнение клинических результатов фиксации полнооклюзионных циркониевых протезов с использованием стеклономерного цемента, модифицированного смолой, и самоклеящегося композитного цемента. Журнал стоматологии 2023; 135:104558. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2023.104558>.
- [89] Пурандлуш К., Шахраби М., Хейдари А., Хосейнпуре З.С. Прочность на сдвиг адгезионного соединения самоклеящегося текущего композита, традиционного текущего композита и стеклономерного цемента, модифицированного смолой, с первичным дентином. Передовые исследования в стоматологии 2019; 16:62-8. <https://doi.org/10.18502/rid.v16i1.1111>.
- [90] Борузинат А., Гаранс С. Прочность сцепления между композитной смолой и модифицированным стеклономерным полимером при использовании различных адгезивных систем и методов отверждения. Журнал консервативной стоматологии 2014; 17:150-4. <https://doi.org/10.4103/0972-0707.128055>.
- [91] Атт В., Ямада М., Кодзима Н., Огава Т. N-ацетилцистеин предотвращает подавление функции оральных фибробластов на полиметилметакрилатной смоле. Труды по биоматериаловедению 2009; 5: 391-8.
- [92] Минимикава Х., Ямада М., Иваса Ф., Уэно Т., Джая Й., Судзуки К. и соавт. Детоксикация и функционализация стоматологического реставрационного материала двойного отверждения, опосредованные производным аминокислоты, для стимуляции минерализации клеток пульпы зуба. Биоматериалы 2010; 31: 7213-25. ([https://doi.org/S0142-9612\(10\)00750-7](https://doi.org/S0142-9612(10)00750-7) [pii]10.1016/j.biomaterials.2010.06.018).
- [93] Ямада М., Кодзима Н., Паранджле А., Атт В., Анта Х., Джеветт А. и соавт. Детоксикация смолы ПММА с использованием N-ацетилцистеина (НАС). Журнал стоматологических исследований 2008; 87:372-7.
- [94] Халил Р.Дж., Аль-Шаммас А.М.В. Микросдвиговая прочность адгезионного соединения нового фиксирующего цемента на основе стеклономерного цемента, модифицированного смолой (RMGIC), после функционализации ортофосфорным мономером с различными стоматологическими субстратами. Heliyon 2024; 10:e30851. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e30851>.