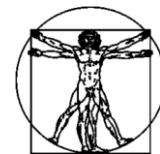


DOI: 10.15593/RZhBiomech/2020.2.08
УДК 531/534: [57+61]



**Российский
Журнал
Биомеханики**
www.biomech.ru

ЧИСЛЕННО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТОЛЩИНЫ ЦЕМЕНТНОГО СОЕДИНЕНИЯ ТРАНСДЕНТАЛЬНОГО ИМПЛАНТАТА С ТКАНЯМИ ЗУБА НА ЕГО АДГЕЗИОННЫЕ СВОЙСТВА

М.В. Джалалова¹, А.Г. Степанов²

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Российская Федерация, 119192, Москва, Мичуринский проспект, 1, e-mail: margarita-vd@mail.ru

² Московский государственный медико-стоматологический университет имени А.И. Евдокимова, Российская Федерация, 127473, Москва, ул. Делегатская, 20/1, e-mail: stepanovmd@list.ru

Аннотация. В ранее опубликованных работах авторов исследовалась адгезионная прочность при статической нагрузке на разрыв стоматологических цементных соединений индивидуального фрезерованного трансдентального имплантата с твердыми тканями корня зуба. На втором этапе исследовалось влияние искусственно сформированной шероховатости поверхности имплантатов на адгезионные свойства цементного соединения имплантат–зуб. Имплантаты подвергались пескоструйной обработке гранулами оксида алюминия размером 50, 150, 250 мкм – наилучшей оказалась искусственная шероховатость при обработке гранулами в 250 мкм. В настоящей работе представлен следующий этап исследований – влияние толщины цементного соединения «трансдентальный имплантат–цемент–дентин зуба» на его адгезионные свойства. Перед фрезерованием образцов трансдентальных имплантатов на цифровой модели проводили редуцию внутрикорневой части имплантата на 20, 50 и 100 мкм, подвергали пескоструйной обработке порошком оксида алюминия зерном 250 мкм и фиксировали в удаленном зубе цементы, наилучшим образом зарекомендовавшие себя в предыдущих исследованиях. Все испытания проводились на экспериментальной установке *Instron 5900*. Рассматривались имплантаты из диоксида циркония в сочетании с двумя наиболее эффективными цементами *Fuji-1* и *Multilink-N* (с наиболее высокими адгезионно-прочностными характеристиками). В результате экспериментов сочетание материала из диоксида циркония с цементом *Fuji-1* оказалось значительно лучше, чем с цементом *Multilink-N*. В работе проведено компьютерное моделирование процесса вытягивания прототипа циркониевого имплантата из образца корня зуба с различными толщинами цементной пленки: 20, 50 и 100 мкм. Получено удовлетворительное качественное и количественное согласование результатов трехмерного численного анализа с экспериментом: при уменьшении толщины цементной пленки от 100 до 20 мкм наблюдается улучшение свойств адгезионного соединения, а толщину 50 мкм можно считать оптимальной.

Ключевые слова: стоматологические цементы, индивидуальный трансдентальный имплантат, диоксид циркония, адгезионная прочность, толщина цементной пленки.

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на развитие медицины и особенно стоматологии, появление новых конструкционных материалов, ротационных технологий, ирригационных протоколов для эндодонтического лечения, количество хронических периодонтитов не уменьшается, а порой и увеличивается в некоторых регионах страны.

Современное решение обозначенной проблемы в ряде стран – это удаление зуба с последующей дентальной имплантацией. Однако наличие противопоказаний, связанных с недостатком костной ткани, наличием тяжелой сопутствующей соматической патологии, дороговизна и т.п. делают данную манипуляцию труднодоступной для ряда лиц.

Тем не менее пародонтологическое и эндодонтическое лечение, в том числе повторное, совершенствуется, а большинство пациентов настроено на сохранение своих зубов при обсуждении плана лечения.

С этой позиции зубосохраняющие операции являются достойной альтернативой дентальной имплантации. Следует отметить и недостатки указанных операций, основным из которых является нарушение целостности корня, а порой и полная его ампутация, вследствие чего нарушается несущая способность зуба, а использование его под опору несъемной ортопедической конструкции становится ограниченным или невозможным.

Наряду с успехами в области профилактики рецидивов воспаления в тканях пародонта и реставрационных технологий остается важнейший фактор – биомеханический, направленный на сохранение зуба, но способный перечеркнуть все усилия терапевтов и хирургов. Это в полной мере относится к зубам после резекции корня зуба и санации деструктивного очага, они становятся уязвимы для функциональной нагрузки, в связи с чем стоматологи-ортопеды не видят смысла сохранять такой зуб, если в дополнение ко всему необходимо восстанавливать разрушенную клиническую коронку.

Восстановление утраченных биомеханических свойств резецированного или ампутированного зуба решалось путем армирования зуба стандартными эндодонто-эндооссальными или трансдентальными имплантатами, полноценное использование которых ограничивалось у зубов с отсутствующей клинической коронкой, а также близостью естественных анатомических образований, таких как верхнечелюстной синус или нижнечелюстной канал.

Обозначенная проблема была частично решена с появлением современных стоматологических *CAD/CAM* технологий [8, 11, 24, 27], позволяющих получать прецизионные, повторяющие внутреннюю геометрию корневого канала и одновременно эстетичные конструкции, воспроизводить все планируемые параметры, использовать современные конструкционные материалы. Были предложены индивидуальные трансдентальные имплантаты, изготовленные из диоксида циркония методом компьютерного фрезерования с корректируемыми параметрами физической формы [2, 4, 7, 8].

Современные цифровые технологии, используемые в стоматологии, раскрыли иной подход к конструкционным материалам, в том числе и биоинертному диоксиду циркония, однако многие его физико-химические и микробиологические свойства, влияющие на использование в стоматологической практике, так до конца и не изучены. В работе [15] (1-й и 2-й этапы исследования) даны конкретные рекомендации по формированию поверхности индивидуальных трансдентальных имплантатов, выбор адекватного клинической ситуации цемента, обеспечивающих как остеоинтеграцию в периапикальной области интраоперационного дефекта, так и надежную фиксацию в корневом канале. В настоящей работе определена оптимальная толщина цементного

соединения «индивидуальный трансдентальный имплантат–цемент–дентин зуба». Таким образом, усовершенствованный интегрированный подход к применению трансдентальных имплантатов, нивелирующих ранее обозначенные недостатки, является приоритетной задачей в стоматологии, обеспечивает повышение эффективности зубосохраняющих операций, сопровождающихся потерей части корня зуба и структур пародонта, путем восстановления биомеханических характеристик, что и определило цели и задачи нашего исследования.

МАТЕРИАЛЫ, ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ

Полученные данные в проведенных ранее экспериментах [3, 15] (по определению адгезионной прочности статической нагрузкой на разрыв стоматологических цементных соединений индивидуального фрезерованного трансдентального имплантата с твердыми тканями корня зуба) позволили выбрать наилучший цемент (с точки зрения предельных адгезионных характеристик) для внутрикорневой фиксации, параметры искусственно созданной поверхности части индивидуальных фрезерованных трансдентальных имплантатов, а также определиться с конструкционными особенностями таких имплантатов, способами их изготовления и установки.

В нашей работе [15] на первом этапе экспериментов исследовались 4 типа цемента, в результате были выявлены два типа цемента *Fuji-1* и *Multilink-N*, обеспечивающие наибольшую адгезионную прочность соединения в образце. На втором этапе исследовались образцы имплантатов, подвергнутых пескоструйной обработке гранулами оксида алюминия размером 50, 150, 250 мкм, для определения влияния искусственной шероховатости поверхности имплантата на адгезионные свойства цементного соединения трансдентальный имплантат–зуб. Проведенное исследование показало, что использование титановых имплантатов с искусственной шероховатостью 250 мкм с цементом *Multilink-N* и имплантатов из диоксида циркония с цементом *Fuji-1* обеспечивает наиболее высокие адгезионные характеристики.

В настоящей работе (третий этап) исследовалось влияние толщины цементной пленки на адгезионные свойства цементного соединения имплантат–зуб. С этой целью перед фрезерованием образцов трансдентальных имплантатов на цифровой модели проводили редукцию внутрикорневой части имплантата на 20, 50 и 100 мкм (рис. 1), тем самым добивались соответственных толщин цементных пленок в сегменте «трансдентальный имплантат–цемент–твердые ткани зуба». Схема проведения эксперимента по вытягиванию штифта из образца, а также условия его проведения и регистрируемые параметры были такими же, как и на предыдущих этапах. Всего было проведено 18 испытаний (табл. 1).

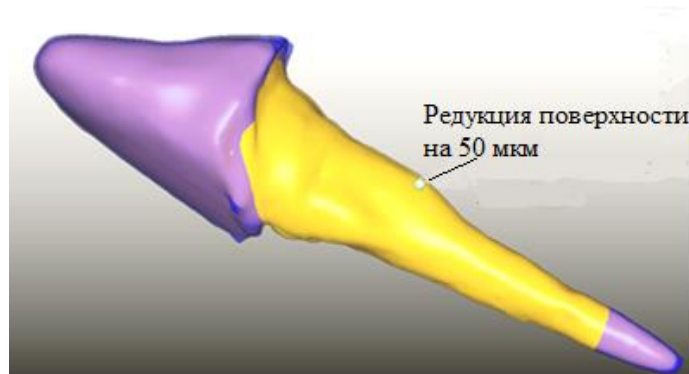


Рис. 1. Цифровая модель индивидуального трансдентального имплантата с редуцированной внутрикорневой частью

Таблица 1

Количество проведенных испытаний

Редукция	Имплантат из диоксида циркония	
	Цемент <i>Fuji-1</i>	Цемент <i>Multilink-N</i>
Редукция 20 мкм	3	3
Редукция 50 мкм	3	3
Редукция 100 мкм	3	3

В экспериментах исследовались образцы конструкций фрезерованных трансдентальных имплантатов из диоксида циркония и ранее удаленные зубы с резецированной верхушкой корня. Такие имплантаты имеют повышенную прочность, а по сравнению с титановыми имплантатами они более эстетичны – белого цвета. К прочим преимуществам относятся: адаптация к тканям человеческого организма, внедрение их пациентам с малой толщиной мягких тканей, отсутствие аллергической реакции. В работе [5] дан анализ напряженно-деформированного состояния имплантатов из сплава титана и диоксида циркония, который показал преимущество имплантата из диоксида циркония, вызывающего меньшие напряжения. В работах [12, 13, 17] полученные методом конечных элементов напряжения, возникающие на коронках, абатментах, имплантатах из диоксида циркония, были ниже, чем в группах имплантатов из титана. Такие имплантаты снижают нагрузку на кости и обладают хорошей биосовместимостью [16, 19, 32]. Исследования по оценке остеоинтеграции механических свойств имплантатов из диоксида циркония и их биомеханических свойств [25, 26, 28, 33] подтверждают надежность таких имплантатов для размещения в кости челюсти.

Образцы представляли собой сборку, составленную из штифта конической формы, вставленного в канальное отверстие зуба и фиксированного в нем цементной склейкой. В качестве штифтов использовались аналоги индивидуальных фрезерованных трансдентальных имплантатов, изготовленные из диоксида циркония (рис. 2). Образцы крепились с использованием специальной оснастки (рис. 3). В процессе эксперимента регистрировались растягивающие усилия (Н), относительное перемещение захватов (мм) и время (с).

Во всех экспериментах нагружение проводилось при комнатной температуре, 25° С, по кинематической схеме со скоростью перемещения траверсов испытательной машины 0,4 мм/мин.

Регистрировалось растягивающее усилие (с помощью динамометра 10 кН), относительное перемещение захватов (общее удлинение и время испытания). Испытания проводились на экспериментальной установке *Instron 5900* (Великобритания).

Способ трансдентальной имплантации подробно описан в работе [15]. Слепок снимается с помощью силиконовой массы, полученная конструкция обрабатывается



Рис. 2. Вид используемых штифтов-имплантатов из диоксида циркония

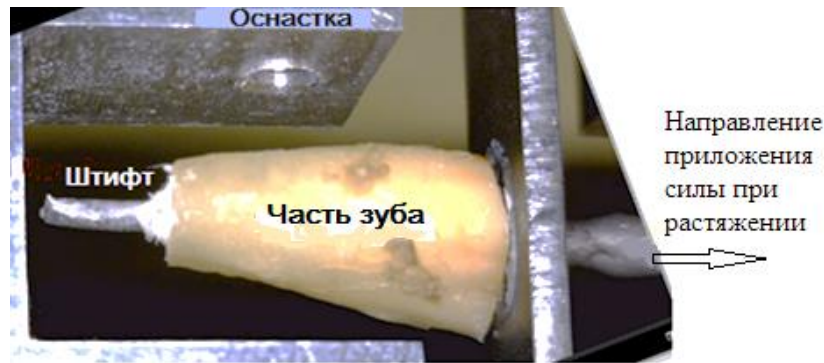


Рис. 3. Закрепление образца в оснастке во время испытаний на вытягивание

специальным антибликовым порошком для получения оптического оттиска и переводится в цифровой формат посредством сканера CAD/CAM-системы. Диаметр внутрикорневой части имплантата моделируется с условием циркулярного зазора между имплантатом и стенками корневого канала с применением компьютерной программы. В нашем случае трансдентальный имплантат фрезеровался из циркониевого блока и подвергался пескоструйной обработке гранулами порошка оксида алюминия размером 250 мкм для получения шероховатой поверхности имплантата. Исследования показали, что имплантаты с шероховатой поверхностью лучше укрепляются в кости и меньше подвержены вредному влиянию действующих на них сил. Материалы для стоматологических имплантатов должны отвечать таким требованиям, как прочность, технологичность, отсутствие токсичности и т.д. Оптимальное сочетание характеристик материала обеспечивает биосовместимость имплантата (в том числе биомеханическую) и хорошую остеоинтеграцию. Вопросы остеоинтеграции и реакции костной ткани на зубные имплантаты из диоксида циркония изучались в работах [9, 14, 20, 22, 23, 29, 30]. В экспериментах на животных (кроликах, крысах, собаках) путем наблюдения было установлено, что в области внутрикостной части трансдентального имплантата в течение нескольких месяцев формируется узкая прослойка фиброзной соединительной ткани. Оценка клинического успеха циркониевых имплантатов относительно остеоинтеграции дана в [18, 21, 31].

Для получения оптической (виртуальной) модели индивидуального трансдентального имплантата восковую реплику сканировали сканером *ZirkonZahn S600 5-TEC*, и имплантаты фрезеровали на фрезерном станке *M-5* системы *ZirkonZahn* (Италия).

Полученные результаты легли в основу определения несущей способности склейки стоматологических цемента между аналогом фрезерованного трансдентального имплантата и твердыми тканями зуба.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальное исследование влияния толщины цементного соединения трансдентального имплантата с тканями зуба на его адгезионные свойства

Была изучена адгезионная прочность на разрыв соединений образцов из перспективных конструкционных материалов с широким спектром механических свойств и твердых тканей зуба, фиксированных к образцам стеклоиономерными или композитными цементами [3]. Предельные адгезионно-прочностные характеристики образцов – максимальные значения растягивающей силы и значения максимальных удлинений – приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты испытаний «транскорональный имплантат–цемент» на растяжение

Метка образца	Максимум нагрузки, Н	Удлинение при достижении максимальной нагрузки, мм
Диоксид циркония/ <i>Fuji-1</i> 20 мкм	141,07	0,38
Диоксид циркония/ <i>Fuji-1</i> 50 мкм	141,19	0,24
Диоксид циркония/ <i>Fuji-1</i> 100 мкм	75,18	0,22
Диоксид циркония/ <i>Multilink-N</i> 20 мкм	91,49	0,31
Диоксид циркония/ <i>Multilink-N</i> 50 мкм	133,32	0,28
Диоксид циркония/ <i>Multilink-N</i> 100 мкм	24,49	0,22



Рис. 4. Последовательный процесс вытягивания имплантата из образца

На рис. 4 помещены снимки с видеокамеры, показывающие последовательный процесс вытягивания имплантата из образца.

Осмотр образцов после испытаний показал, что во всех тестах вытягивание штифта происходило вследствие разрушения адгезионного шва на его поверхности, зубная ткань не была повреждена. Поверхность изначально гладких штифтов была сильно ободрана и исцарапана – это говорит о том, что разрушение происходило в основном посредством среза. Качественно механизм деформирования при вытягивании штифта из образца может быть представлен как процесс сдвига в тонком слое между штифтом и зубным каналом. Разрушение наступает вследствие достижения адгезионного предела на срез, что соответствует максимальному значению растягивающей силы в эксперименте (достижение несущей способности образца). Последующее движение штифта вплоть до его полного отрыва ограничивается в основном трением.

По результатам механических исследований внутрикорневой фиксации индивидуальных фрезерованных транскорональных имплантатов, изготовленных из сплава титана, установлено преимущество композитного цемента, а в случае диоксида циркония – стеклоиономерного цемента.

По итогам проведенного исследования были получены результаты для всех образцов из различных соединений. На рис. 5 в качестве примера показаны зависимости перемещений от нагрузок для образцов индивидуальных фрезерованных транскорональных имплантатов из диоксида циркония, фиксированных стеклоиономерным цементом *Fuji-1*, с пескоструйной обработкой поверхности имплантатов зерном 250 мкм для толщин цементной пленки 20, 50 и 100 мкм соответственно.

Красные линии на рис. 5 (а, б, в) состоят из множества экспериментальных точек – порядка 2 тысяч. Наихудшие показания наблюдаются при толщине цементной пленки 100 мкм – обрыв происходит при силе 75 Н; при толщинах 50 и 20 мкм обрыв происходит при одинаковой силе 141 Н. Однако при сравнении адгезионные свойства выше при толщине 50 мкм – одним и тем же нагрузкам соответствуют меньшие значения перемещений.

Ричард ван Нурт в своей работе [1] писал: «Испытания на растяжение проводить сложно, особенно, если материал хрупкий – альтернативным методом оценки прочности материала является испытание на сжатие, которое легче провести». Так, в работе [24] проводились монотонные испытания для определения влияния толщины цементного слоя от 50 до 500 мкм на напряжения и разрушение коронок при окклюзионной нагрузке – оптимальной оказалась толщина 50 мкм. В работе [10] также исследовалось влияние толщины цементного слоя от 50 мкм до 2,7 мм на прочность композитных соединений при сжатии – с увеличением толщины прочность снижалась. Таким образом, эти работы подтверждают преимущество толщины цементной пленки 50 мкм, несмотря даже на то, что в них испытывались образцы на сжатие, в отличие от нашей работы на растяжение.

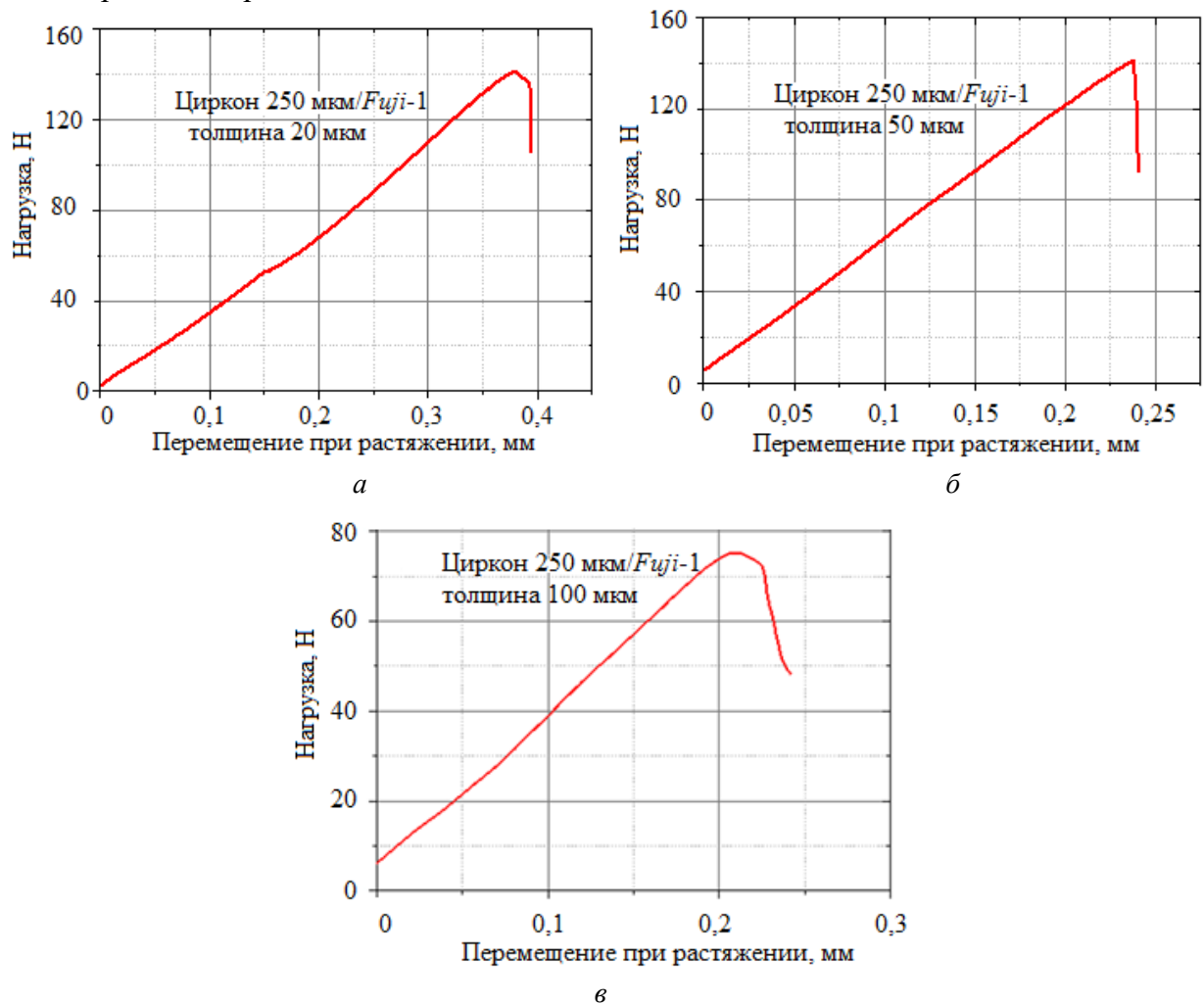


Рис. 5. Пример деформационной кривой в координатах нагрузка–перемещения, полученной при испытании образца индивидуального фрезерованного трансдентального имплантата из диоксида циркония/цемента Fuji-1 с пескоструйной обработкой поверхности имплантата зерном 250 мкм: а – толщина цементной пленки 20 мкм; б – толщина цементной пленки 50 мкм; в – толщина цементной пленки 100 мкм

Численное исследование влияния толщины цементного соединения трансдентального имплантата с тканями зуба на его адгезионные свойства

В работе проведено компьютерное моделирование в программе *LS-Dyna* процесса вытягивания прототипа диоксид циркониевого имплантата из образца корня зуба цементного соединения *Fuji-1* с толщинами 20, 50 и 100 мкм. Особенностью такого моделирования явилась необходимость введения дополнительного тела (помимо самого имплантата, дентина, эмали и цемента) – адгезионного (когезионного) слоя. Последний моделировался специальными конечными 3D-элементами с критерием их удаления по максимальным усилиям нормального и сдвигового отрывов. Физико-механические характеристики используемых материалов представлены в табл. 3 [6].

Компьютерная модель строилась на основании средних геометрических значений имплантатов и образцов, исследованных в физическом эксперименте. В связи с необходимостью использования 3D-элементов в адгезионном (когезионном) слое задача решалась в редуцированной объемной постановке (для удобства был выбран объемный сектор в 6° , задавался один элемент по толщине слоя, соответствующий сектору в 6°). Использовалась физически линейная модель адгезионного слоя, связывающая касательные напряжения и смещения. Жёсткость по касательной задавалась величиной 24 МПа, по нормали – 30 МПа; предельная жёсткость по касательной – 30 МПа, по нормали – 40 МПа [1]. Имплантат рассматривался как абсолютно твердое тело. Приложенная ко всей верхней поверхности имплантата тянущая сила составляла 72 Н. Граничные условия: запрет перемещения по XZ верхней поверхности имплантата (рис. 6, а) и полное закрепление боковых поверхностей вырезанного объемного сектора образца.

Имплантат изображен красным цветом, эмаль зуба – синим, тонкая полоса – дентин – зеленым, по краям которой жёлтые линии обозначают адгезионные слои. На рис. 6, б показаны 2 адгезионных слоя между цементной пленкой и имплантатом и между цементной пленкой и дентином; на рис. 6, в – 1/4 объема конечно-элементной модели.

На рис. 7 показано распределение напряжения по Мизесу в модели «образец–дентин–имплантат», справа – часть этой модели в увеличенном масштабе (объемный сектор в 6°) в начальный момент вытягивания имплантата из образца – хорошо видно незначительное смещение вверх слоя дентина вместе с адгезионными слоями. Минимальное значение напряжения находится в самом имплантате (красный цвет), а максимальное – в дентине (синий цвет). Несколько промежуточных картинок, полученных в результате численного решения задачи, показаны на рис. 8 – процесс вытягивания имплантата из образца. Здесь имплантат также изображен красным цветом, эмаль зуба – синим, дентин – зеленым, по краям которого адгезионные слои отмечены светло-зеленым (слева) и коричневым (справа). Начальный этап вытягивания имплантата обведен красным цветом – видно незначительное перемещение дентина и более значительное перемещение адгезионных слоев, затем последовательно происходит отрыв имплантата от дентина – полный отрыв показан на правом крайнем рисунке (см. рис. 8).

Таблица 3

Механические свойства материалов

Ткани и материалы	Модуль упругости, ГПа	Коэффициент Пуассона
Имплантат (цирконий)	210	0,20
Дентин	15	0,32
Цемент <i>Fuji</i>	10,8	0,30
Эмаль	40	0,30

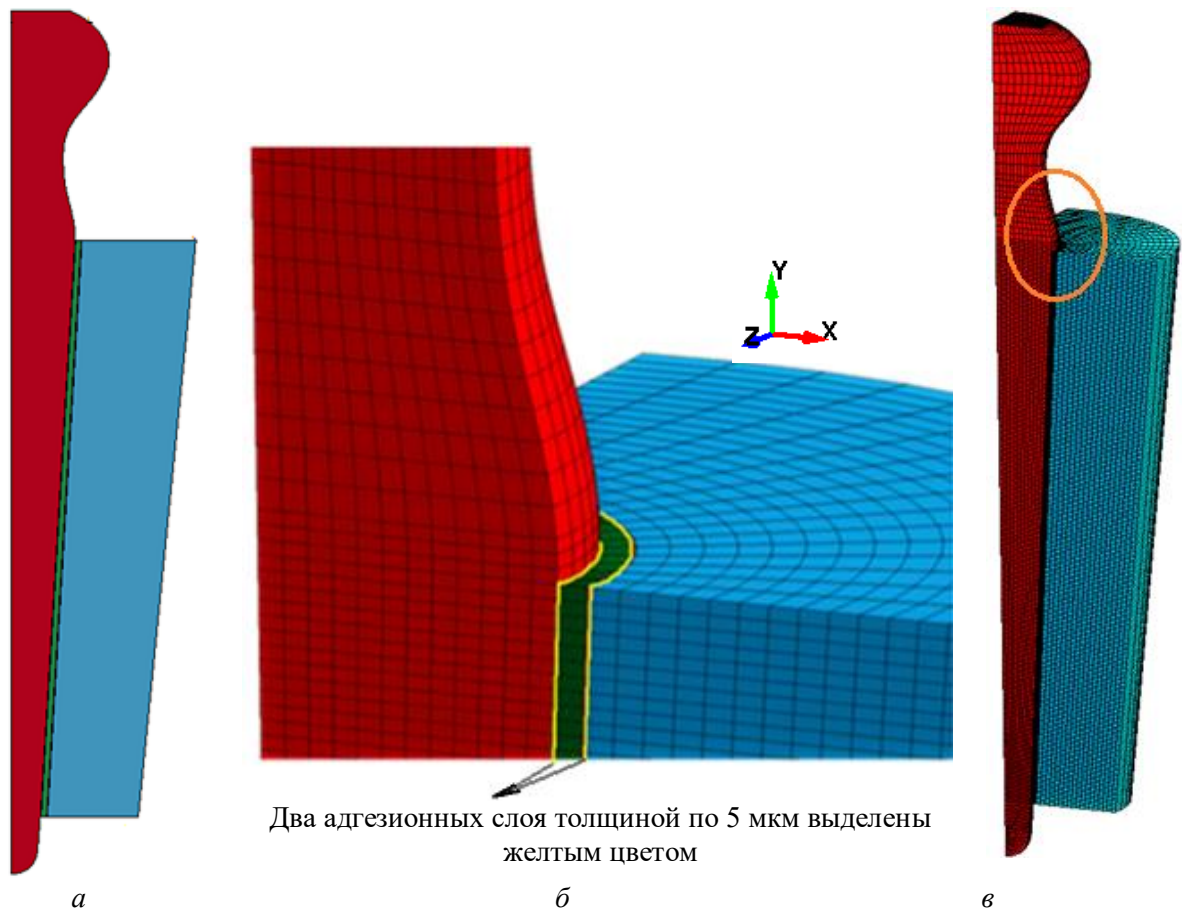


Рис. 6. Компьютерная модель образцов: *a* – половина модели в разрезе; *б* – часть модели в увеличенном масштабе; *в* – 1/4 объема конечно-элементной модели

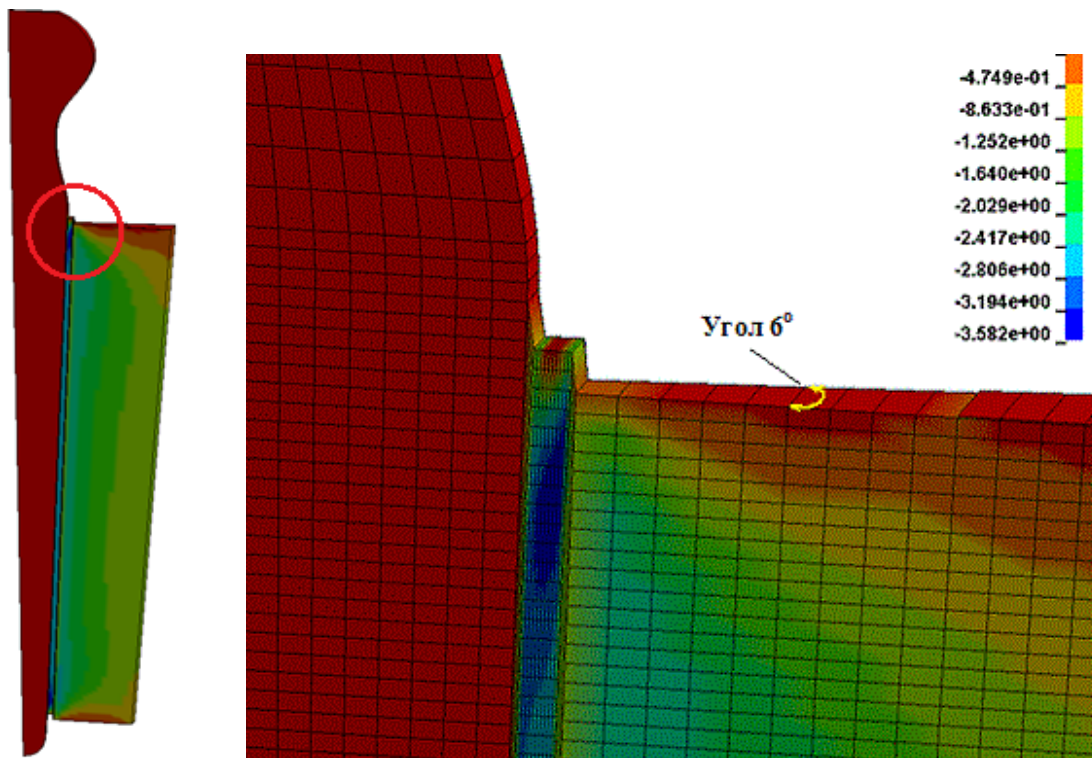


Рис. 7. Распределение напряжения по Мизесу в объёмном секторе 6 градусов

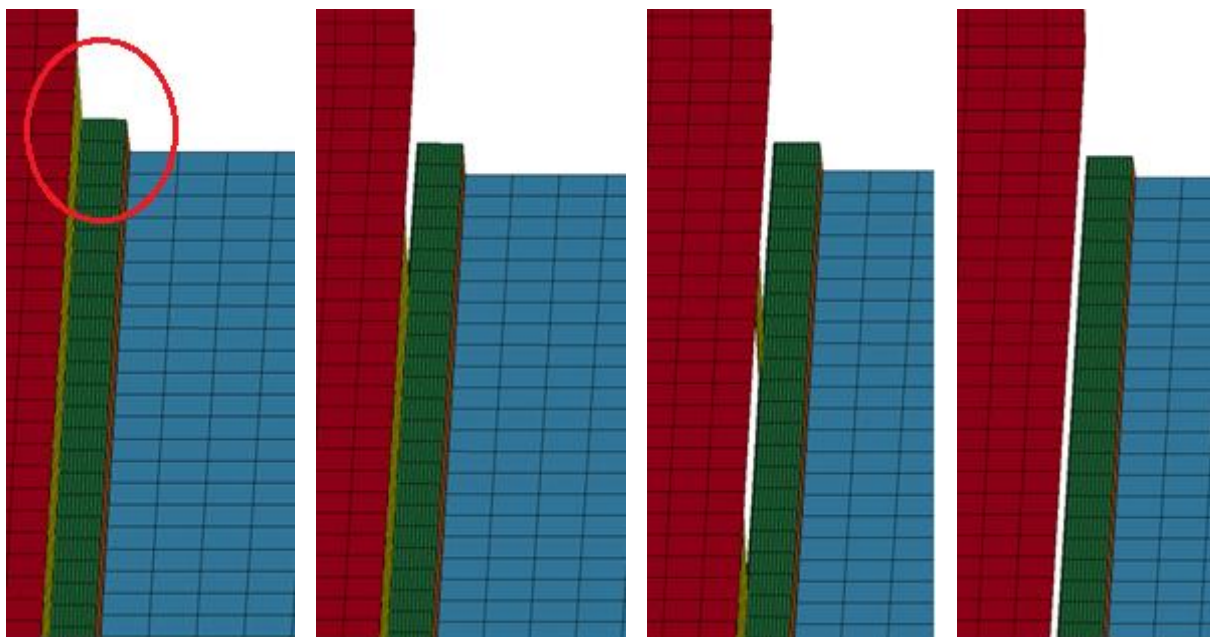


Рис. 8. Численный процесс вытягивания имплантата из образца

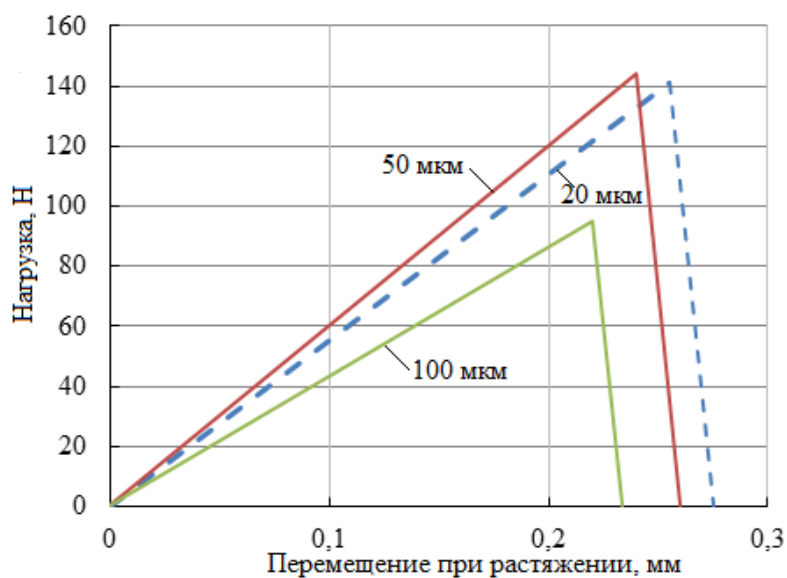


Рис. 9. Численные результаты зависимости адгезионной прочности стоматологических цементах в конструкции «имплантат–цемент–дентин зуба» от толщины цементной пленки в координатах нагрузка–перемещение

На рис. 9 помещены три расчетные линии зависимости перемещений от нагрузок для трёх толщин цементной пленки 20, 50 и 100 мкм. Красная линия, соответствующая толщине цементной пленки 50 мкм, находится выше линий в 20 и 100 мкм. Это значит, что для одного и того же перемещения при толщине 50 мкм потребуется приложить большую силу по сравнению с толщинами 20 мкм и тем более 100 мкм. Таким образом, толщину 50 мкм можно считать оптимальной.

Несмотря на то, что в расчетах рассматривались образцы идеальной формы с гладкими стенками, изотропными свойствами, а в экспериментах образцы были натурными – это удаленные зубы с резецированной верхушкой корня, с неровными стенками, с шероховатой поверхностью имплантата и т.п., сравнение физического эксперимента (см. рис. 5) с расчетным (см. рис. 9) показывает вполне

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В экспериментах при статических нагрузках на разрыв проведено полное исследование по определению цементов с наибольшей адгезионной жесткостью, характеристик искусственно созданной поверхности внутрикорневой части индивидуальных фрезерованных трансдентальных имплантатов из диоксида циркония и титанового сплава, и оптимальной толщины цементной пленки в соединении «индивидуальный фрезерованный трансдентальный имплантат–цемент–твёрдые ткани зуба». Все полученные данные в комплексе позволяют обеспечить долговременную и надежную фиксацию имплантатов к твердым тканям зуба.

Для имплантата из диоксида циркония экспериментально определена оптимальная толщина цементной пленки в соединении «индивидуальный трансдентальный имплантат–цемент–твёрдые ткани зуба», составляющая 50 мкм и подтвержденная работами на сжатие [10, 24].

Проведенное компьютерное моделирование процесса вытягивания прототипа диоксид циркониевого имплантата из образца корня зуба цементного соединения *Fuji-1* с толщинами 20, 50 и 100 мкм также подтвердило оптимальную толщину в 50 мкм. Удовлетворительное согласование результатов численного анализа (рис. 9) с результатами физического эксперимента (рис. 5, а, б, в) позволяет сделать вывод о достоверности проведенных численных расчетов, которые можно использовать для оценки различных материалов и толщин цементной пленки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ван Нурт Р. Основы стоматологического материаловедения. – М.: КМК-Инвест, 2004. – 304 с.
2. Джалалова М.В., Арутюнов С.Д., Степанов А.Г. Влияние уровня резекции корня зуба на величины перемещений и напряжений трансдентального имплантата в структуре костной ткани // Российский вестник дентальной имплантологии. – 2015. – № 1 (31). – С. 31–35.
3. Джалалова М.В., Арутюнов С.Д., Степанов А.Г. Исследование прочностных и адгезионных свойств цементного соединения трансдентального имплантата с твердыми тканями зуба // Ломоносовские чтения. – 2016. – М.: Изд-во МГУ. – С. 73–74.
4. Джалалова М.В., Степанов А.Г., Арутюнов С.Д. Влияние действующей под углом нагрузки на костную ткань челюсти и зуб, армированный трансдентальным имплантатом // Российский стоматологический журнал. – 2015. – Т. 6. – С. 7–10.
5. Няшин Ю.И., Рогожников Г.И., Рогожников А.Г., Никитин В.Н., Асташина Н.Б. Биомеханический анализ зубных имплантатов из сплава титана и диоксида циркония // Российский журнал биомеханики. – 2012. – Т. 16, № 1 (55). – С. 102–109.
6. Соловьев М.М., Лисенков В.В., Демидова И.И. Биомеханические свойства тканей пародонта // Стоматология. – 1999. – № 3. – С. 61–67.
7. Способ временного протезирования зуба после проведения трансдентальной имплантации: пат. Рос. Федерации МПК А61С 8/00 / Арутюнов С.Д., Степанов А.Г., Джалалова М.В., Малазоня Т.Т., Гветадзе Р.Ш., Абакаров С.И., Сохов С.Т. – № 2587016 (заявл. 12.05.2015; опублик. 10.06.2016) // БИМП. – Бюл. № 16.
8. Степанов А.Г., Зязиков М.Д. Экспериментальное определение физико-механических параметров, повышающих внутрикорневую фиксацию индивидуальных трансдентальных имплантатов, изготовленных CAD/CAM фрезерованием // Стоматология. – 2015. – Т. 94, № 2. – С. 100–101.
9. Aboushelib M.N., Salem N.A, Abo Taleb A.L., Moniem N.M. Influence of surface nano-roughness on osseointegration of zirconia implants in rabbit femur heads using selective infiltration etching technique // J. Oral Implantol. – 2013. – Vol. 39, no. 5. – P. 583–590. DOI: 10.1563/AAID-JOI-D-11-00075
10. Alster D., Feilzer A.J., De Gee A.J., Davidson C.L. Tensile strength of thin resin composite layers as a function of layer thickness // Journal of Dental Research. – 1995. – Vol. 74, no. 11. – P. 1745–1748. DOI: 10.1177/00220345950740110501
11. Büchi D.L., Ebler S., Hämmerle C.H.F., Sailer I. Marginal and internal fit of curved anterior CAD/CAM-milled zirconia fixed dental prostheses: an in-vitro study // Quintessence Int. – 2014. – Vol. 45, no. 10. – P. 837–846. DOI: 10.3290/j.qi.a32565

12. Caglar A., Bal B.T., Aydin C., Yilmaz H., Ozkan S. Evaluation of stresses occurring on three different zirconia dental implants: three-dimensional finite element analysis // *Int. J. Oral Maxillofac. Implants.* – 2010. – Vol. 25, no. 1. – P. 95–103.
13. Chang C.-L., Chen C.-C., Yeung T.C., Hsu M.-L. Biomechanical effect of a zirconia dental implant-crown system: a three-dimensional finite element analysis // *Int. J. Oral Maxillofac. Implants.* – 2012. – Vol. 27, no. 4. – P. e49–57.
14. Delgado-Ruiz R.A., Marković A., Calvo-Guirado J.L., Lazić Z., Piattelli A., Boticelli D., Maté-Sánchez J.E., Negri B., Ramírez-Fernández M.P., Mišić T. Implant stability and marginal bone level of microgrooved zirconia dental implants: a 3-month experimental study on dogs // *Vojnosanitetski Pregled. Military-medical and Pharmaceutical Review.* – 2014. – Vol. 71, no. 5. – P. 451–461. DOI: 10.2298/vsp121003034d
15. Dzhahalova M.V., Arutyunov S.D., Stepanov A.G. Research of dental cements properties in experiment on remote teeth reinforced by individual transdental implants // *Russian Journal of Biomechanics.* – 2019. – Vol. 23, no. 2. – P. 193–201. DOI: 10.15593/RZhBiomeh/2019.2.05
16. Fuh L.-J., Hsu J.-T., Huang H.-L., Chen M.Y.C., Shen Y.-W. Biomechanical investigation of thread designs and interface conditions of zirconia and titanium dental implants with bone: three-dimensional numeric analysis // *Int. J. Oral Maxillofac. Implants.* – 2013. – Vol. 28, no. 2. – P. e64–71.
17. Geringer A., Diebels S., Nothdurft F.P. Influence of superstructure geometry on the mechanical behavior of zirconia implant abutments: a finite element analysis // *Biomed. Eng. Biomed. Tech.* – 2014. – Vol. 59, no. 6. – P. 501–506. DOI: 10.1515/bmt-2013-0088
18. Grassi F.R., Capogreco M., Consonni D., Bilardi G., Buti J., Kalemaj Z. Immediate occlusal loading of one-piece zirconia implants: five-year radiographic and clinical evaluation // *Int. J. Oral Maxillofac. Implants.* – 2015. – Vol. 30, no. 3. – P. 671–680. DOI: 10.11607/jomi.3831
19. Gredes T., Kubasiewicz-Ross P., Gedrange T., Dominiak M., Kunert-Keil C. Comparison of surface modified zirconia implants with commercially available zirconium and titanium implants: a histological study in pigs // *Implant Dent.* – 2014. – Vol. 23, no. 4. – P. 502–507. DOI: 10.1097/ID.000000000000110
20. Hoffmann O., Angelov N., Zafiroopoulos G.-G., Andreana S. Osseointegration of zirconia implants with different surface characteristics: an evaluation in rabbits // *Int. J. Oral Maxillofac. Implants.* – 2012. – Vol. 27, no. 2. – P. 352–358.
21. Jank S., Hochgatterer G. Success rate of two-piece zirconia implants // *Implant Dent.* – 2016. – Vol. 25, no. 2. – P. 193–198. DOI: 10.1097/ID.0000000000000365
22. Koch F.P., Weng D., Krämer S., Biesterfeld S., Jahn-Eimermacher A., Wagner W. Osseointegration of one-piece zirconia implants compared with a titanium implant of identical design: a histomorphometric study in the dog // *Clin. Oral Implants Res.* – 2010. – Vol. 21, no. 3. – P. 350–356. DOI: 10.1111/j.1600-0501.2009.01832.x
23. Mai R., Kunert-Keil Ch., Grafe A., Gedrange T., Lauer G., Dominiak M., Gredes T. Histological behaviour of zirconia implants: an experiment in rats // *Annals of Anatomy – Anatomischer Anzeiger.* – 2012. – Vol. 194, no. 6. – P. 561–566. DOI: 10.1016/j.aanat.2012.09.004
24. May L.G., Kelly J.R., Bottino M.A., Hill T. Effects of cement thickness and bonding on the failure loads of CAD/CAM ceramic crowns: multi-physics FEA modeling and monotonic testing // *Dental Materials.* – 2012. – Vol. 28, no. 8. – P. e99–e109. DOI: 10.1016/j.dental.2012.04.033
25. Nakamura K., Kanno T., Milleding P., Ortengren U. Zirconia as a dental implant abutment material: a systematic review // *Int. J. Prosthodont.* – 2010. – Vol. 23, no. 4. – P. 299–309.
26. Pessanha-Andrade M., Sordi M.B., Henriques B.M.B., Silva F.S., Teughels W., Souza J.C.M. Custom-made root-analogue zirconia implants: A scoping review on mechanical and biological benefits // *Journal of Biomedical Materials Research. Part B, Applied Biomaterials.* – 2018. – Vol. 106, no. 8. – P. 2888–2900. DOI: 10.1002/jbm.b.34147
27. Preis V., Behr M., Hahnel S., Rosentritt M. Influence of cementation on in vitro performance, marginal adaptation and fracture resistance of CAD/CAM-fabricated ZLS molar crowns // *Dental Materials.* – 2015. – Vol. 31, no. 11. – P. 1363–1369. DOI: 10.1016/j.dental.2015.08.154
28. Prithviraj D.R., Deeksha S., Regish K.M., Anoop N. A systematic review of zirconia as an implant material. *Indian J Dent Res.* – 2012. – Vol. 23, no. 5. – P. 643–649. DOI: 10.4103/0970-9290.107383
29. Rocchietta I., Fontana F., Addis A., Schupbach P., Simion M. Surface-modified zirconia implants: tissue response in rabbits // *Clin. Oral Implants Res.* – 2009. – Vol. 20, no. 8. – P. 844–850. DOI: 10.1111/j.1600-0501.2009.01727.x
30. Schierano G., Mussano F., Faga M.G., Menicucci G., Manzella C., Sabione C., Genova T., von Degerfeld M.M., Peirone B., Cassenti A., Cassoni P., Carossa S. An alumina toughened zirconia composite for dental implant application: in vivo animal results // *Biomed. Res. Int.* – 2015. – Vol. 2015. – P. 1–9. DOI: 10.1155/2015/157360

31. Schriwer C., Skjold A., Gjerdet N.R., Øilo M. Monolithic zirconia dental crowns. Internal fit, margin quality, fracture mode and load at fracture // *Dental Materials*. – 2017. – Vol. 33, no. 9. – P. 1012–1020. DOI: 10.1016/j.dental.2017.06.009
32. Siddiqi A., Kieser J.A., De Silva R.K., Thomson W.M., Duncan W.J. Soft and hard tissue response to zirconia versus titanium one-piece implants placed in alveolar and palatal sites: a randomized control trial // *Clin. Implant Dent. Relat. Res.* – 2015. – Vol. 17, no. 3. – P. 483–496. DOI: 10.1111/cid.12159
33. Van Dooren E., Calamita M., Calgaro M., Coachman C., Ferencz J.L., Pinho C., Silva N.R. Mechanical, biological and clinical aspects of zirconia implants // *Eur. J. Esthet. Dent.* – 2012. – Vol. 7, no. 4. – P. 396–417.

EFFECTS OF CEMENT THICKNESS JOINT OF THE TRANSDENTAL IMPLANT WITH THE TOOTH TISSUE ON ITS ADHESION PROPERTIES. NUMERICAL-EXPERIMENTAL STUDY

M.V. Dzhahalova, A.G. Stepanov (Moscow, Russian Federation)

In previous experimental investigations, adhesion strength was studied with a static tensile load of dental cement joints of an individual milled transdental implant with hard tissues of the tooth root. At the second stage, the effect of artificially formed roughness of the implant surface on the adhesive properties of the cement joint implant–tooth was studied. The implants were sandblasted with alumina pellets of sizes 50, 150, 250 microns – the artificial roughness was the best when processed with granules of 250 microns. In the present work, the next stage of research is presented – the effect of the thickness of the cement joint “transdental implant – cement – dentin tooth” on its adhesive properties. Before milling samples of transdental implants on a digital model, the intra-root part of the implant was reduced by 20, 50, and 100 μm , sandblasted with alumina powder of 250 μm grain and fixed to a removed tooth on cements that have worked best in previous studies. All tests were carried out on an *Instron 5900* experimental setup. Zirconia implants were considered in combination with the two most effective cements *Fuji-1* and *Multilink-N* (with the highest adhesion-strength characteristics). As a result of experiments, the combination of zirconia material with *Fuji-1* cement turned out to be much better than with *Multilink-N* cement. A computer simulation of the process of drawing a prototype of a zirconium implant from a tooth root sample with different thicknesses of cement film: 20, 50 and 100 μm was carried out. A satisfactory qualitative and quantitative agreement was obtained between the results of three-dimensional numerical analysis and experiment: with a decrease in the thickness of the cement film from 100 to 20 μm , an improvement in the properties of the adhesive compound is observed, and a thickness of 50 μm can be considered optimal.

Key words: dental cements, transdental implant, zirconia, adhesive strength, cement film thickness.

Получено 4 июня 2020