

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертации Зайцева Дмитрия Викторовича «Физические механизмы деформации и разрушения в материалах с развитой иерархической структурой. Дентин и эмаль зубов», представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 - Физика конденсированного состояния.

Актуальность темы диссертации.

Необходимость разработки новых легких материалов, обладающих высокими характеристиками прочности в широком диапазоне интенсивностей воздействия, в условиях нагружения, включая окружающую среду, сопровождается устойчивой тенденцией анализа природных материалов, изучению их архитектуры, которая приобретает наивысшую степень функциональности в биологических композитах. Совокупность свойств, обеспечивающих надежность биокompозитов, достигается в последних благодаря специфики многомасштабного взаимодействия и роли компонент, определяющих функциональность свойств благодаря разнообразным механизмам структурной релаксации. Несмотря на ограниченность (и традиционность) набора типичных механических характеристик, возникают фундаментальные проблемы, связанные с определением этих характеристик для таких функционально организованных материалов. К числу основных следует отнести подготовку образцов из реальных биологических объектов с учетом малого размера последних, выраженной анизотропией свойств, которая проявляется, в том числе, в анизотропии реологических свойств, обусловленных реализацией принципиально различных механизмов структурной релаксации. Проблемы реализации традиционных и специальных схем нагружения в сочетании с пониманием специфики поведения биокompозитов являются ключевыми при решении актуальных экспериментальных задач физики твердого тела применительно к функционально-организованным материалам при условии методически корректной реализации постановок. Совокупность сформулированных задач и их решение составляют основу актуального исследования и его новизны в плане фундаментальных и методических постановок, реализованных в диссертации в области физики твердого тела функционально-организованных иерархических материалов.

С учетом поставленной цели - определение физических механизмов деформации и разрушения в дентине и эмали для разработки материалов на основе микроструктуры биологических твердых тканей – сформулированы следующие основные задачи:

- разработка методики приготовления малогабаритных образцов из дентина и эмали разной геометрии для механических испытаний на сжатие, изгиб, сдвиг и диаметральное сжатие;
- изучение микроструктуры образцов твердых тканей зубов после деформации на микро-, мезо- и макро- уровнях;
- изучение механических свойств дентина, эмали и дентиноэмалевого соединения при комнатной температуре и при температуре жидкого азота;
- сравнительный анализ деформационного поведения твердых тканей зубов с модельными хрупкими и пластичными материалами.

Актуальность обусловлена перспективностью применения результатов исследований, основанных на моделировании свойств функционально-организованных биологических структур, для ряда технических и биомедицинских приложений. Многочисленные исследования, посвященные анализу многомасштабной иерархии механических свойств биокompозитов и природных материалов, не позволяют сформулировать методически обоснованные представления о структурных механизмах и, как следствие, развить методы и подходы для получения синтетических копий этих материалов. Твердые ткани зубов человека (дентин и эмаль) являются примером материалов с комплексом высоких механических свойств, обусловленных функционально-ориентированной иерархической структурой, обеспечивающей сочетание уникальных прочностных свойств в условиях продолжительного воздействия агрессивной среды полости рта. Поэтому дентин и эмаль зубов человека рассматриваются как перспективные материалы для изучения с целью создания научных и методических основ для разработки нового класса функциональных материалов для разнообразных технических и медицинских приложений.

Актуальной, наряду с развитием новых представлений о физике процессов, протекающих в биокompозитах при деформации, является также решение сложных методических проблем многомасштабного исследования механических свойств дентина и эмали, что позволило создать экспериментальную основу для модельных представлений о формировании функционально-ориентированных свойств материалов.

Целью работы является определение физических механизмов деформации и разрушения в дентине и эмали зубов человека для создания научной базы при разработке материалов, учитывающих закономерности микроструктуры биологических твердых тканей.

Данная цель реализуется при решении следующих основных задач:

- разработка методики приготовления малогабаритных образцов из дентина и эмали человека разной геометрии для механических испытаний на сжатие, изгиб, сдвиг и диаметрально-сжатие;
- изучение микроструктуры образцов твердых тканей зубов после деформации на микро-, мезо- и макро- уровнях;
- изучение механических свойств дентина, эмали и дентиноэмалевого соединения при комнатной температуре и при температуре жидкого азота;
- сравнение деформационного поведения твердых тканей зубов с модельными хрупкими и пластичными материалами.

Поставленные цели и результаты характеризуются научной новизной, в том числе:

- определены физические механизмы необратимой деформации в дентине и эмали, которые реализуются в дентине за счет вкладов органической матрицы и пористости межтубчаточного дентина, а в эмали при изгибе эмалевых стержней за счет сцепления между собой палочковидных кристаллов;
- показано, что деформационное поведение дентина в упругой области обусловлено реакцией мягкой матрицы, наполненной твердыми частицами ~60% по массе, одинакового размера ~1мкм;
- обосновано, что эмаль может рассматриваться как направленный плотноупакованный волокнистый композит, с волокнами, диаметром ~5мкм, соединенными друг с другом тонкой мягкой прослойкой, где происходит сдвиг стержней относительно друг друга.
- впервые проведенным исследованием, позволившим установить, способность дентина при сжатии к большой упругой и значительной необратимой деформации;
- впервые установленным механизмом остановки трещин в дентине при растяжении, обусловленным органической матрицей при образовании мостов на переплетении эмалевых стержней;
- показано, что полученные результаты по обоснованию функционально-ориентированных свойств на примере дентина и эмали могут быть использованы для разработки моделей, описывающих деформационное поведение биокompозитов и их технических аналогов.

Диссертация состоит из введения, раздела, посвященного методики эксперимента, трех оригинальных глав, основных выводов и списка цитируемой литературы, включающего 227 наименования и списка обозначений и сокращений. Содержание диссертации изложено на 277 страницах, включая 202 рисунка и 45 таблиц.

В Введении отмечается, что, несмотря на большую социальную и практическую значимость проблемы прочности твердых тканей зубов и большого количества опубликованных работ, механические свойства этих природных биокompозитов изучены недостаточно, что связано с методическими сложностями изготовления образцов для механических испытаний при макроскопических схемах деформации (сжатие, изгиб, растяжение) и необходимостью разработки микроскопических схем нагружения (микро- и наноиндентирование) с целью получения данных о многоуровневом деформационном поведении в условиях выраженной анизотропии деформационных и реологических свойств. Принципиальной является также роль данных факторов в механизмах разрушения, которые сопровождаются ростом магистральной трещины в дентине и эмали за счет зарождения и слияния сателлитных трещин перед ее вершиной, что связывается с образованием органических мостов из колагеновых волокон между краями трещин, которые не разрушаются при прохождении трещины через хрупкий дентин и эмаль. Определения взаимосвязи между микроструктурой и прочностными свойствами дентина и эмали предполагает методически выверенное изучение механических характеристик с учетом роли микроструктуры.

В первом разделе представлена методика экспериментов, включающая детальное изложение методов приготовления образцов и аттестация микроструктуры дентина и эмали с помощью методов оптической, биологической и электронной микроскопии. Образцы дентина, эмали и образцы, содержащие дентино-эмалиевые соединения (ДЭС), для механических испытаний имели различную форму в зависимости от типа испытаний (одноосное сжатие, изгиб, сдвиг, диаметрально сжатие, механические испытания в среде). Для аттестации микроструктуры дентина и эмали подготавливались плоские образцы, рабочие поверхности которых были либо параллельны, либо перпендикулярны главной оси зуба; металлографические исследования микроструктуры проводили методами оптической (на отражение), биологической (на просвет) и электронной микроскопии (сканирующий микроскоп JSM-6390 LV и JSM-6490 и просвечивающий микроскоп JEM-200CX). Образцы для СЭМ, подготавливались методом раскола образцов (без механической и химической полировки); кристаллическая структура образцов аттестовалась методом рентгеноструктурного анализа на дифрактометре Bruker D8 Advance и ДРОН -4 в CuK_α излучении (шаг 0.05° , время сканирования в точке 10 секунд).

Механические испытания проводили на разрывной машине Shimadzu AG-X 50kN. Специальные методики были разработаны для исследования механического поведения образцов дентина и эмали в присутствии жидких сред, включая испытания при низких температурах (в жидком азоте). Проведенные исследования показали, что дентин является прочной тканью способной к значительной упругой и необратимой деформации, обнаруживающей способность к эффективному подавлению роста трещин, в том числе за счет вязкоупругих свойств, обусловленных механизмами структурной релаксации, включающих развитие трещин. Установлено, что соотношение между вкладами упругой и необратимой деформации могут изменяться в зависимости от условий испытаний, включая соотношение растягивающих и сжимающих напряжений. Показано, что дентин можно рассматривать, как изотропное тело до 17% деформации, когда дентин подвергается упругой и значительной необратимой деформации. Дентин человека можно отнести к наполненному полимеру, упругие свойства которого моделируются системой «мягкая матрица с твердым наполнителем». Деформационное поведение эмали можно рассматривать, как хрупкое при сжатии и растяжении, тогда как при приложении напряжений перпендикулярно эмалевым стержням она способна к значительной необратимой деформации. Показано, что дентин и эмаль способны эффективно подавлять их рост трещин: дентин, благодаря способности к высокой деформации межтрубчатого объема; в эмали – вследствие остановки роста трещины при образовании мостов на переплетениях эмалевых стержней.

Второй раздел посвящен исследованию дентина, свойства которого, как природного иерархического композита, определяются тремя структурными уровнями: первый, соответствующий масштабам кристаллов гидроксиапатита кальция размером 20-50 нм, заполняющие пространство между коллагеновыми волокнами и одиночные коллагеновые волокна, диаметром ~ 100 нм; второй – сетка из коллагеновых волокон, ориентированная преимущественно перпендикулярно дентинным каналам; третий - дентинные каналы, диаметром 3-5 мкм, окруженные высоминерализованной оболочкой и располагающиеся на расстоянии ~ 10 мкм друг от друга. Дентин представляет собой армированный композит со сложным распределением армирующих элементов в виде дентинных каналов, заполненных жидкостью и которые формируют цилиндрическое волоконное усиление. Отмечается важная роль пористости, которая включает пористость дентинных каналов и пористость в пространстве между коллагеновыми волокнами. Матрица композита в виде неорганической фазы в дентине является основной, составляет примерно 50% от объема и состоит из кристаллов апатитов кальция.

Приведены результаты механических испытаний дентина при различных условиях нагружения (сжатие, растяжение, изгиб, сдвиг, точечное нагружение) с целью обоснования модели механического поведения дентина. За основу приняты модельные представления, развитые Gao с сотрудниками, отражающие предположение о биологических иерархических материалах как систем, демонстрирующих оптимальные функционально-ориентированные механические свойства.

Обсуждаются закономерности развития трещин в дентине при статических и циклических нагрузках, и показано, что трещиностойкость зависит от ориентировки дентинных каналов в образце, обнаруживает минимальное значение, когда трещина растет перпендикулярно дентинным каналам и максимальна, когда она распространяется вдоль каналов. Это различие является незначительным и, поэтому, дентин нельзя рассматривать, как однонаправленный волокнистый композит, так для этого типа материалов характерна большая зависимость механических свойств от ориентировки армирующих волокон. Показано, что наибольший вклад при изменении траектории трещины в уменьшение напряжения наблюдается при перпендикулярной ориентировке трещины к дентинным каналам. В случае, когда основная трещина взаимодействует с дочерними трещинами в вершине, формируя области не разрушенных участков, происходило образование мостов. Исходя из этого, делается заключение, что прочность дентина зависит не только от дентинных каналов, но и от ориентировки эластичных коллагеновых волокон и формирования неразрушенных участков (мостов) между краями трещины. При этом коллагеновые волокна образуют сетку, перпендикулярную оси канала, что сопровождается образованием мостов, и приводит к высокой прочности при параллельной ориентации дентинных каналов. Это также, частично, объясняет анизотропию величины трещиностойкости дентина.

На основе экспериментов по исследованию механических свойств дентина на сжатие проведено изучение влияния размерного эффекта и эффекта формы на механические свойства. Анализ результатов позволил сделать вывод, что деформационное поведение дентина не зависит от размеров образца с постоянным d/h отношением в исследованном размерном диапазоне. Показано, что в дентине наблюдается эффект формы при сжатии. Образцы с d/h отношением меньше единицы при испытании разрушались, тогда, как остальные группы образцы сохраняли свою форму, несмотря на большое количество трещин. Металлографический анализ образцов после испытания показал, что на боковых поверхностях образцов с d/h отношением меньше 1 практически отсутствуют трещины. Полученные данные позволили установить, что в дентине есть два механизма релаксации напряжения при сжатии: рост трещины и деформация. Вклад или

отношение между этими механизмами зависит от отношения d/h , что связано распределением напряжений в образце. Изучение трещин в дентине с помощью ПЭМ при увеличениях порядка $\times 10000$ показало, что угол раскрытия основной трещины не превышает 10° , а перед ее вершиной происходит утонение материала и образование сателлитных трещин, что характерно для роста трещин в объемных образцах и тонких фольгах пластичных металлов, когда релаксация напряжений в вершине трещины происходит как за счет деформации, так и образования свободной поверхности (слияния с дочерними трещинами). Исследование зависимости деформационного поведения от скорости нагружения позволило выявить микро-механизмы релаксации напряжений и установить, что предел прочности и предел пропорциональности дентина не зависят от скорости нагружения. Однако, изменение деформационных свойств позволяет связать их с вязкоупругой реакцией дентина, определяемой свойствами неорганической фазы – кристаллами апатита кальция. Исследование деформационного поведения в режиме ползучести подтвердило вязкоупругие свойства дентина. Изучение влияния жидких сред на механические свойства дентина обнаружило зависимость от типа жидкости (в большей степени - воды): наблюдалось, снижение прочности и способности дентина к упругой деформации, тогда как пластичность и полная деформация увеличивалась. Исследование механизмов, ответственных за деформационное поведение дентина, осуществлялось методами рентгеноструктурного анализа и установлено, что необратимая деформация в дентине реализуется благодаря вкладу органической фазы и пористости межтрубчатого дентина. Обсуждаются механизмы эффекта памяти формы, которые связываются как со свойствами материала, так и с экспериментальными факторами (ролью истинных напряжений). Значительное внимание уделено изучению механических свойств в условиях растяжения (при диаметральной сжатии, в том числе при низких температурах), что позволило установить нелинейный характер деформационного поведения и множественный рост стабильных трещин. Отсутствие пластичности при температуре жидкого азота, позволило сделать вывод, что пластичность в дентине при растяжении реализуется за счет органических компонент. Испытания на изгиб позволили оценить деформационное поведение образцов при высоком уровне растягивающих напряжений в его нижней части. В отличие от растяжения, эта деформационная схема позволила оценить упруго-пластичные свойства хрупких материалов. Сопоставление деформационного поведения дентина с кварцевым стеклом, оксидом алюминия и оргстеклом позволили сделать вывод, что свойства дентина аналогичны свойствам исследованных хрупких материалов. Сравнительный анализ механического поведения дентина и наполненных полимеров (используемых при реставрации твердых тканей

зубов) позволил оценить возможность применения иерархической модели для описания механических свойств биоминералов на примере дентина. Для сравнения деформационного поведения дентина с наполненными полимерами были проведены испытания на сжатие, где образцы дентина были адгезивно зафиксированы с материалом. Значительный объем оригинальных исследований деформационных свойств дентина позволил классифицировать механизмы деформации и разрушения в дентине и сделать следующие выводы:

- соотношение между вкладами упругой и необратимой деформации могут изменяться в зависимости от условий испытаний (отношения растягивающих напряжений к сжимающим);
- необратимая деформация минимальна, когда растягивающие напряжения максимальны;
- необратимая деформация в дентине обусловлена свойствами органической матрицы и пористостью межтрубчатого дентина.

Раздел 3 посвящен исследованию механизмов деформирования и разрушения эмали с учетом структурных особенностей этого природного биокompозита, содержащего до 7 структурных уровней: плотноупакованные кристаллы апатитов кальция, эмалевые стержни, ансамбли стержней с радиальной и перекрещивающейся ориентацией, пористость, неорганическая фаза (гидроксиапатита кальция), органическая компонента (смесь протеина/пептидов). Проведен обзор механических свойств эмали при испытаниях на сжатие, растяжение, точечное нагружение, положенные в основу выбора модели деформационного поведения эмали. Обсуждается модельное представление эмали как двухфазного материала, в котором твердые частицы чередуются с органическим материалом, обладающим значительно более низкой прочностью. Анализ механизмов роста трещин, возникающих при усталостном и статическом нагружении, позволил сделать вывод о преимущественном распространении последних в направлении внешних и внутренних границ, что контролируется механизмами структурной релаксации соответствующих структурных уровней. Методом ПЭМ были также обнаружены области неразрушенной эмали перед вершиной трещины и сателлитные трещины, обладающие порообразной формой вблизи ДЭС. Проведено исследование механического поведения эмалевых призматических образцов при сжатии. Установлено, что образцы не разрушались в процессе испытания, несмотря на появление большого количества трещин на их поверхности, при этом в некоторых случаях от краев образцов отделялись довольно крупные фрагменты. Форма деформационной кривой эмали отличается от дентина и два участка: нелинейный и линейный. Деформационное поведение образцов эмали с различным d/h отношением качественно не отличалось друг от друга. Протяженность

нелинейного участка увеличивается с ростом d/h отношения, при этом зависимость прочностных свойств от d/h отношения образца эмали аналогична обычным материалам. Испытание образцов эмали в диапазоне нескольких порядков скоростей нагружения (от 0,001 до 10 мм/мин) показали слабую зависимость механических характеристик эмали от скорости нагружения, что связывается с малым содержанием в ней органических компонент. Изучение способности эмали выдерживать постоянные нагрузки (в режиме ползучести в диапазоне от 100МПа до 450МПа в течение 5 часов) позволило установить независимость деформационного поведения от величины приложенной нагрузки. Профиль деформационной кривой эмали совпадал с дентином, хотя величина деформации возникающей при удержании нагрузки была значительно меньше по сравнению с дентином. Низкотемпературное поведение эмали (при сжатии в жидком азоте), качественно не отличалось от поведения при комнатной температуре. Аттестация кристаллической структуры эмали проводилась методом рентгеноструктурного анализа образцов в исходном состоянии и при напряжении, когда возникали трещины в образце ($\sigma \sim 500$ МПа). Анализ кристаллической структуры эмали в исходном состоянии показал, что эмаль находится в кристаллическом состоянии, при этом ширина пиков в эмали значительно уже по сравнению с дентином. Наблюдение образцов эмали непосредственно под нагрузкой показало, что в процессе испытания на сжатие образцы не разрушались для всех d/h отношений, несмотря на большое количество трещин, наблюдаемых на боковых поверхностях. Данное обстоятельство связывается с фактом, что рост трещины в эмали реализуется в объеме между соседними эмалевыми призмами. Показано, что трещина растет вдоль эмалевых призм за счет объединения с сателлитными трещинами, формирующимися в ее фронте. Исследование механических свойств эмали при растяжении (эксперимент по диаметральному сжатию) позволило установить линейную деформационную зависимость и сделать вывод о деформационном поведении эмали как хрупкого материала, при этом разрушение (при статических и усталостных испытаниях) сопровождается зарождением и ростом основной трещины при взаимодействии с множеством сателлитных трещин. Установлено, что деформационное поведение образца эмали в поле растягивающих напряжений при диаметральной сжатии в жидком азоте качественно не отличалось от поведения образцов, испытанных при комнатных условиях. Анализ показал также, что анизотропия механических свойств в эмали человека появляется, когда происходит нелинейная пластическая деформация в образце. Проведенное экспериментальное исследование позволило сделать вывод о том, что деформационное поведение эмали можно рассматривать, как хрупкое при сжатии и растяжении, тогда как при приложении напряжений перпендикулярно эмалевым

стержням, она способна к значительной необратимой деформации. Показано, что эмаль демонстрирует анизотропию механических свойств, но в отличие от дентина, где плоскость, перпендикулярная дентинным каналам, является легкой для разрушения.

Раздел 4 посвящен исследованию структурных и механических свойств дентиноэмалевых соединений (ДЭС), представляющих собой зоны между двумя твердыми высокоминерализованными тканями (дентин и эмаль), обладающими разными механическими свойствами. Структура соединения представлена множеством параллельных коллагеновых волокон, диаметром 80-120нм, которые, с одной стороны, вставлены в минералы эмали, а с другой, соединяются с сеткой органических волокон в дентинной матрице. Анализ экспериментальных результатов при нагружении ДЭС в условиях сжатия, растяжения, точечного нагружения, изучение механизмов роста трещин показал, что прохождение трещины сквозь ДЭС сопровождается разрушением ДЭС, зарождением и ростом микротрещин в направлении обратном росту основной трещины. На деформационной кривой образцов, содержащих ДЭС, выделяется три характерных участка: деформация на первом и втором участке является упругой, на третьем – необратимой за счет пластической деформации дентина. Деформационное поведение образцов, содержащих ДЭС при сжатии в жидком азоте, можно охарактеризовать, как хрупкое. Деформационная кривая практически прямолинейная; образец не распадался на части при достижении предела прочности при наличии в нем множественных трещин. Такое поведение, характерное при испытании дентина и эмали в жидком азоте, связывается с механизмами остановки трещины обусловленными неорганическими компонентами.

В целом диссертация представляет собой методически выверенное, обширное экспериментальное исследование механических свойств и структурных механизмов разрушения биокomпозитов на основе дентина, эмали, дентина-эмалевого соединения костной ткани зубов, содержит значительный объем новых данных, которые, наряду с биомедицинскими приложениями, открывают новые возможности для создания материалов с уникальным сочетанием прочностных и механических свойств. Необходимо отметить, что, несмотря на значительное количество работ по микроструктуре твердых тканей биокomпозитов, существует явный дефицит экспериментальных данных о прочностных свойствах биокomпозитов. Это обстоятельство обусловлено трудностями, возникающими при изготовлении образцов для стандартных механических испытаний. Автор использовал методы, апробированные в физике твердого тела, для изучения механических свойств биологических твердых тканей. Им разработана оригинальная методика приготовления образцов для механических испытаний из дентина и эмали,

которая позволила детальное изучение прочностных свойств этих тканей на сжатие, изгиб, сдвиг и диаметрально сжатие/непрямое растяжение. Аттестация образцов непосредственно под нагрузкой при сжатии позволила определить оптимальные геометрические параметры образцов для испытания. Сравнение деформационного поведения дентина и эмали, испытанных при комнатной температуре и в жидком азоте, позволило выявить механизмы их необратимой деформации и разрушения.

Наиболее важными результатами диссертационной работы являются:

1. Установленные масштабные уровни в материалах с развитой иерархической структурой, определяющие разные деформационные механизмы, которые активируются в зависимости от схемы нагружения и величины прикладываемой нагрузки.
2. Данные о том, что дентин способен к высокой упругой и значительной необратимой деформации. Эмаль выдерживает значительную упругую деформацию, но способна к необратимой деформации при приложении нагрузки перпендикулярно эмалевым стержням, в противном случае ее можно охарактеризовать, как хрупкий материал.
3. Данные о том, что дентин и эмаль, являясь анизотропными материалами, допускают модельное представление изотропии до 17% и 5% деформации сдвига, соответственно. Плоскость перпендикулярная дентинным каналам является легкой для разрушения, тогда как в эмали плоскость перпендикулярная стержням является трудной для разрушения.
4. Результаты структурных исследований, установившие, что необратимая деформация в дентине обеспечивается за счет органической фазы и пористости межтрубчатого дентина. При этом основной вклад при растяжении вносит органическая фаза, а при сжатии пористость. Необратимая деформация в эмали реализуется при изгибе эмалевых стержней за счет сцепления между собой палочковидных кристаллов
5. Установлено, что релаксация напряжения в этих твердых тканях происходит также за счет роста трещин, при этом дентин и эмаль способны эффективно подавлять их рост: дентин, благодаря способности к высокой деформации межтрубчатого дентина; в эмали основным механизмом остановки роста трещины является образование мостов на переплетениях эмалевых стержней. Дентинные каналы включаются в процесс разрушения, когда к образцу прикладываются растягивающие нагрузки, в противном случае, когда сжимающие нагрузки максимальны, разрушение реализуется в межтрубчатом дентине.

6. Данные, позволившие установить, что соединение дентина с эмалью играет важную роль в деформационном поведении зуба, компенсируя напряжения между этими твердыми тканями, обладающими разными прочностными свойствами. Стабильность соединения достигается за счет того, что механические свойства дентина и эмали снижаются вблизи границы и становятся близкими.

Работа не свободна от недостатков и уместны следующие замечания:

1. Компоновка диссертации, конспективность изложения результатов и выводов некоторых разделов существенно осложняют понимание физических особенностей поведения исследуемых объектов, выделение характерных признаков и, как следствие, обоснованность модельных представлений;
2. Обращает на себя внимание стилистическая некорректность при определении физико-механических свойств дентина, эмали и биокompозита в целом (высокоупругие и т.д....), что приводит к трудностям в интерпретации структурных и механических закономерностей на основе привлекаемых модельных представлений;
3. Стилистические и грамматические опечатки, затрудняющие понимание ряда содержательных результатов работы.

Достоверность полученных в работе результатов и положений, выносимых на защиту, обеспечивается использованием современных методов исследования структуры материалов (оптическая металлография, электронная сканирующая и просвечивающая микроскопия), сертифицированным оборудованием при проведении механических испытаний, сопоставлением с результатами опубликованных исследований других авторов.

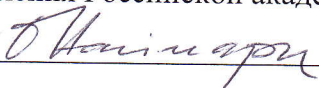
В целом диссертационная работа Зайцева Д.В. является самостоятельным законченным научным исследованием, соответствующим «Положению о порядке присуждения учёных степеней» ВАК РФ. Выводы и положения, выносимые на защиту, следуют из содержания диссертации. Результаты работы достаточно полно опубликованы в отечественной и международной научной печати. Автореферат и публикации соответствуют содержанию работы и достаточно полно её представляют.

Совокупность, представленных в диссертации выводов и положений, можно квалифицировать как значительный вклад в решение проблем, связанных с пониманием механизмов деформации и разрушения композитных материалов (на примере биокompозитов) с иерархической структурой – важного раздела физики конденсированного состояния.

Считаю, что диссертация удовлетворяет требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям, а её автор, Зайцев Дмитрий Викторович, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 - Физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий лабораторией физических основ прочности
Федерального государственного бюджетного учреждения
науки Институт механики сплошных сред Уральского
отделения Российской академии наук

 Олег Борисович Наймарк

Дата: 4 апреля 2016 г.

614013, Пермь, ул. Академика Королева, д. 1

Тел. (3422) 37-84-61, факс (3422) 37-84-87,

E-mail: mvp@icmm.ru

Подпись Наймарка О.Б. заверяю

Ученый секретарь

ИМСС УрО РАН



Наталья Алексеевна Юрлова