

## ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертационную работу Зайцева Дмитрия Викторовича «ФИЗИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ ДЕФОРМАЦИИ И РАЗРУШЕНИЯ В МАТЕРИАЛАХ С РАЗВИТОЙ ИЕРАРХИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ. ДЕНТИН И ЭМАЛЬ ЗУБОВ», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07– «Физика конденсированного состояния»

### Актуальность темы диссертации

В настоящее время наметилась необходимость в разработке новых материалов, обладающих высокими эксплуатационными характеристиками, которые бы сочетали в себе высокую прочность и деформируемость. Понимание механизмов деформации и разрушения в таких композитах, открывает широкие возможности создания нового поколения материалов с уникальным сочетанием прочностных свойств. Известно, что высокие эксплуатационные характеристики новых материалов удастся получить, копируя строение природных биологических композитов, чему в последнее время посвящено множество международных конференций и статей. При этом механические характеристики биологических композитов, являющиеся многоуровневыми системами, определяются свойствами компонентов на всех уровнях, поэтому подобного рода разработки должны включать в себя исследования на всех масштабных уровнях: макро-, мезо- и микроуровне. Данное направление развития материаловедения, когда создаются материалы с заданными прочностными свойствами благодаря копированию микроструктуры биологических тканей, является очень перспективным.

В этом отношении диссертация Зайцева Дмитрия Викторовича, посвященная определению физических механизмов деформации и разрушения в дентине и эмали зубов человека для разработки материалов со структурой аналогичной микроструктуре биологических твердых тканей является важной, а **актуальность** диссертационного исследования несомненна.

### Анализ содержания работы

Рецензируемая диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка литературы из 227 наименований. Общий объем диссертации составляет 277 страниц, включая 202 рисунка и 45 таблиц.

**Во введении** обоснована актуальность исследований, научная и практическая значимость полученных результатов, сформулирована цель работы, изложены основные выносимые на защиту положения, приведена краткая характеристика работы.

**Первый раздел** диссертации посвящен описанию экспериментальных методик и методов приготовления материалов для исследований. Подробно описаны методики приготовления образцов и аттестация микроструктуры, изучения механических характеристик – сжатие, изгиб, диаметрально сжатие, сдвиг.

**Во втором разделе** проведены исследования дентина, которые показали, что дентин



является высоко упругой и прочной тканью способной к значительной необратимой деформации и эффективному подавлению роста трещин. При этом дентин является вязкоупругим телом, так как его механические характеристики зависят от времени, при этом релаксация напряжений в дентине происходит за счет двух каналов: деформации и развития трещин – образования свободной поверхности, причем вклады между упругостью и пластичностью могут быть равноправными. Соотношение между вкладами упругой и необратимой деформации могут изменяться в зависимости от условий испытаний или, другими словами, соотношения растягивающих напряжений к сжимающим. Показано, что необратимая деформация в дентине обусловлена двумя факторами: органической матрицей и пористостью дентина. Вклад пористости активизируется, когда вклад растягивающих напряжений не большой и достигает своего максимального значения, при сжатии плоских образцов, где реализуется ситуация близкая к трех-осевому сжатию. Деформации и напряжения распределены в образце неоднородно, что приводит к разрушению при напряжениях, прикладываемых к образцу меньших, чем реальный предел прочности. Поэтому рост трещины затруднен при сжимающих нагрузках, когда оба вклада в пластичность активны. Необратимая деформация максимальна у плоских образцов и, соответственно, минимальна у высоких образцов. Поэтому механизм остановки трещин более эффективен, когда растягивающие нагрузки максимальны. При этом дентин себя может вести подобно хрупкому телу, как это имеет место при изгибе и диаметральной сжатии. Показано, что дентин можно рассматривать, как изотропное тело до 17% деформации, когда дентин подвергается упругой и значительной необратимой деформации. При большой величине сжимающих нагрузок разрушение может происходить только в межтуберковом дентине. Поэтому анизотропия механических свойств не проявляется при испытании на сжатие. По деформационному поведению дентин человека можно отнести к наполненному полимеру. Упругие свойства дентина можно описать мягкой матрицей наполненной твердым наполнителем, при этом не требуется многоуровневых моделей.

**Третий раздел** посвящен исследованиям эмали. Показано, что ее деформационное поведение можно рассматривать, как хрупкое при сжатии и растяжении, тогда как при приложении напряжений перпендикулярно эмалевым стержням, она способна к значительной необратимой деформации. Изгиб эмалевых стержней упрощает их разрушение, поскольку кристаллы эмали, обладающие палочкообразной формой, не разрушаются, а скользят и отделяются друг от друга, благодаря чему достигается необратимая деформация. Эмаль проявляет анизотропию механических свойств, но в отличие от дентина, где плоскость перпендикулярная дентинным каналам является легкой для разрушения, направление перпендикулярное эмалевым стержням наиболее трудное для роста трещины, которые всегда растут между стержнями, что связано с вытянутой формой кристаллитов, преимущественно ориентированных вдоль оси стержня. При этом эмаль можно рассматривать, как изотропное твердое тело до сдвиговой деформации ~5%. Несмотря на то, что эмаль это макроскопически хрупкое тело, даже при растяжении трещина может в ней остановиться, а характер ее роста схож с дентином или другими упруго – пластичными



материалами. Основным механизмом остановки трещины в эмали является образование мостов из стержней между краями трещины из-за их переплетения. Вклад органики в этот процесс мал, органическая матрица обеспечивает сдвиг стержней относительно друг друга. Испытания на направленные на изучение зависимости механических свойств эмали от скорости воздействия, также не выявили вязко-упругого поведения эмали и, следовательно, какого-либо значительного влияния органики на деформационное поведение эмали. Необходима деформация растяжения порядка 10% для разделения стержней друг от друга. Поэтому эту деформацию можно рассматривать, как критический параметр, определяющий ее прочность.

**В четвертом разделе** изучена граница раздела между дентином и эмалью. Показано, что она играет принципиальную роль в деформационном поведении всей конструкции - зуба. Она компенсирует напряжения между эмалью и дентином, так как механические свойства этих твердых тканей кардинально отличаются друг от друга, поскольку дентин это упруго-пластичный материал, тогда как, эмаль можно рассматривать, как хрупкое тело. Для компенсации напряжений между дентином и эмалью граница раздела изменяет свои свойства в непосредственной близости от компонентов, при этом она обеспечивает плавный переход от свойств дентина к свойствам эмали предохраняя материал от разрушения, предотвращая проникновение трещин из эмали в дентин. При этом отмечен большой вклад органической фазы, так как при испытаниях при пониженных температурах трещина свободно проникает через границу раздела.

Наконец в **заключении** сформулированы основные выводы по работе, заключающиеся в решении научной проблемы, которая имеет важное научно-практическое значение, а именно, рассмотрены вопросы формирования механических характеристик природных композитов, что позволяет создавать новые материалы со структурой аналогичной костной ткани для использования в различных областях техники.

К наиболее значимым результатам работы, имеющим **научную новизну**, следует отнести следующее. Дентин и эмаль являются анизотропными материалами, но, несмотря на это их можно рассматривать, как изотропные до 17% и 5% деформации сдвига, соответственно.

Показано, что необратимая деформация в дентине обеспечивается за счет органической фазы и пористости дентина. При этом при растяжении основной вклад вносит органическая фаза, а при сжатии пористость. Необратимая деформация в эмали реализуется при изгибе эмалевых стержней за счет сцепления между собой палочковидных кристаллов. Дентинные каналы включаются в процесс разрушения, когда к образцу прикладываются растягивающие нагрузки, в противном случае, когда сжимающие нагрузки максимальны, разрушение реализуется в дентине. Релаксация напряжения в этих твердых тканях происходит за счет роста трещин.

**Научная ценность** результатов исследований состоит в экспериментальном определении механизмов необратимой деформации в дентине и эмали. Показано, что она реализуется за счет вкладов органической матрицы и пористости дентина, а в эмали при изгибе эмалевых стержней за счет сцепления между собой палочковидных кристаллов. Впервые



показано, что при сжатии дентин способен к большой упругой и значительной необратимой деформации. Впервые показано, что при сжатии эмаль способна выдерживать значительные упругие деформации

**К практической значимости** работы можно отнести разработку методики приготовления малогабаритных образцов из дентина и эмали разной геометрии для механических испытаний на сжатие, изгиб, сдвиг и диаметрально сжатие. Полученные значения механических величин дентина и эмали могут быть использованы при разработке, как стоматологических материалов, так и при оценке прочностных свойств костных тканей. Полученная информация может, использована для разработки моделей, описывающих деформационное поведение как биологически твердых тканей, так и новых композитов. Разработанные в работе подходы могут быть применены для создания других материалов данного класса.

Комплексный подход к получению экспериментальных данных в совокупности со сравнением с литературными данными, обусловил **достоверность** результатов, полученных диссертантом.

#### **Замечания по диссертации и автореферату.**

1. Основное замечание по работе заключается в следующем. Проведены очень подробные исследования деформации и разрушения дентина и эмали зубов, в которых имеется развитая иерархическая структура. Однако модельных рассмотрений изученных закономерностей явно недостаточно.
2. Положение 1 сформулировано в довольно общем виде и не отражают конкретики. Например, следовало на наш взгляд расшифровать, как «разные деформационные механизмы активируются в зависимости от схемы нагружения и величины прикладываемой нагрузки». Кроме того, в представленном виде не ясна новизна данного утверждения.
3. Утверждение во втором положении о том, что материал способен к высокой упругой и значительной необратимой деформации в случае, «когда нагрузка прикладывается перпендикулярно стержням», в принципе известно в механике разрушения волокнистых композитов и требует своего обоснования.
4. На многих рисунках отсутствуют доверительные интервалы измеренных значений. Для экспериментальной работы это явный недостаток, поскольку возникает вопрос о достоверности полученных данных.
5. Присутствуют стилистические ошибки и опечатки.

Высказанные замечания **не отражаются** на общей положительной оценке работы.

#### **Общие выводы по диссертационной работе**

Резюмируя, следует констатировать, что диссертационное исследование Зайцевым Д.В. хорошо задумано и выполнено на актуальную научную тему, что позволяет квалифицировать ее как решение задачи, имеющей существенное значение для физики конденсированного состояния при разработке композитов с высокими механическими



характеристиками. Полученные в работе новые научные результаты имеют, несомненно, научную и практическую ценность и существенно продвигают проблему создания нового класса композиционных материалов со структурой аналогичной структуре природных композитов.

Материал хорошо опубликован и доложен на многих конференциях. Основные выводы диссертационной работы соответствуют ее содержанию. Автореферат соответствует содержанию диссертации и достаточно полно отражает существо выполненной работы.

Объём и уровень проведённых исследований, научная и практическая значимость полученных результатов дают основание считать, что в диссертационной работе на основании выполненных автором исследований представлены данные, которые можно квалифицировать как существенный вклад в комплексный подход по созданию нового класса материалов, и является научно-квалификационной работой, имеющей важное научное и практическое значение.

Она полностью **соответствует** критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней (п.9-14) ВАК России в части, относящейся к изложению новых экспериментальных данных о природе деформации и разрушения природных композитов с особыми свойствами, использование которых вносит значительный вклад в развитие методологии получения композиционных материалов с высоким комплексом эксплуатационных характеристик, обусловленных формированием структур аналогичных природным композитам), предъявляемым к докторским диссертациям, а её автор, **Зайцев Дмитрий Викторович**, заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07–«Физика конденсированного состояния».

Официальный оппонент:  
заведующий лабораторией физики  
наноструктурных функциональных материалов  
ИФПМ СО РАН,  
д.ф.-м.н., профессор

Сергей Николаевич Кульков

Подпись С.Н.Кулькова удостоверяю:  
ученый секретарь ИФПМ СО РАН,  
д.т.н.



Василий Сергеевич Плешанов

Почтовый адрес: Томск, 634055, пр. Академический, д.2/4. Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук.  
E-mail: kulkov@ispms.tsc.ru.  
Тел. +7-3822-508898