

А.А. Кулаков,
академик РАН, д.м.н., профессор

А.С. Каспаров,
к.м.н., хирург-стоматолог отделения
клинической и экспериментальной
имплантологии

Д.А. Порфенчук,
аспирант отделения клинической
экспериментальной имплантологии

И.С. Донской,
врач-стоматолог, хирург-ортопед

ЦНИИСиЧЛХ

Сравнительная оценка состава поверхности, формы дентального имплантата и результатов энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии

Резюме. В имплантологии последних лет большое значение придается первичной стабильности дентальных имплантатов, которая позволяет реализовывать протоколы ранней функциональной нагрузки, облегчающие жизнь пациента и оптимизирующие процесс интеграции. Для увеличения первичной стабильности применяются различные методы модификации поверхности имплантата. В своей работе мы приводим обзор основных данных литературы по дентальным имплантатам трех фирм: AstraTech, Thommen и Konmet, современные представления о биомеханике имплантатов, а также результаты проведенного нами рентгеновского спектроскопического исследования поверхностей имплантатов производства этих компаний. На основании полученных данных мы провели анализ связей между их структурой и свойствами.

Ключевые слова: имплантация, дентальный имплантат, остеоинтеграция, покрытие, функциональная нагрузка

Summary. In the implantology of recent years, great importance is attached to the primary stability of dental implants, which allows the implementation of early functional load protocols that facilitate the life of the patient and optimize the integration process. To increase the primary stability, various methods are used to modify the surface of the implant. In our work, we present a review of the main literature data on dental implants of three companies: AstraTech, Thommen and Konmet, modern ideas about the biomechanics of implants, as well as the results of our X-ray spectroscopic study of the implant surfaces produced by these companies. Based on the data obtained, we analyzed the relationships between their structure and properties.

Key words: implantation, dental implant, osseointegration, coating, functional load

Цель исследования — найти связь между структурой и свойствами дентальных имплантатов фирм AstraTech, Thommen и Конмет.

Задачи исследования:

- 1) на основании данных современной литературы выделить основные особенности имплантатов, улучшающие первичную стабильность;
- 2) выполнить краткий обзор литературы, посвященной имплантатам AstraTech, Thommen и Конмет;
- 3) провести энергодисперсионную рентгеновскую спектроскопию поверхности имплантатов AstraTech, Thommen и Конмет;
- 4) проанализировать наличие связей между результатами спектроскопии и описанными свойствами имплантатов исследуемых марок.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Поиск литературы для проведения анализа выполнен в базе данных Medline по ключевым словам «dental implants», «AstraTech», «Thommen», «surface modification», в базе данных Киберленинка по ключевым словам «Конмет» и «Дентальная имплантация»,

а также в поисковых системах «E-library» и «Google Scholar».

Исследование морфологии и состава проводилось с использованием аналитического комплекса на базе растрового электронного микроскопа высокого разрешения JSM-6460LV (JEOL, Япония) с системой рентгеноспектрального анализа EDX INCA Energy 300 (Oxford instruments) в Институте металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Основы биомеханики имплантатов

Между установкой дентальных имплантатов и значимой их остеоинтеграцией проходит несколько месяцев, в этот период удержание имплантата обеспечено только его механическим креплением к костной ткани, прочность которого называют первичной стабильностью. Даже если после имплантации он не подвергается функциональной нагрузке, первичная стабильность снижается со временем из-за этапа остеолитического разрушения окружающей ткани. Дополнительно первичную стабильность снижают воспалительные процессы, недостаточное

кровоснабжение и инфицирование раны. При достаточной стабильности может быть применена ранняя функциональная нагрузка, которая не только повышает качество жизни пациента, но также и способствует физиологическому распределению связей с костной тканью, обеспечивающих вторичную стабильность имплантата в периоде 3—4 месяцев.

Передача внешнего воздействия через соединение имплантата и протезной конструкции отличается от естественного напряжения, испытываемого зубами человека. Имплантат не имеет периодонтальных связок, гасящих механическое напряжение, в связи с чем локализованное давление может вызывать периимплантатный лизис костной ткани [19]. Для уменьшения искусственного напряжения в костной ткани реализуется несколько направлений адаптации имплантатом:

- Нагрузка по имплантату должна проходить строго в аксиальном направлении, что обеспечивается формой конструкции.
- Соединение между имплантатом и костной тканью должно быть достаточно прочным для предотвращения трения между корнем первого и веществом последней. Прочное соединение напрямую зависит от первичной и вторичной стабильности имплантата.

Влияние формы имплантата на возможность ранней функциональной нагрузки

Макроструктура и макротопография поверхности имплантата в первую очередь оказывают критическое влияние на его первичную стабильность. В современной практике используют имплантаты с внутрикостной частью цилиндрической, конической или конико-цилиндрической формы. Данные клинических и лабораторных исследований позволяют утверждать, что этот параметр не оказывает решающего действия на стабильность имплантата [20, 22]. Современные конструкции всех трех типов достаточно эффективны и сравнимы между собой. Небольшое число работ указывает на предпочтительность конических имплантатов в задней части верхней челюсти [4].

Макроскопические особенности структуры имплантата также включают в себя наличие крупных нарезок, их тип и предполагаемый способ введения в костную ткань. Макронарезки являются частым атрибутом современных имплантатов и имеют большое значение с точки зрения обеспечения первичной стабильности. Различные модели имплантатов могут иметь множество вариантов нарезки, сравнение которых между собой может быть затруднено. Общий план имплантации подразумевает тесное прижатие имплантата к костной ткани либо создание пустот различного размера, окружающих имплантат [10]. Каждый вариант имеет свои преимущества и недостатки. Отмечают, что плотно прикрепленные имплантаты изначально обладают большой первичной стабильностью, однако в последующем из-за некроза прилегающей ткани она снижается. Во втором случае имплантат хуже закреплен на первом этапе, но пустоты создают дополнительные

ячейки остеоинтеграции, укрепляющие связи с костной тканью [6].

Немедленная функциональная нагрузка — принцип, аналогичный современным тенденциям в других областях медицины, например — «fast track» хирургии. Преимущества ранней функциональной нагрузки дентальных имплантатов многочисленны, однако она несет повышенные риски развития осложнений и резорбции костных тканей. Данные клинических исследований указывают, что оптимальными для ранней функциональной нагрузки являются имплантаты с резьбой, большой площадью контакта с костной тканью, низкой мобильностью и дополнительно с микрорезьбой на шейке [13].

Влияние микроскопической структуры поверхности имплантата на остеоинтеграцию

Современные дентальные имплантаты для достижения оптимальных характеристик первичной и вторичной стабильности имеют множество улучшений поверхности на микроскопическом уровне: микрометровые шероховатости и нарезки, гидрофильные покрытия, наноструктурированные ячейки связывания молекул, биоактивные модификации. Все они в основном направлены на быстрое создание прочных связей между поверхностью имплантата, межклеточным костным матриксом и клеточными участниками остеоинтеграции [7].

Микроструктурирование поверхности направлено на увеличение общей площади имплантата. Кроме того, абсолютно гладкая поверхность неадгезивна для остеогенных клеток, а шероховатости запускают процесс остеоинтеграции [5]. Для увеличения числа шероховатостей поверхность обрабатывают абразивными материалами и кислотами. Лазерная абляция позволяет создавать микрокаверны запрограммированной структуры, а электрохимическое анодное окисление увеличивает толщину слоя диоксида титана с образованием пористой поверхности. Диаметр пор составляет 1,3—2 мкм, а средняя площадь шероховатости — 1 мкм² [3]. Кроме того, этот метод обработки позволяет модифицировать шейку имплантата, эффективная поверхность которой создает прикрепление слизистой [1]. Наноструктурирование является направленным созданием ячеек связывания для остеогенных клеток, размер которых соответствует величине макромолекул. Один из таких способов предполагает напыление частиц фосфата кальция размером от 20 до 100 нм, покрывающих до 50% поверхности имплантата [18].

Кроме микрорельефа на процессы остеоинтеграции огромное влияние оказывает гидрофильность/гидрофобность поверхности имплантата. Гидрофильные поверхности поддерживают конформацию белков межклеточного матрикса и лучше связываются с молекулами адгезии. При этом шероховатая поверхность титановых имплантатов сама по себе приобретает гидрофобные свойства. Из методов, применяемых для повышения гидрофильности имплантатов, чаще всего в литературе описывают гидроксидирование поверхности и ультрафиолетовое облучение [9].

Отдельного внимания заслуживает способ обработки поверхности шейки имплантата. Так как шейка расположена у наружного края костного отростка, эта область остеоинтеграции в наибольшей степени подвержена резорбции костной ткани. Различные методики обработки поверхности позволяют усилить остеоинтеграцию и предотвратить пришеечный остеолитизис, наиболее распространенными являются полировка и нанесение микронарезок [17]. Исследования сравнительной эффективности этих методов не позволяют выявить явных преимуществ одних способов обработки над другими. Показано, что значимо худшими показателями потери костной ткани характеризуются имплантаты с фестончатой поверхностью шейки даже по сравнению с гладкими вариантами [12]. Имплантаты с полированной шейкой, по-видимому, уступают в эффективности имплантатам с микронарезками, которые являются одним из лучших способов усиления остеоинтегративных процессов [22].

ОБЗОР ИМПЛАНТАТОВ

AstraTech

Системы имплантации (разрабатываются и производятся Dentsply Sirona Implants) различных версий используются в мировой клинической практике с 1985 г. Компания постулирует 4 основных преимущества своих имплантатов: коническое соединение имплантата и абатмента, микронарезки на шейке имплантата, уникальный соединительный контур имплантата и абатмента и интегративную поверхность. Последняя создается фторированием имплантата, при этом достигается средний уровень шероховатости. Также компания постулирует наличие наноструктурированной поверхности, обладающей высокими остеоинтегративными свойствами.

Имплантаты AstraTech прошли исследование во многих клинических испытаниях, пациенты с имплантированными старыми моделями находятся под наблюдением в течение длительного времени. Компания выпускает как стандартные (длиной 11 мм), так и укороченные имплантаты (длиной 6 мм) и узкие имплантаты (диаметр 3 мм). По данным клинических исследований, эффективность последних в условиях дефицита костной ткани значимо не отличается от полноразмерных моделей, что увеличивает область применения имплантатов [11]. Узкие имплантаты AstraTech могут быть использованы для протоколов ранней функциональной нагрузки, клиническое исследование С. Maiorana и соавт. показало сравнимые со стандартными данные выживаемости имплантатов и уровня потери костной ткани [15]. В исследовании D.W. Lee и соавт. уровень потери костной ткани через 3 года после имплантации был значимо ниже при использовании имплантатов AstraTech с микронарезками по сравнению с предыдущими системами имплантатов. Среднее значение потери костной ткани через 1, 2 и 3 года было в два раза ниже, составив 0,14, 0,21 и 0,24 мм соответственно [14].

Thommen

Система имплантатов Thommen производится компанией Thommen Medical на протяжении более 25 лет. Макроскопически имплантаты Thommen имеют конико-цилиндрическую форму либо параллельные стенки, крупную резьбу и стабилизационное кольцо для механического укрепления. Первичную стабильность также повышает режущая головка имплантата. Компания делает акцент на гидрофильных свойствах поверхности имплантата, которые должны способствовать оптимальным характеристикам остеоинтеграции. Гидрофильность достигается с помощью запатентованной компанией жидкости IniCell.

В нескольких клинических исследованиях показано, что имплантаты Thommen эффективны при использовании протоколов ранней нагрузки. А. Makowiecki и соавт. сравнили эффективность гидрофильных имплантатов при ранней и отложенной функциональной нагрузке при имплантации в заднюю часть нижней челюсти и не обнаружили статистически значимых отличий в выживаемости и потере костной ткани [16]. Исследования процесса остеоинтеграции высокогидрофильных имплантатов показали, что при ранней функциональной нагрузке, по данным резонансно-частотного анализа, ко второй неделе стабильность снижается с последующим увеличением. Полученные показатели стабильности оказались достаточно велики по сравнению с другими имплантатами и достаточны для успешной операции [8].

Конмет

Отечественная компания Конмет выпускает дентальные имплантаты с 1993 г. Ассортимент представлен титановыми цилиндрическими и коническими имплантатами диаметром от 3,4 до 4,5 мм и длиной от 8 до 16 мм. Винтовые имплантаты имеют шейку с высокой степенью полировки. Обработка поверхности проводится с помощью анодного окисления и других процедур наноформирования, в результате чего образуется наноструктурированная поверхность. Л.Р. Хасанова описывает результаты атомно-сканирующей микроскопии имплантатов Конмет. Сравнение с чистыми образцами наноструктурированного титана и другими имплантатами показало, что имплантаты Конмет обладают относительно низкой шероховатостью. Размах высоты в среднем составляет 32,6 нм против 250 нм у референтного материала, средняя квадратичная шероховатость — 4 нм против 29 нм [2].

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭНЕРГОДИСПЕРСИОННОЙ РЕНТГЕНОВСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

Выполнение спектроскопии позволило получить микрофотографии поверхности имплантатов и химический состав в заданных точках поверхности.

Спектральный анализ имплантата AstraTech Osseo Speed 4.0×6 мм показал выраженную многоуровневую шероховатость поверхности. Состав поверхности

Таблица 1. Спектральный состав поверхности имплантата AstraTech

Точка	Элемент, % масс.	
	O	Ti
1	9,70	90,30
2	47,09	52,91
3	46,64	53,36
4	6,54	93,46

представлен различными сочетаниями титана и оксида титана, более возвышенные участки, вероятно, содержат большую долю титана (содержание кислорода меньше 10%, точки 1 и 3), как и поверхность шейки имплантата (менее 7% кислорода в точке 4; рис. 1, табл. 1).

Поверхность имплантата Thommen SPI Element 4.0×8 мм визуально имеет более упорядоченное строение. Спектроскопия показала, что ее состав на 100% представлен титаном без кислорода как в рабочей части, так и в шейке (рис. 2). Анализ химического состава жидкости IniCell показал высокую концентрацию солей натрия (1,06 г/л), калия (0,003 г/л), кальция (0,012 г/л) и магния (0,0011 г/л), осмолярность которой существенно выше изотонического раствора.

Поверхность имплантатов Конмет 3,5×8 мм имеет более гладкое строение, рельеф по сравнению с другими исследованными имплантатами имеет меньший размер элементарной единицы. Спектроскопия показала наличия большого количества разнообразных химических элементов, что может быть связано с химической обработкой. На поверхности рабочей части углубленные элементы рельефа содержат около 50% титана, остальные 50% занимают углерод, кислород и примеси других элементов. Схожую картину наблюдали на поверхности шейки, а поверхностные элементы рабочей части в основном состоят из углерода и кислорода. Другие элементы представлены алюминием, натрием, танталом и таллием (рис. 3, табл. 2).

ОБСУЖДЕНИЕ

Структура дентальных имплантатов напрямую влияет на процесс остеоинтеграции, позволяя достичь большей первичной и вторичной стабильности, увеличить

Таблица 2. Спектральный состав поверхности имплантата Конмет

Точка	Элемент, % масс.						
	C	O	Na	Al	Ti	Ta	Pt
1	91,9	2,62	0,21	-0,09	1,67	2,77	0,91
2	31,28	10,50	0,06	5,91	52,02	1,43	-1,20
3	68,5	12,95	4,50	0,16	1,83	4,65	7,41
4	17,92	9,55	-0,08	4,47	69,8	0,91	-2,57

прочность соединения и улучшить долгосрочный прогноз имплантации. Большое значение имеет модификация поверхности, создающая дополнительные ячейки для прикрепления молекул адгезии. В связи с этим можно предположить, что наилучшие способы модификации поверхности связаны с благоприятными исходами имплантации. В наибольшей степени это может оказывать влияние на протоколы немедленной функциональной нагрузки, которые требуют большей первичной стабильности и ускорения остеоинтеграции.

Клинические исследования эффективности отдельных марок современных имплантатов, как правило, показывают их эффективность. Проведенная нами рентгеновская энергодисперсионная спектроскопия показала, что поверхность имплантатов, лидирующих на мировом рынке систем AstraTech и Thommen, состоит из чистого титана или его оксида и характеризуется высоким уровнем микроструктуры различной степени упорядоченности. В обоих случаях клинические исследования указывают на высокую эффективность как стандартной, так и имплантации с ранней функциональной нагрузкой. В связи с этим можно предположить, что микроструктурирование глубокого уровня играет в этом особую роль. Имплантаты Thommen в своем составе не имеют на поверхности оксида титана, но содержат в комплекте специальную жидкость, повышающую гидрофильность. Анализ состава этой жидкости выявил высокую концентрацию катионов, что не позволяет сделать заключение о причинах особых гидрофильных свойств конструкции. Имплантат Конмет не имеет столь же высокой структурированности, а поверхность его содержит соединения углерода и следы других металлов, что может быть следствием химической обработки. В открытом доступе нет крупных клинических исследований имплантатов

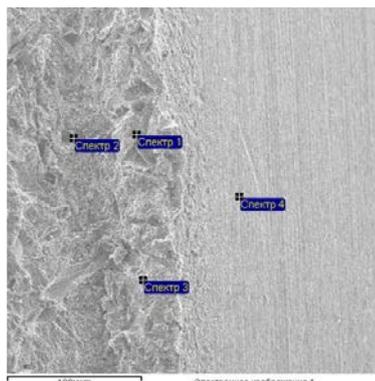


Рис. 1. Поверхность имплантата AstraTech

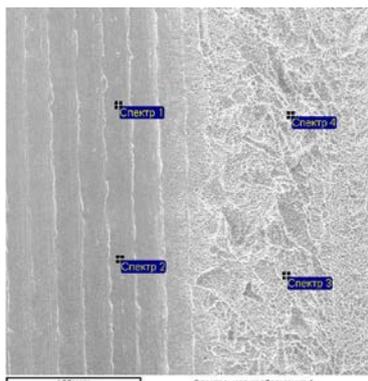


Рис. 2. Поверхность имплантата Thommen

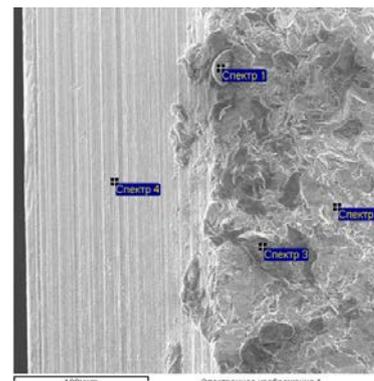


Рис. 3. Поверхность имплантата Конмет

этой системы, что не позволяет сделать выводы о роли химической обработки в обеспечении эффективности имплантации.

ВЫВОДЫ

1. Ведущую роль в обеспечении остеоинтеграции имплантата играет микроструктура его поверхности.
2. Имплантаты с высокой клинической эффективностью характеризуются микроструктурой и содержат только титан и его оксиды.

ЛИТЕРАТУРА:

1. **Старикова С.Л.** Влияние анодного окисления на пассивацию имплантата и протеза. — *Вестник проблем биологии и медицины*. — 2013; 1: 297—9.
2. **Хасанова Л.П.** Перспектива использования имплантатов из нанотитана в стоматологии. — *Медицинский вестник Башкортостана*. — 2010; 1: 62—4.
3. **Шубладзе Г.К.** Сравнение преимуществ анодированной поверхности имплантата с другими видами поверхностей. — *Медицинский алфавит*. — 2014; 13: 20—5.
4. **Alshehri M., Alshehri F.** Influence of implant shape (tapered vs cylindrical) on the survival of dental implants placed in the posterior maxilla: a systematic review. — *Implant Dent*. — 2016; 25 (6): 855—860.
5. **Buser D., Janner S.F., Wittneben J.G., Brägger U., Ramseier C.A., Salvi G.E.** 10-year survival and success rates of 511 titanium implants with a sandblasted and acid-etched surface: a retrospective study in 303 partially edentulous patients. — *Clin Implant Dent Relat Res*. — 2012; 14 (6): 839—51.
6. **Coelho P.G., Jimbo R., Tovar N., Bonfante E.A.** Osseointegration: hierarchical designing encompassing the micrometer, micrometer, and nanometer length scales. — *Dent Mater*. — 2015; 31 (1): 37—52.
7. **Dohan Ehrenfest D.M., Coelho P.G., Kang B.S., Sul Y.T., Albrektsson T.** Classification of osseointegrated implant surfaces: materials, chemistry and topography. — *Trends Biotechnol*. — 2010; 28 (4): 198—206.
8. **van Eekeren P., Said C., Tahmaseb A., Wismeijer D.** Resonance frequency analysis of thermal acid-etched, hydrophilic implants during first 3 months of healing and osseointegration in an early-loading protocol. — *Int J Oral Maxillofac Implants*. — 2015; 30 (4): 843—50.
9. **Funato A., Yamada M., Ogawa T.** Success rate, healing time, and implant stability of photofunctionalized dental implants. — *Int J Oral Maxillofac Implants*. — 2013; 28 (5): 1261—71.
10. **Le Guéhennec L., Soueidan A., Layrolle P., Amouriq Y.** Surface treatments of titanium dental implants for rapid osseointegration. — *Dent Mater*. — 2007; 23 (7): 844—54.
11. **Guljé F., Abrahamsson I., Chen S., Stanford C., Zadeh H., Palmer R.** Implants of 6 mm vs. 11 mm lengths in the posterior maxilla and mandible: a 1-year multicenter randomized controlled trial. — *Clin Oral Implants Res*. — 2013; 24 (12): 1325—31.
12. **den Hartog L., Meijer H.J.A., Vissink A., Raghoobar G.M.** Anterior single implants with different neck designs: 5 Year results of a randomized clinical trial. — *Clin Implant Dent Relat Res*. — 2017; 19 (4): 717—24.
13. **Lachmann S., Laval J.Y., Axmann D., Weber H.** Influence of implant geometry on primary insertion stability and simulated peri-implant bone loss: an in vitro study using resonance frequency analysis and damping capacity assessment. — *Int J Oral Maxillofac Implants*. — 2011; 26 (2): 347—55.
14. **Lee D.W., Choi Y.S., Park K.H., Kim C.S., Moon I.S.** Effect of microthread on the maintenance of marginal bone level: a 3-year prospective study. — *Clin Oral Implants Res*. — 2007; 18 (4): 465—70.
15. **Maiorana C., King P., Quaas S., Sondell K., Worsaae N., Galindo-Moreno P.** Clinical and radiographic evaluation of early loaded narrow-diameter implants: 3 years follow-up. — *Clin Oral Implants Res*. — 2015; 26 (1): 77—82.
16. **Makowiecki A., Botzenhart U., Seeliger J., Heineemann F., Biocev P., Dominiak M.** A comparative study of the effectiveness of early and delayed loading of short tissue-level dental implants with hydrophilic surfaces placed in the posterior section of the mandible—A preliminary study. — *Ann Anat*. — 2017; 212: 61—68.
17. **Niu W., Wang P., Zhu S., Liu Z., Ji P.** Marginal bone loss around dental implants with and without microthreads in the neck: A systematic review and meta-analysis. — *J Prosthet Dent*. — 2017; 117 (1): 34—40.
18. **Östman P.O., Wennerberg A., Ekstubb A., Albrektsson T.** Immediate occlusal loading of NanoTite™ tapered implants: a prospective 1-year clinical and radiographic study. — *Clin Implant Dent Relat Res*. — 2013; 15 (6): 809—18.
19. **Quaranta A., Piemontese M., Rappelli G., Sammartino G., Procaccini M.** Technical and biological complications related to crown to implant ratio: a systematic review. — *Implant Dent*. — 2014; 23 (2): 180—7.
20. **Valente M.L., de Castro D.T., Shimano A.C., Lepri C.P., dos Reis A.C.** Analysis of the influence of implant shape on primary stability using the correlation of multiple methods. — *Clin Oral Investig*. — 2015; 19 (8): 1861—6.
21. **Valles C., Rodriguez-Ciurana X., Nart J., Santos A., Galofre M., Tarnow D.** Influence of implant neck surface and placement depth on crestal bone changes around platform-switched implants: a clinical and radiographic study in dogs. — *J Periodontol*. — 2017; 88 (11): 1200—1210.
22. **Wilson T.G. Jr, Miller R.J., Trushkowsky R., Dard M.** Tapered Implants in Dentistry: Revitalizing Concepts with Technology: A Review. — *Adv Dent Res*. — 2016; 28 (1): 4—9.