

«УТВЕРЖДАЮ»

Заместитель директора Института физической
химии и электрохимии им. А.Н.Фрумкина РАН,
ДХН



В.Н.Андреев

2016г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию Д.В.Зайцева «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»

Исследования механического поведения материалов с развитой иерархической структурой ведутся в течение многих лет. Тем не менее, существующий уровень понимания механизмов деформации и разрушения такого рода объектов нельзя признать вполне удовлетворительным. Многомасштабный характер процессов деформации, необходимость использования широкого набора взаимодополняющих методов исследования структуры и свойств материалов со сложной надатомной организацией, методические трудности существенно осложняют продвижение в этой области. Последнее в особенности относится к биологическим композитам, изучению механического поведения которых посвящена работа Д.В.Зайцева.

Исследование структуры и свойств биологических материалов лежит в основе сравнительно нового направления в материаловедении – биомиметики, ориентированной на создание новых материалов путем копирования природных. Развитие биомиметики открывает возможность создания нового поколения конструкционных и функциональных материалов, обладающих высокими эксплуатационными, в т.ч. механическими, характеристиками. Однако «буквальное» копирование биологических материалов сложной структуры не является самоцелью. Более важно выяснить, какими именно особенностями структуры обусловлены уникальные механические свойства биокompозитов.

Хорошо известно, что механическое поведение твердых тканей зубов существенно зависит от вида напряженно-деформированного состояния. При сжатии дентин и эмаль проявляют свойства прочных слабдеформируемых материалов, при индентировании ведут себя как высокоупругие и пластичные. Развитие трещин с фрактографической точки зрения ближе к крейзингу полимеров, чем к разрушению хрупких или упругопластичных твердых

тел. До недавнего прошлого причины необычного поведения дентина и зубной эмали были предметом многочисленных дискуссий. Вопрос о физических механизмах деформации и разрушения этих биоконпозитов был выяснен в ряде работ Д.В.Зайцева с соавторами.

Соискателем разработана методика экспериментальных исследований, включающая изготовление малогабаритных образцов, проведение механических испытаний на одноосное и диаметральное сжатие (бразильским методом), сдвиг и изгиб, выявление структурных изменений образцов на микро-, мезо- и макро- уровнях после испытаний. На основе большого объема механических испытаний и структурно-морфологических исследований установлены механизмы необратимой деформации и развития трещин в твердых тканях зубов. Подробно изучены механические свойства дентина, эмали и дентиноэмалевого соединения при различных схемах нагружения и скоростях деформации образцов, включая испытания на статическую усталость.

Наиболее важным и интересным результатом работы является, на наш взгляд, установление элементов структуры, ответственных за релаксацию напряжений и вязкость разрушения в зависимости от напряженно-деформированного состояния. Показано, что релаксация растягивающих напряжений в дентине реализуется путем сдвиговой деформации органической матрицы, тогда как сжимающие напряжения релаксируют преимущественно за счет необратимого снижения пористости межтрубочного дентина. В эмали заметная релаксация напряжений имеет место только при нагружении образцов в направлении нормали к оси эмалевых стержней и происходит путем сдвиговой деформации органической фазы, заполняющей пространство между эмалевыми стержнями. При нагружении же вдоль оси пакета стержней эмаль ведет себя как идеально хрупкий материал.

Следует особо отметить высокий методический уровень диссертационной работы Д.В.Зайцева. Выполнено весьма трудоемкое количественное исследование влияния формы и размера на механическое поведение образцов, подробно изучена зависимость механических характеристик дентина и эмали от скорости деформации. С целью исключения возможности неоднозначной трактовки результатов, обусловленной фактором формы, проведены сравнительные испытания ряда хрупких, упруго-пластичных и высокоупругих модельных материалов. Кроме того, для выделения вклада органической фазы в пластическую деформацию проведены механические испытания при температуре жидкого азота.

В целом сформулированные соискателем представления о физических механизмах деформации и разрушения дентина, эмали и дентиноэмалевого соединения представляются надежно обоснованными экспериментально, отличаются ясностью и доказательностью. Развитые представления применимы, по-видимому, для весьма широкого круга природных материалов со сложной структурной организацией.

Новизна, научная и практическая ценность диссертационной работы Д.В.Зайцева не вызывает сомнений. Вместе с тем, работа не свободна от недостатков.

Как известно, дентинные каналы "in vivo" заполнены рН-нейтральными водными растворами органических и неорганических соединений. Хотя в диссертации показано, что абсорбированная вода оказывает сильное пластифицирующее действие на дентин, вопрос о влиянии водных растворов на механическое поведение твердых тканей зубов остался без должного рассмотрения. Во всяком случае, следовало бы больше внимания уделить обсуждению полученных соискателем деформационных кривых дентина в различных средах.

Еще одно замечание касается терминологических неточностей, таких, как использование термина «энергия, затраченная на разрушение» вместо «работы разрушения», или утверждение, что «вязкоупругое поведение дентина определяет органическая фаза, которая является упруго-пластичной».

Указанные замечания никоим образом не снижают значимости основных результатов работы, вносящей существенный вклад в развитие физической механики разрушения и деформации материалов.

Диссертация написана ясным, сжатым языком. Автореферат и опубликованные работы достаточно полно и адекватно отражают содержание диссертации.

Следует отметить, что работы Д.В.Зайцева хорошо известны специалистам в области физико-химической механики материалов и физического материаловедения. Приоритет автора в исследованиях механического поведения дентина, эмали и дентиноэмалевого соединения, в разработке физических представлений о механизмах деформации и разрушения этих биокompозитов является общепризнанным.

В целом диссертация, безусловно, является оригинальным, значимым и весьма полезным исследованием. Диссертация удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК к докторским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния». Секция при Ученом совете ИФХЭ РАН «Поверхностные явления в коллоидно-дисперсных системах, физико-химическая механика и адсорбционные процессы» рекомендует диссертацию Зайцева Д.В. к защите. Обсуждение работы и результаты голосования отражены в протоколе №03/2016 от 30 марта 2016 г.

Заведующий лабораторией физико-химической
механики и механохимии ИФХЭ РАН, д.ф.-м.н.
Председатель Секции, член-корр. РАН
Ученый секретарь секции

А.И. Малкин

Л.Б. Бойнович

Д.А. Попов