

На правах рукописи



Кириллов Андрей Игоревич

**ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ КОНТРОЛЯ
ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛОМБИРОВОЧНЫХ
МАТЕРИАЛОВ**

Специальность 2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов,
изделий, веществ и природной среды

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ижевск – 2023

Работа выполнена в лаборатории информационно-измерительных систем Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук», г. Ижевск (ФГБУН УдмФИЦ УрО РАН).

Научный руководитель: **Шелковников Евгений Юрьевич**,
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Бобров Алексей Леонидович**,
доктор технических наук, доцент, профессор
кафедры «Физика, электротехника,
диагностика и управление в технических
системах» ФГБОУ ВО «Сибирский
государственный университет путей
сообщения» (г. Новосибирск)

Растегаев Игорь Анатольевич,
доктор технических наук, ведущий научный
сотрудник научно-исследовательского
отдела № 2 «Физика прочности и
интеллектуальные диагностические
системы» Научно-исследовательского
института прогрессивных технологий
ФГБОУ ВО «Тольяттинский
государственный университет» (г. Тольятти)
ФГБУН Институт физики прочности и
материаловедения Сибирского отделения
Российской академии наук (г. Томск)

Ведущая организация

Защита диссертации состоится 1 марта 2024 г. в 13:00 часов на заседании объединенного диссертационного совета 99.0.077.02 в ФГБУН УдмФИЦ УрО РАН по адресу: г. Ижевск, ул. им. Татьяны Барамзиной, 34.

С диссертацией и авторефератом диссертации можно ознакомиться в библиотеке и на сайте УдмФИЦ УрО РАН, <http://udman.ru/ru/>.

Автореферат разослан «___» _____ 2024 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью, просим направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета по адресу: 426067, г. Ижевск, ул. им. Татьяны Барамзиной, 34.

Ученый секретарь
диссертационного совета

доктор технических наук, доцент



Махнева Татьяна Михайловна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время основными направлениями разработки и модернизации композитных пломбировочных материалов нового поколения является оптимизация их физико-механических, химических и оптических свойств. Основной причиной разрушения реставраций кариозных полостей являются циклические напряжения, возникающие на границе соединения зуб-пломба, которые совместно с высоким уровнем остаточных напряжений и накопленными микрповреждениями приводят к трещинообразованию и разрушению этого соединения. Процесс разрушения начинается с локализации пластической деформации вблизи структурных неоднородностей и концентраторов напряжения, вызывающей формирование зоны деформации, накопление в ней дефектов и образование трещин. Дефект зарождается в месте концентратора напряжения и развивается в направлении градиента. Для обеспечения надежного и долговечного соединения зуб-пломба требуется не только дефектоскопия, констатирующая наличие дефекта, но и оценка локальных внутренних напряжений, что обуславливает необходимость изучения соотношения физико-механических свойств пломбировочного материала (ПМ) и твердых тканей зуба (ТТЗ). Однако, прочностные характеристики ПМ остаются малоизученными и неоднозначными.

Последние десятилетия характеризуются стремительным появлением и развитием новых информационных технологий. Так технология виртуальных приборов (совмещение ПЭВМ и плат первичного сбора данных) позволяет создавать системы измерения, управления и диагностики различного назначения практически любой производительности и сложности. Также это дает возможность программно-аппаратного совмещения измерительных систем с телекоммуникационными сетями (ТКС) и обеспечивает дистанционный доступ к измерительному и управляющему оборудованию для автоматизированного сбора информации в единую базу данных (БД).

Следует отметить, что поскольку существующие методики измерений прочностных характеристик ПМ недостаточны для выявления скрытых дефектов образцов (соединений ТТЗ и ПМ), либо требуют длительного времени их контроля и испытаний, то необходима разработка принципиально новых методик и средств контроля их качества.

Таким образом, тематика диссертации, связанная с разработкой информационно-измерительных систем (ИИС) с ТКС для изучения прочностных характеристик композитных пломбировочных материалов актуальна.

Степень разработанности темы.

Вопросам разработки и применения методов и средств для изучения ПМ и соединений ПМ с ТТЗ посвящено большое количество работ отечественных авторов: Г.Г. Ивановой, В.К. Леонтьева, В.В. Педдера, Т.Л. Рединовой, Л.Г. Мартовой, Т.В. Гринёвой, Д.Ю. Фадеевой, И.В. Безруковой, И.Я. Поюровской,

Г.Е. Аманатиди, И.В. Балынского, В.Н. Олесовой, В.П. Рогатнева, М.Л. Меликяна, В.В. Маврича, Д.В. Зайцева, П.Е. Панфилова, С.М. Ремизова, Ю.И. Лагуна и др., а также зарубежных – L.P. Mikkelsen, A. Ajovalasit, Z. Wang, C. Xiao, Fatih Sengul, Selim Sengul, A. Bardow, E. Hofer, B. Nyvad, Iijima Y., A.M. Maia, V.B. Kyotoku, A.S. Gomes, F. Lippert, A. Butler, M.C. Huysmans и др.

В рассмотренных работах представлены механические характеристики некоторых ПМ и ТТЗ (в частности, дентина и эмали). Приведены результаты трехмерного моделирования напряженно-деформированного состояния (НДС) образцов, позволяющие выявлять концентраторы напряжения, вызывающие формирование зоны деформации и накопление в ней дефектов. Так, в работе Ю.И. Лагуна приведены результаты моделирования НДС ТТЗ в среде *Nastran*, однако для полного анализа НДС необходимо использовать расчетные значения эквивалентных или интегральных напряжений. Регистрация НДС на удаленном зубе *in vitro* с использованием тензодатчика выполнялась в работах Г.Г. Ивановой, В.К. Леонтьева и В.В. Педдера. В работах Д.В. Зайцева и П.Е. Панфилова измерение НДС осуществлялось косвенно. В основном исследования проводились до разрушения образцов при увеличивающейся нагрузке (т.е. регистрировался только момент их разрушения). Это не позволяет оценить качество ПМ для жевательных (динамических) нагрузок.

Во всех рассмотренных работах не проводились экспериментальные исследования с имитацией циклического жевательного процесса, а также комплексные исследования с использованием ТКС: экспериментальное изучение прочности соединения зуб-пломба и теоретическое исследование. Такой подход позволит существенно сократить время исследований композитных ПМ, поскольку данный эксперимент на прочность можно проводить непрерывно (в отличие от клинических исследований на живых зубах *in vivo*) и одновременно на нескольких ИИС.

Объектом исследования является информационно-измерительная система для изучения прочностных характеристик твердых тканей зуба и пломбировочных материалов.

Предметом исследования является алгоритмическое, методическое и программно-аппаратное обеспечение измерений напряженно-деформированного состояния твердых тканей зуба с пломбировочными материалами при исследовании их прочностных характеристик.

Цель работы – создание инструмента для ускоренных испытаний соединений пломбировочных материалов и твердых тканей зуба с имитацией жевательного процесса.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Разработать методику и реализующую её автоматизированную ИИС для ускоренного изучения прочностных характеристик образцов (соединений композитных ПМ и ТТЗ), основанную на контроле и диагностике этих образцов с приложением циклической повышенной силовой нагрузки.

2. Создать программно-аппаратное обеспечение ИИС и исследовать математическую модель ее работы, позволяющие оптимизировать параметры ИИС с учетом особенностей работы силового блока.

3. Разработать комплексную методику, сочетающую теоретические исследования напряженно-деформированного состояния образца и экспериментальное изучение прочности соединения ТТЗ и ПМ с автоматической передачей на сервер (в БД) полученных данных для их дальнейшей обработки.

Научная новизна работы:

1. Впервые разработаны методика ускоренных испытаний прочностных характеристик образца (соединений композитных ПМ и ТТЗ *in vitro*) в статическом и динамическом (имитирующем жевательный процесс) режимах, основанная на циклическом приложении к образцу силового воздействия заранее заданной амплитуды, формы и частоты при высокоточном тензометрическом, акустическом, электрометрическом и оптическом контроле образцов, и реализующая ее двухуровневая ИИС, позволяющие с высоким быстродействием и надежностью выявлять некачественные образцы при дефектах как на поверхности, так и внутри образца на границе соединения ТТЗ и ПМ, и сократить время их испытаний.

2. Научно обоснованы требования к созданию программно-аппаратного обеспечения первого уровня ИИС на основе силового блока с использованием пьезопреобразователя (ПП) в динамическом режиме, предложена описывающая работу этого блока электромеханическая модель, дающая возможность определить оптимальные условия работы ПП с учетом влияния элементов силового блока (СБ), а также эффекта упрочнения образца с малым модулем упругости тензодатчиком и прослойкой клея, на точность измерений прочностных характеристик образцов.

3. Разработан комплексный метод, сочетающий экспериментальное изучение прочности соединения ТТЗ и ПМ с использованием второго уровня ИИС (для высокоточных измерений электропроводности ТТЗ и экспресс-диагностики прочностного состояния образцов на основе электрометрического и оптического контроля) и теоретические исследования (с применением трехмерной модели НДС этого соединения в среде Ansys Mechanical для выявления локальных областей с высоким эквивалентным напряжением), на основе программно-аппаратного совмещения первого и второго уровня ИИС с телекоммуникационной сетью и дистанционного доступа к измерительному и управляющему оборудованию, а также автоматизированного сбора данных в единую базу данных о НДС ТТЗ и ПМ для обмена информацией между исследователями и ее постобработки.

Практическая значимость диссертации.

1. Предложены к использованию методика и реализующая ее двухуровневая ИИС для ускоренных испытаний прочностных характеристик образцов, позволяющие выявлять некачественные образцы при дефектах на границе соединения ТТЗ и ПМ и сократить время испытаний образца.

2. Разработанная ИИС с телекоммуникационной системой может применяться для изучения как композитных ПМ, так и их соединений с ТТЗ в условиях поликлиники с использованием ТКС для обмена информацией между исследователями и автоматическим сохранением ее в единую базу данных.

3. Возможно использование ИИС в материаловедении для изучения микроструктуры и прочностных характеристик образцов, в современных технологиях для изготовления композитных материалов, в биологии и медицине в качестве инструмента исследований и диагностики.

Реализация и использование результатов работы.

Результаты диссертационной работы использованы при разработке и совершенствовании программно-аппаратных средств и методов для изучения прочностных характеристик композитных пломбировочных материалов с применением созданной информационно-измерительной системы и внедрены в УдмФИЦ УрО РАН, а также в учебном процессе ИжГТУ и ИГМА.

Работа выполнялась в соответствии с планами госбюджетных научно-исследовательских работ, проводимых УдмФИЦ УрО РАН:

– «Создание методов и средств контроля материалов и изделий для нанотехнологий, медицины и военной техники» (2016-2018г., рег. № 01201356428);

– «Создание комплексных методов и программно-аппаратных средств неразрушающего контроля материалов и изделий для нанотехнологий, медицины и военной техники» (2019-2021 гг., рег. № АААА-А19-119022890066-0);

– «Разработка и совершенствование методического, алгоритмического и программно-аппаратного обеспечения в системах неразрушающего контроля материалов и изделий для нанотехнологий, медицины и техники специального назначения», реализованной в рамках постановления (2022-2024 гг., рег № 122040800105-9), а также в рамках гранта по программе «УМНИК» «Разработка и исследование интеллектуального электрометрического комплекса для диагностики твердых тканей зубов» (договор №10753ГУ/2016 от 14.11.2016).

Достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждается корректной постановкой задач, выверенностью математических выкладок, корректным использованием математических методов, проверкой адекватности предложенных моделей, подтверждением теоретических результатов экспериментальными данными и результатами других авторов, применением современных верифицированных методик моделирования и программных вычислительных средств.

Методы исследования.

В теоретических исследованиях использовались: метод аналогий, численные методы, теоретические основы информатики и программирования, методы цифровой обработки информации. При разработке ИИС применялись методы имитационного моделирования и визуализации процессов на ПЭВМ.

В экспериментальных исследованиях использовались: теория измерения электрических и механических величин, статистические методы обработки результатов исследований, теория точности измерительных систем.

При получении, обработке и оформлении результатов были применены компьютерные программы *MathCAD*, *Microsoft Office*, *Ansys Mechanical*, *Micro-Cap*, а также собственные программные приложения, реализованные с помощью языков программирования *C* и *Delphi*.

Положения, выносимые на защиту:

1. Впервые разработанные методика ускоренных испытаний прочностных характеристик образца (соединений композитных ПМ и ТТЗ) в статическом и динамическом (имитирующем жевательный процесс) режимах, основанная на циклическом приложении к образцу силового воздействия заранее заданной амплитуды, формы и частоты при высокоточном тензометрическом, акустическом, электрометрическом и оптическом контроле образцов, и реализующая ее двухуровневая ИИС, позволяющие с высоким быстродействием и надежностью выявлять некачественные образцы при дефектах как на поверхности, так и внутри образца на границе соединения ТТЗ и ПМ, и сократить время испытаний образца (п.1 паспорта 2.2.8).

2. Научно обоснованные требования к созданию программно-аппаратного обеспечения первого уровня ИИС на основе силового блока с использованием ПП в динамическом режиме, предложенная и описывающая работу этого блока электромеханическая модель, дающая возможность определить оптимальные условия работы ПП с учетом влияния элементов силового блока, а также эффекта упрочнения образца с малым модулем упругости тензодатчиком и прослойкой клея, на точность измерений прочностных характеристик образцов (п.2 паспорта 2.2.8).

3. Разработанный комплексный метод, сочетающий экспериментальное изучение прочности соединения ТТЗ и ПМ с использованием второго уровня ИИС (для высокоточных измерений электропроводности ТТЗ и экспресс-диагностики напряженно-деформированного состояния образцов на основе электрометрического и оптического контроля) и теоретические исследования (с применением трехмерной модели НДС этого соединения в среде *Ansys Mechanical* для выявления локальных областей с высоким эквивалентным напряжением), на основе программно-аппаратного совмещения первого и второго уровня ИИС с телекоммуникационной сетью и дистанционного доступа к измерительному и управляющему оборудованию, а также автоматизированного сбора данных в единую базу данных о НДС ТТЗ и ПМ для обмена информацией между исследователями и ее постобработки (п.6 паспорта 2.2.8).

Апробация работы.

Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на семи международных научно-технических конференциях «Измерения, контроль, информатизация» (Барнаул, 2013-2023), студенческой академической конференции с международным участием «Communication of Students, Master Students and Post-Graduates in Academic, Scientific and Professional Areas» (Ижевск, 2013), на четырех научно-технических конференциях «Информационные технологии в науке, промышленности и образовании» (Ижевск, 2014-2021), на трех научно-технических конференциях «Приборостроение в XXI веке» (Ижевск, 2014-2017). Получена серебряная

медаль на международной выставке научно-технических и инновационных разработок «Измерение, Мир, Человек - 2023» за разработку «Двухуровневой информационно-измерительной системы с телекоммуникационной сетью для автоматизированного изучения прочностных характеристик композитных пломбирочных материалов».

Личный вклад автора.

Диссертантом лично разработаны и реализованы структура ТКС, математические модели, программно-аппаратное обеспечение и методики для исследования прочностных характеристик ПМ и их соединений. Выбор приоритетов, направлений, методов исследования, формирование структуры и содержания работы выполнены при активном участии научного руководителя д.т.н., профессора Шелковникова Е.Ю. Выбор и обоснование математических методов, использованных при разработке моделей и методик, анализ и интерпретация результатов исследований выполнены при участии к.т.н., доцента Ефремова С.М. В совместных публикациях автора его вклад состоит в постановке и проведении теоретических и прикладных исследований, которые определяют основу диссертации и новизну полученных результатов.

Соответствие диссертации паспорту специальности. П.1. «Научное обоснование новых и усовершенствование существующих методов аналитического и неразрушающего контроля природной среды, веществ, материалов и изделий». П.2. «Разработка и оптимизация методов расчета и проектирования элементов, средств, приборов и систем аналитического и неразрушающего контроля с учетом особенностей объектов контроля». П.6. «Разработка алгоритмического и программно-технического обеспечения процессов обработки информативных сигналов и представление результатов в приборах и средствах контроля, автоматизация приборов контроля».

Публикации.

По результатам диссертационных исследований опубликовано 20 печатных работ, в том числе 4 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 1 статья в издании, входящем в базу Scopus, 1 патент на изобретение и 1 патент на полезную модель, 3 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация содержит введение, четыре главы, заключение, изложенные на 175 стр. машинописного текста. В работу включены 54 рис., 28 табл., список литературы из 153 наименований, приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной для исследования темы, сформулирована цель, определены задачи диссертационной работы. Представлены основные положения, выносимые на защиту, раскрыты научная новизна и практическая значимость работы, отмечено ее соответствие пунктам паспорта научной специальности.

В первой главе представлен обзор современного состояния вопросов в области исследований пломбировочных материалов и их соединений с твердыми тканями зуба. Выполнен анализ методов изучения прочностных характеристик, в том числе с применением испытательных машин. Выявлено, что при использовании тензодатчиков необходимо учитывать эффект упрочнения ТТЗ, обладающих малым коэффициентом упругости. Приведены методы совмещения информационно-измерительных и управляющих систем и способы передачи данных по ним. Рассмотрены вопросы формирования и моделирования напряженно-деформированного состояния реальных образцов. Дан анализ способов контроля и обнаружения дефектов в соединениях твердых тканей зуба и пломбировочного материала. Так как существующие методы испытаний образцов в процессе их эксплуатации недостаточны для выявления скрытых дефектов соединения зуб-пломба либо требуют длительного времени их испытаний и контроля, то необходима разработка принципиально новых методов испытаний и средств их реализации. Определены направления исследований и задачи, выполнение которых необходимо для достижения цели.

Во второй главе рассмотрена разработанная двухуровневая ИИС (защищенная патентом РФ) для ускоренных испытаний прочностных характеристик образца (соединения зуб-пломба) в динамическом (имитирующем жевательный процесс) режиме. ИИС основана на циклическом приложении к образцу силового воздействия заранее заданной амплитуды, формы и частоты при тензометрическом, акустическом, электрометрическом и оптическом контроле прочности соединения пломбировочного материала и твердых тканей зуба (рисунок 1).

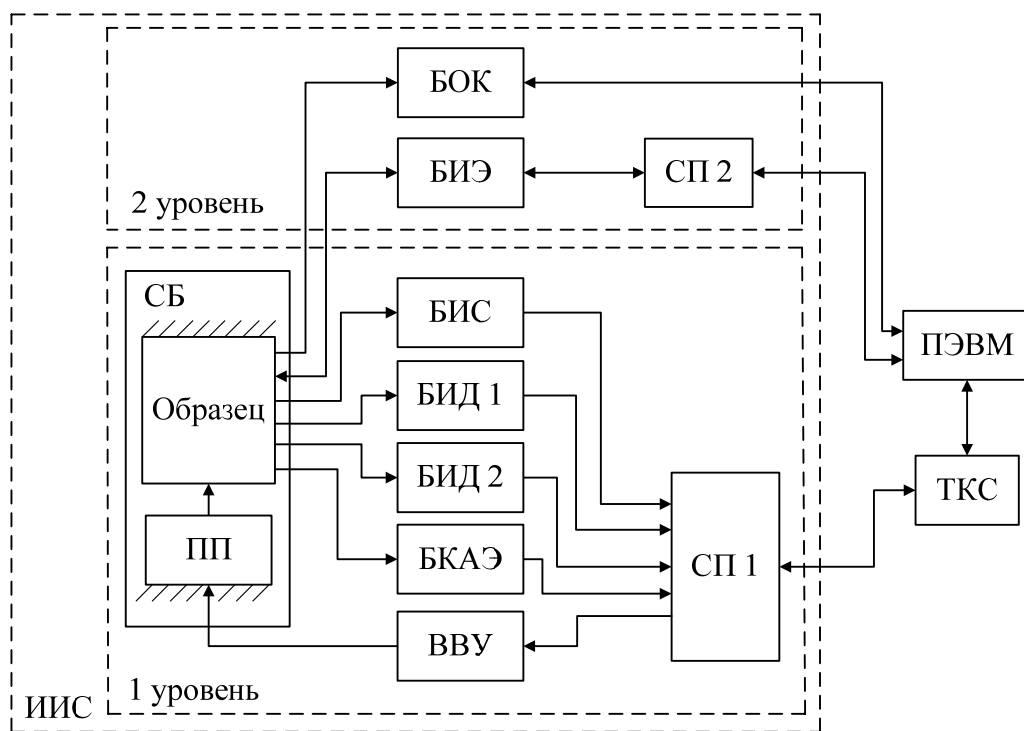


Рисунок 1 – Структурная схема двухуровневой ИИС

В предложенной ИИС тензометрический и акустический контроль (первый уровень) осуществляется отдельно от электрометрического и оптического

контроля (БОК) (второй уровень). Это связано с тем, что при проведении испытаний образец находится внутри силового блока (СБ) и физически недоступен для электрометрического и оптического контроля. Первый уровень ИИС включает в себя СБ, в который входят силовой пьезоэлектрический преобразователь (ПП) и образец. СБ выполнен из жесткого материала, обеспечивающего передачу силы (давления) от ПП к образцу. Для работы ПП необходим высоковольтный усилитель (ВВУ). Для тензометрического контроля и диагностики используются блоки измерения продольной и поперечной деформаций (БИД 1 и БИД 2, соответственно), блок измерения силы (БИС). Для акустического контроля применяется блок контроля акустической эмиссии (БКАЭ). Сигнальный процессор 1 (СП 1) обеспечивает автоматизированную работу всего первого уровня ИИС.

Электрометрический контроль и диагностика осуществляются с использованием автономного блока измерения электропроводности (БИЭ) и сигнального процессора 2 (СП 2). СП необходим для обработки и предварительного сбора клинических данных, а также для управления БИЭ. Следует отметить, что электрометрический способ можно применять как для исследуемых образцов (зуб *in vitro*, ПМ), так и в клинических условиях (зуб *in vivo*).

При тензометрическом контроле по полученной информации с БИС, БИД 1 и БИД 2 вычисляются упругие характеристики образца (модуль упругости Юнга E и коэффициент Пуассона μ), как в статическом, так и в динамическом режимах:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_{\text{прод}}} = \frac{\Delta P \cdot l}{S \cdot \Delta l_{\text{прод}}}; \quad \mu = \frac{\varepsilon_{\text{поп}}}{\varepsilon_{\text{прод}}} = \frac{\Delta l_{\text{поп}}}{\Delta l_{\text{прод}}}, \quad (1)$$

где σ – напряжение, соответствующее приращению силы ΔP при нагружении; S – площадь поперечного сечения рабочей части образца; $\varepsilon_{\text{прод}}$ и $\varepsilon_{\text{поп}}$ – соответственно, относительные продольная и поперечная деформации; $\Delta l_{\text{прод}}$ и $\Delta l_{\text{поп}}$ – соответственно, абсолютные продольная и поперечная деформации; l – длина базы продольного тензодатчика.

Силовое воздействие на образец осуществляется силовым пьезопреобразователем (ПП) (рисунок 1). Применение ПП позволило уменьшить размеры силового блока, снизить уровень акустических шумов (по сравнению с испытательными машинами) и использовать для контроля и остановки испытаний метод акустической эмиссии (акустический способ контроля). Параметры используемого в ИИС многослойного ПП 6x6x40: максимальное удлинение $\Delta L_{\text{макс}}$ – 48 мкм; макс. напряжение – 150В; блокирующая сила $F_{\text{блок}}$ – 1500Н; статистическая емкость – 7,5 мкФ; макс. частота – 1кГц. Необходимо отметить, что сила $p(t)$, генерируемая ПП, зависит от податливости всего СБ, а также образца:

$$p(t) = A \cdot k(t) \cdot \frac{B \cdot F_{\text{блок}}}{B \cdot F_{\text{блок}} \cdot C_L + A \cdot \Delta L_{\text{макс}}} + p_{\text{нач.}}, \quad (2)$$

где $k(t)$ – перемещение ПП в холостом режиме; C_L – общая податливость (обратно пропорциональная жесткости) образца и СБ; $p_{\text{нач.}}$ – начальная внешняя сила; A и B – коэффициенты.

На рисунке 2 приведена электрическая схема модели силового блока, полученная методом аналогий из механической модели (рисунок 3) (где C_p, m_p – податливость и масса ПП; C_s, m_s – податливость и масса образца; C_k, C_G – податливости клея в поперечном и продольном направлениях; C_T – податливость тензодатчика; $C_1, C_2, C_3, m_1, m_2, m_3$ – податливости и массы элементов СБ).

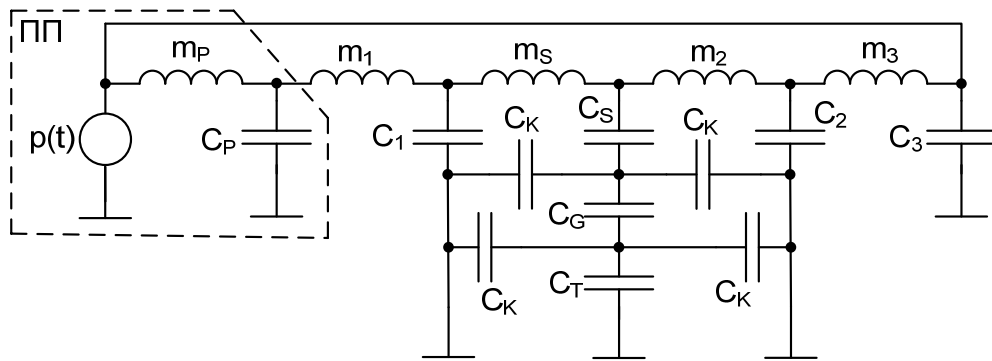


Рисунок 2 – Электрическая схема модели силового блока

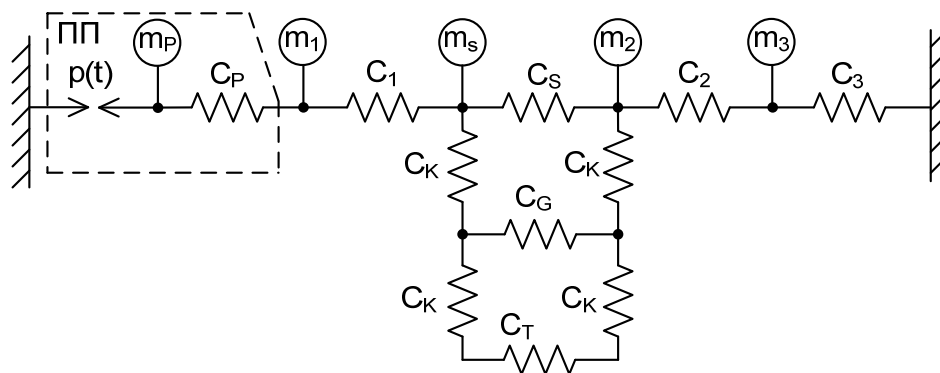


Рисунок 3 – Механическая схема модели силового блока

Податливости образца (зуба), прослойки клея, тензодатчика, а также СБ зависят от свойств материала и размеров, и определяются по следующей формуле:

$$C_i = \frac{1}{E_i} \cdot \left[\sum_{j=1}^N \frac{L_j}{S_j} \right]_i, \quad (3)$$

где C_i – податливость i -ого элемента; E_i – модуль Юнга i -ого элемента; L_j – длина j -ой части i -ого элемента; S_j – площадь поперечного сечения j -ой части i -ого элемента; N – количество частей i -ого элемента.

На основе полученной электрической схемы (рисунок 2) разработана электромеханическая модель (ЭММ) (представляющая собой выражение для уточненной податливости образца C_s''), учитывающая влияние податливости прослойки клея и тензодатчика на результат измерения деформации образца (эффект упрочнения образца):

$$C_s''(t) = \frac{D(t)}{p(t) - D(t)} \cdot \left(2C_k + \frac{C_G \cdot (2C_k + C_T)}{C_G + 2C_k + C_T} \right), \quad (4)$$

где $D(t) = Q(t, C_T) \cdot (C_G + 2C_K + C_T) / (C_T C_G)$; $p(t)$ – приложенная сила на образец в момент времени t ; $Q(t, C_T)$ – измеренная абсолютная продольная деформация тензодатчика в момент времени t .

Податливости для (4) и уточненный модуль упругости образца (E_S'') можно получить из (3):

$$C_T = \frac{L_T}{E_T \cdot H_T \cdot B_T}; \quad C_G = \frac{L_T}{E_g \cdot H_g \cdot B_T}; \quad C_K = \frac{H_g}{E_g \cdot L_T \cdot B_T \cdot 2}; \quad E_S'' = \frac{L_T}{C_S'' \cdot S}, \quad (5)$$

где L_T , B_T , H_T – длина, ширина, толщина тензодатчика, соответственно; H_g – толщина прослойки клея; S – поперечное сечение образца без клея и тензодатчика; E_T , E_g – модули упругости тензодатчика и прослойки клея, соответственно.

Разработанная ЭММ, описывающая работу СБ, позволила выполнять моделирование в среде *Micro-Cap*, которая имеет полный набор необходимых видов моделирования (частотный анализ, анализ по времени и др.), а также возможность использовать формулы и математические зависимости совместно с электрическими схемами. Выбрана следующая система аналогий: сила, Н – напряжение, В; колебательная скорость, м/с – ток, А; масса, кг – индуктивность, Гн; податливость, м/Н – емкость, Ф.

На основе анализа ЭММ, необходимо применять два последовательно расположенных ПП для имитации жевательного процесса: генерируемая сила составила 950 Н для образца из ТТЗ ($E = 14,7$ ГПа), что больше допустимой нагрузки 600 Н для имитации жевательного процесса.

Выполнен частотный анализ схемы (рисунок 2) в среде *Micro-Cap* для последовательного расположения ПП при разной податливости образца C_S (4,25 и 7 нм/Н), а также изучено влияние конструктивного расположения двух ПП (последовательно и параллельно) на генерируемую силу при $C_S = 1,5$ нм/Н. В данном случае оптимальным законом силового воздействия является синусоида. Четыре LC-контура в электрической схеме (рисунок 2) образуют 4 частоты резонанса. По напряжению выявлены следующие базовые частоты (при последовательном расположении двух ПП и $C_S = 1,5$ нм/Н): 3,1; 5,1; 13,8; 112,7 кГц, а по току – 3,7; 13,7; 18,5; 133,3 кГц. Установлено, что теоретический рабочий диапазон частот ПП составляет от 0 до 410 Гц при общей массе СБ 10 кг. Выбор максимальной частоты осуществлялся по допустимому увеличению амплитуды напряжения на 3 дБ.

В целом, использование электромеханической модели (4) позволило повысить точность измерения деформации образца. Применение данной модели актуально если модуль упругости образца мал или соизмерим с модулем упругости прослойки клея или самого тензодатчика. При этом определены оптимальные условия работы ПП с учетом влияния элементов СБ.

В третьей главе приведены аппаратные, технологические и алгоритмические решения, направленные на создание двухуровневой ИИС для ускоренных испытаний прочностных характеристик образцов. Представлены ее структурная схема, конструкция и внешний вид.

Разработанная конструкция СБ (рисунок 4), для двух последовательно расположенных ПП, позволяет имитировать циклический жевательный процесс на зубах *in vitro*. Масса СБ составила ~ 2 кг, высота – 267 мм, что позволило сделать его компактным с возможностью расположения на рабочем столе исследователя.

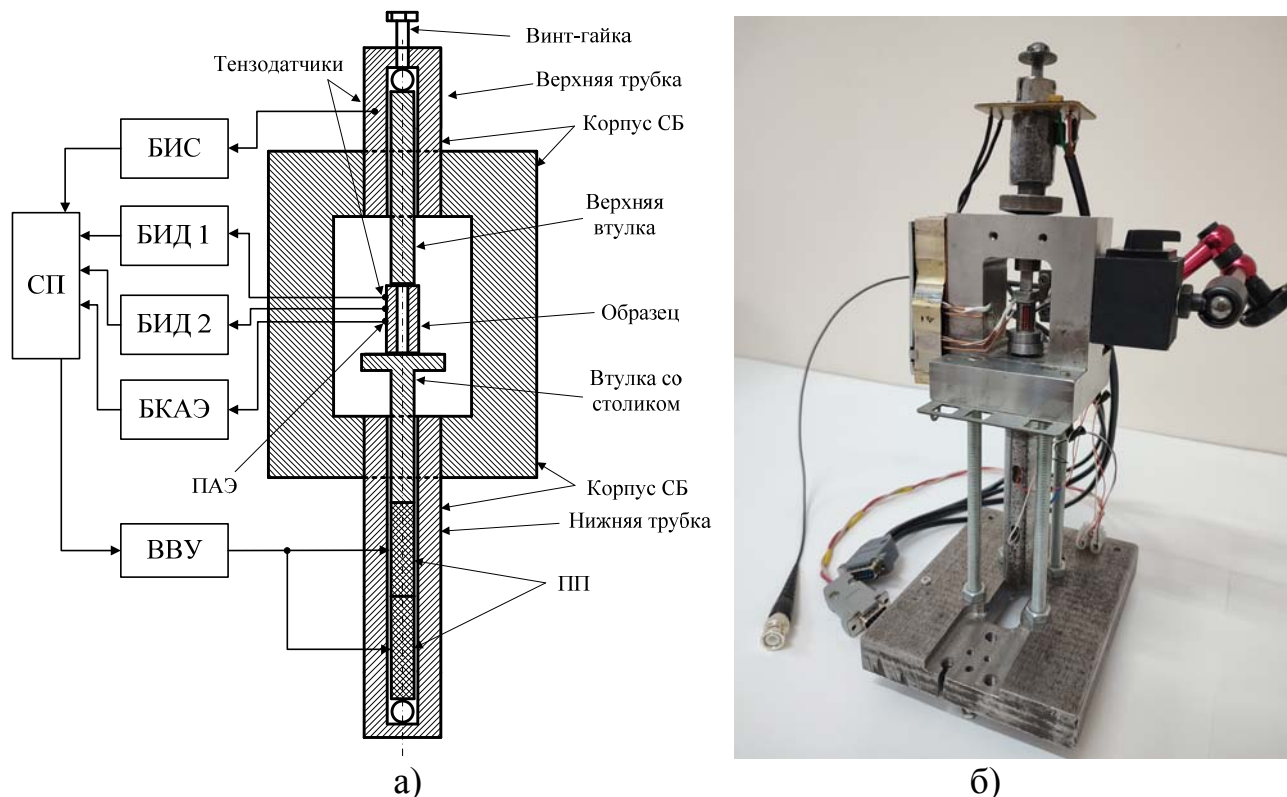


Рисунок 4 – Силовой блок (1 уровень двухуровневой ИИС): а – структурная схема и конструкция СБ с исследуемым образцом; б – внешний вид

СБ имеет винт-гайку для задания начальной нагрузки $p_{нач}$. (при этом осуществляется перемещение внутренней верхней втулки). Для обеспечения соосности всех ПП, образца и втулок, а также для снижения крутящего момента от винт-гайки применяются шарики или втулки с полусферическим торцом, установленные на дне полых цилиндров. Вся конструкция является механически замкнутой через металлический корпус СБ. К образцу прикреплены тензодатчики и преобразователь акустической эмиссии (ПАЭ) для измерения деформаций и для контроля акустической эмиссии, соответственно. На конструкцию СБ установлены тензодатчики для измерения приложенной силы. Для удержания образца (ТТЗ с ПМ) создан разборный многоразовый держатель.

На рисунке 5 приведена структура программного обеспечения (ПО), где каждый блок – это отдельная программа. Центральной частью ТКС является сервер с базой данных (БД). Все программы на ПЭВМ и сервере взаимодействуют с программой для БД с помощью *SQL*-запросов. Данные передаваемые от СП на сервер и в ПЭВМ имеют определенную структуру: преамбула, тип данных, информационное поле и циклический избыточный код.



Рисунок 5 – Структурная схема ПО для комплексного исследования прочностных характеристик ПМ

Останов испытаний (на 1 уровне двухуровневой ИИС) осуществляется по 6 критерием: 1) превышение амплитуды сигнала с преобразователя акустической эмиссии; 2) отклонение эквивалентного значения модуля Юнга на величину $E_{нор}$; 3) отклонение значения коэффициента Пуассона на величину $\mu_{нор}$; 4) скачкообразное изменение приложенной нагрузки на величину $P_{нор}$; 5) отклонение высокого напряжения на ПП за границы диапазона ($C_{мин}$; $C_{макс}$); 6) превышение заданного количества циклов (периодов) ($M_{макс}$).

Для обнаружения внутренних дефектов соединений зуб-пломба разработана методика на основе электрометрического метода. Приведена эквивалентная схема (рисунок 6) протекания тока через ТТЗ *in vivo*, которая позволила выполнить теоретическое и экспериментальное исследование.

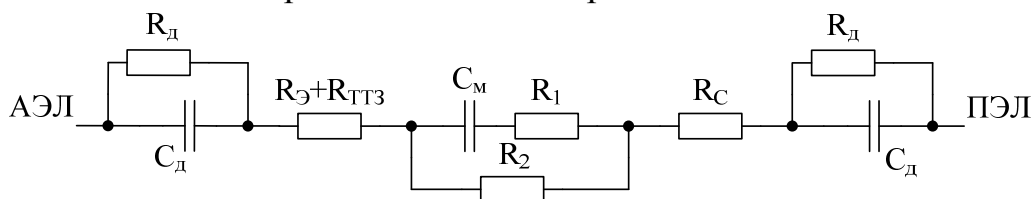


Рисунок 6 – Эквивалентная схема протекания тока между активным и пассивным электродами через биоткань, электролиты электродов и через двойной электрический слой (где R_1 и R_2 - сопротивления внутриклеточной и межклеточной жидкостей; C_m – емкость мембраны клетки; $R_э$ – сопротивление раствора $CaCl_2$; $R_{ТТЗ}$ – сопротивление ТТЗ; R_c – сопротивление раствора $NaCl$; R_d , C_d – активная и емкостная составляющая двойного электрического слоя; АЭЛ, ПЭЛ – активный и пассивный электроды)

Теоретический анализ электропроводности электролитов электродов ($R_э$ и R_c) и биоткани (R_1 и R_2) показал, что их влиянием на общую электропроводность ТТЗ ($R_{ТТЗ}$) можно пренебречь. Экспериментально установлено, что измерения на переменном прямоугольном токе позволяют максимально исключить влияние двойного электрического слоя (R_d , C_d).

Предложено реализующее данную методику интеллектуальное электрометрическое устройство (состоящее из БИЭ и СП, рисунок 1) для контроля и диагностики ТТЗ (защищенное патентом РФ), структурная схема и внешний вид которого представлены на рисунке 7.

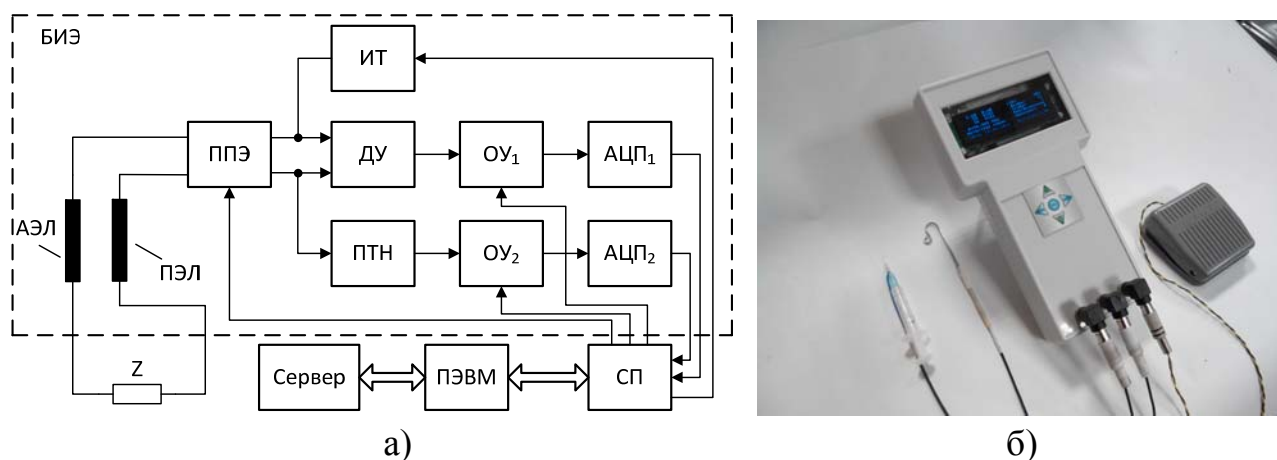


Рисунок 7 – Интеллектуальное электрометрическое устройство: а – структурная схема (где АЭЛ – активный электрод; ПЭЛ – пассивный электрод; ИТ – источник тока; ПТН – преобразователь ток-напряжение; ОУ – усилитель с программируемым коэффициентом усиления; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ДУ – дифференциальный усилитель; СП – сигнальный процессор; Z – измеряемый импеданс; ППЭ – переключатель полярности электродов); б – внешний вид

Устройство позволяет исключить эффект поляризации биотканей и электродов путем изменения полярности электродов (АЭЛ и ПЭЛ) с помощью переключателя полярности электродов (ППЭ) и повысить точность контроля и диагностики внутренних дефектов соединения зуб-пломба как на ТТЗ *in vitro*, так и *in vivo*.

В четвертой главе описаны структура телекоммуникационной сети и обобщенная методика проведения комплексного исследования ПМ, представлены результаты экспериментальных исследований разработанной двухуровневой ИИС, диаграммы деформирования образцов в статическом и динамическом режимах. Приведены методика и программа для постобработки данных (полученных в среде *Ansys Mechanical*) для определения значений напряжений и деформаций во всех узлах модели. Представлены выражения для определения общей погрешности модуля Юнга и коэффициента Пуассона образцов.

Объединение нескольких ИИС с помощью телекоммуникационной сети (ТКС) (рисунок 8) дает возможность автоматизировать сбор и обработку измеренных данных.

Это позволяет сократить время на исследование образцов по сравнению с экспериментами *in vivo*, за счет одновременного изучения прочностных характеристик образцов на нескольких ИИС (от 1 до N). Использование локальных вычислительных сетей (ЛВС) по стандарту *Ethernet* позволяет масштабировать систему за счет относительно простого и отлаженного процесса подключения к серверу дополнительных ПЭВМ.

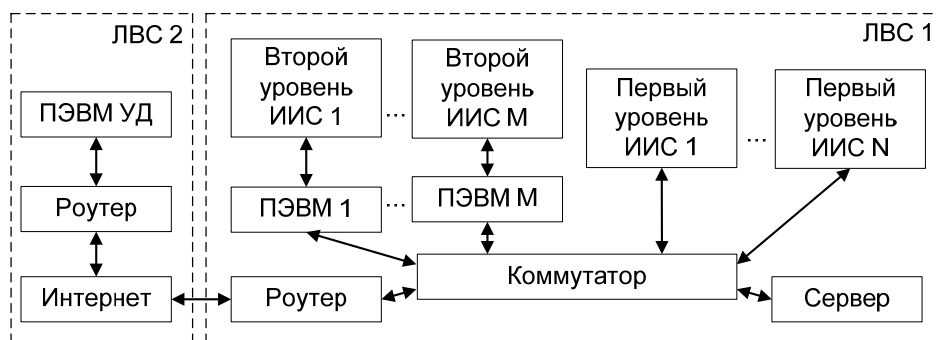


Рисунок 8 – Структура телекоммуникационной сети (где ПЭВМ УД – удаленная ПЭВМ)

Для измерения НДС образцов с использованием разработанной ИИС разработана методика, по которой выполняется калибровка каналов АЦП, измерений силы и деформаций.

Для проведения эксперимента на основе разработанной ИИС были подготовлены образцы из удаленных зубов, а также образцы из различных ПМ в виде цилиндров (диаметром 9 мм, высотой 10-17 мм). Образцы из удаленных зубов фиксировались в специальных металлических держателях (рисунок 9), после чего стоматолог-терапевт выполнял препарирование и реставрацию полости ПМ.

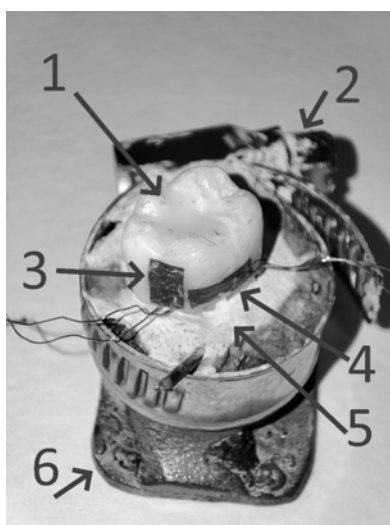


Рисунок 9 – Увеличенное изображение держателя с закрепленным образцом (где 1 – ПМ; 2 – хомут; 3 – продольный тензодатчик; 4 – поперечный тензодатчик; 5 – алебастр; 6 – держатель)

Для создания равномерной нагрузки на верхнюю часть зуба использован сплав Вуда. Это позволило при относительно низких температурах (200 °С) создать аналог зуба-антагониста. После препарирования к зубу *in vitro* приклеивались два тензодатчика: в продольном и поперечном направлениях.

В таблице 1 приведены результаты экспериментальных исследований НДС подготовленных образцов из удаленных зубов с ПМ в статическом ($E_{стат}$ и $\mu_{стат}$) и динамическом ($E_{цикл}$ и $\mu_{цикл}$) режимах. Для вычисления модуля упругости было введено допущение, что площадь сечения ТТЗ имеет форму эллипса (у которого параметры $d1$ и $d2$ – это длинная и короткая оси, соответственно).

Таблица 1. Результаты исследований НДС удаленных зубов

№	ПМ	Расположение ПМ	$d1, \text{ мм}$	$d2, \text{ мм}$	$S, \text{ мм}^2$	$E_{\text{стат.}}, \text{ ГПа}$	$\mu_{\text{стат.}}$	$E_{\text{цикл.}}, \text{ ГПа}$	$\mu_{\text{цикл.}}$
1	DiaFil	Сверху	12	11	103,67	39,1	1,3	39,5	1,28
2	DiaFil	Сверху	11,5	10	90,32	28,7	0,309	31,1	0,334
3	Charisma	Сверху-сбоку	13	12	122,52	28,5	0,171	29,0	0,162
4	Charisma	Сверху	9,7	11	83,80	48,4	0,84	50,8	0,864
5	Стекло-иономер	Сбоку	11	8,5	73,43	40,3	0,844	39,2	0,822
6	Призма	Сбоку	11	11,5	99,35	50,5	0,72	47,3	0,68
7	Filtek Z250	Сверху	10,5	9,4	77,52	70,7	0,84	73,1	0,87
8	Valux plus	Сбоку	10,5	10	82,47	80,4	0,363	80,4	0,398
9	Унифас	Сбоку	9,5	10	74,61	77,3	0,481	77,3	0,477
10	Призма	Сверху	9,3	10,5	76,69	66,3	1,185	66,9	1,2
11	Filtek Z250	Сбоку	10,5	9,3	76,69	87,9	0,568	89,3	0,552
12	Valux plus	Сверху	11,5	8	72,26	44,3	0,508	44,7	0,548

Также были проведены эксперименты на цилиндрических образцах из ПМ и алюминия. Значения модуля Юнга и коэффициента Пуассона для алюминия соответствуют справочным данным. Полученные значения модуля упругости и коэффициента Пуассона для ПМ хорошо согласуются с литературными данными.

На рисунке 10 приведены типовые экспериментальные графики «сила-деформация» и «деформация-деформация» в динамическом и статическом режимах на примере одного из исследованных образцов (№1 в таблице 1). На графиках пунктирные линии соответствуют динамическому режиму, сплошные линии – статическому режиму. По наклону линий определялся модуль упругости (по графикам «сила-деформация») и коэффициент Пуассона (по графикам «деформация-деформация»).

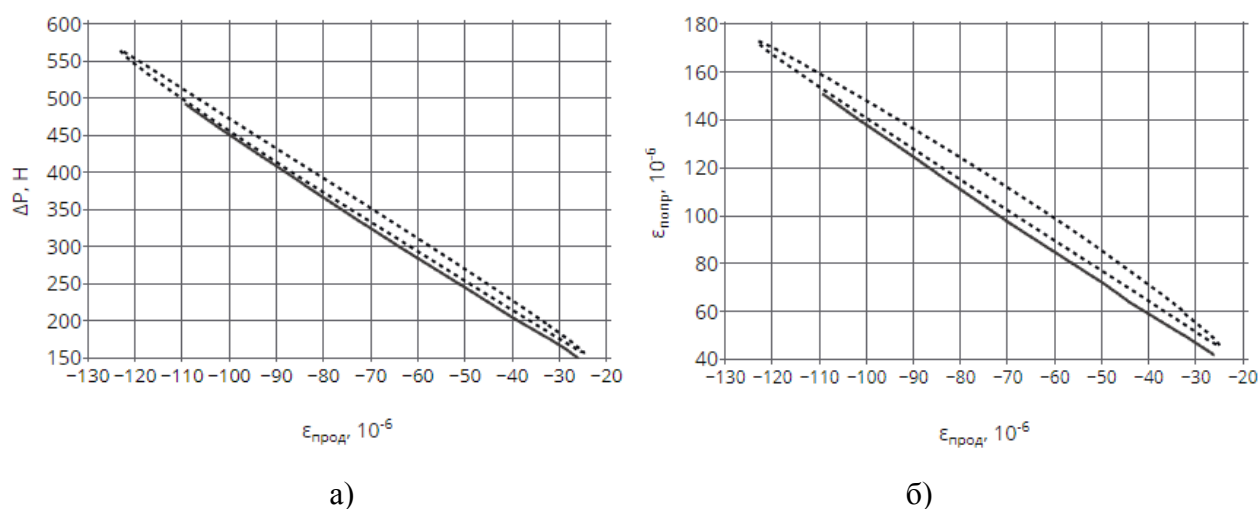


Рисунок 10 – Экспериментальные графики для статического и динамического режимов работы СБ: а – «сила-деформация»; б – «деформация-деформация»

Из анализа графиков следует, что общий наклон линий в статическом и динамическом режимах совпадают. Это позволяет определять прочностные

характеристики исследуемых образцов без их разрушения в процессе периодического изменения воздействующей силы (имитирующей жевательный процесс), а также сравнивать поведение материалов при разных частотах воздействия (например, более 1 Гц) в исследованном диапазоне. Следует отметить, что в динамическом режиме (при приложении циклической нагрузки) на графиках проявляется механический гистерезис, что обусловлено внутренним трением материала.

Для сравнения экспериментальных данных с результатами теоретических исследований НДС трехмерной упругой модели осуществляется постобработка данных (полученных в среде *Ansys Mechanical*) после моделирования (расчета) на основе разработанной методики. Автоматизированная постобработка массива значений напряжений и деформаций в узлах конечно-элементной сетки (КЭ-сетки) при разных параметрах материалов (эмаль, дентин, ПМ и др.) позволила выявлять локальные области с повышенным (или пониженным) напряжением и выполнять сравнительный анализ. Данный анализ необходим, так как количество узлов КЭ-сетки может быть 1000 и более единиц. Особенностью разработанного алгоритма и программы *Convert* (рисунок 11) является отображение данных сравнительного анализа (коэффициенты d) в виде профилограммы, что позволяет визуально оценить изменение напряжений в узлах конечно-элементной сетки для различных параметров материалов (модуля Юнга, коэффициента Пуассона).

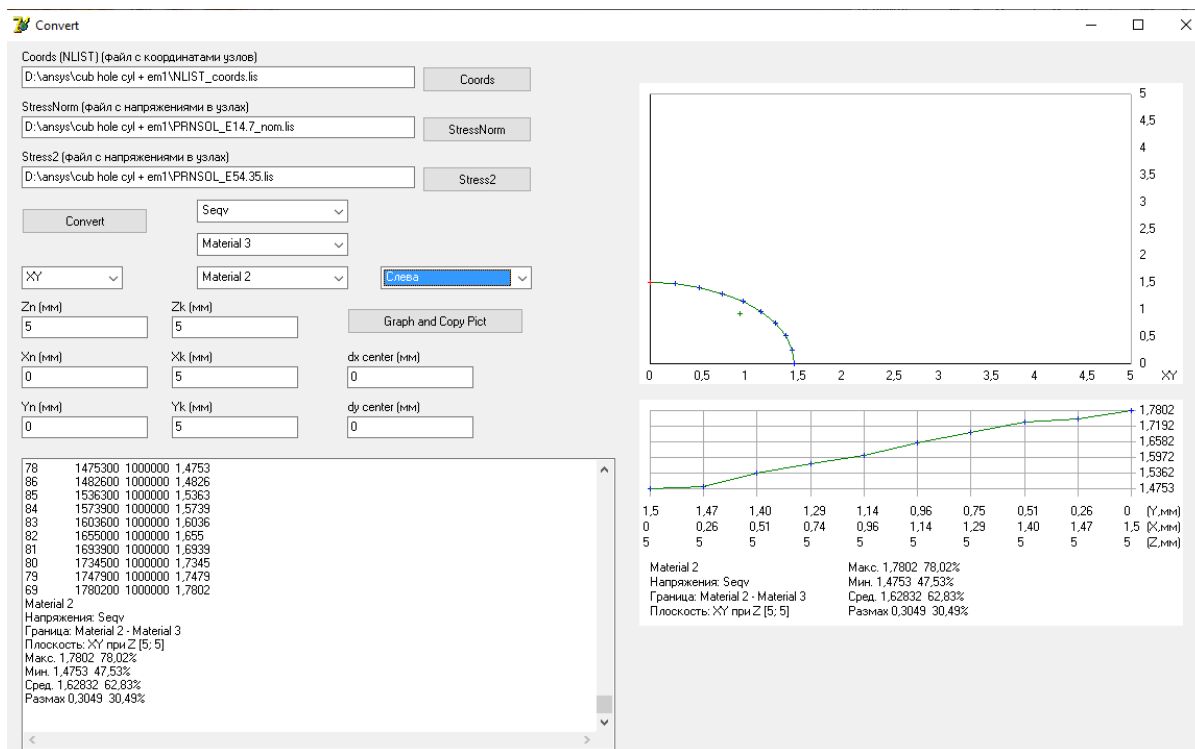


Рисунок 11 – Интерфейс программы *Convert* для постобработки результатов моделирования

Основные рассчитываемые параметры образца (в частности, модуль Юнга и коэффициент Пуассона) по формуле (1) зависят от многих элементов ИИС (тензодатчиков мостовых схем, аналого-цифровых преобразователей и др.). В работе выполнена оценка вклада этих элементов в общую погрешность

нахождения модуля Юнга и коэффициента Пуассона на основе следующих выражений:

$$E_{\text{экв}} = -Z \cdot \frac{2 \cdot \Delta e \cdot K_{\text{прод}} \cdot RT1 \cdot (Um \cdot R1 + \Delta e_{\text{прод}} \cdot (R1 + RT1))}{(Um \cdot (1 + \mu_{\text{СБ}}) - \Delta e \cdot (1 - \mu_{\text{СБ}})) \cdot \Delta e_{\text{прод}} \cdot (R1 + RT1)^2},$$

$$\mu = -\frac{K_{\text{прод}} \cdot RT1}{K_{\text{попр}} \cdot RT2} \cdot \frac{\Delta e_{\text{попр}} \cdot (R2 + RT2)^2}{\Delta e_{\text{прод}} \cdot (R1 + RT1)^2} \cdot \frac{(Um \cdot R1 + \Delta e_{\text{прод}} \cdot (R1 + RT1))}{(Um \cdot R2 + \Delta e_{\text{попр}} \cdot (R2 + RT2))}, \quad (6)$$

где $E_{\text{экв}}$ – эквивалентное значение модуля Юнга; $\mu_{\text{СБ}}$ – коэффициент Пуассона СБ; Z – постоянный коэффициент СБ; K , $K_{\text{прод}}$ и $K_{\text{попр}}$ – коэффициенты чувствительности тензодатчиков для измерения силы, продольной и поперечной деформации, соответственно; Um – питание мостовых схем; $R1$, $R2$ – сопротивления резисторов, расположенных в одном делителе напряжения с тензодатчиками $RT1$ и $RT2$, соответственно; $RT1$, $RT2$ – измеренные номинальные значения сопротивлений тензодатчиков в мостовых схемах «четверть моста», для измерения продольной и поперечной деформации, соответственно; Δe , $\Delta e_{\text{прод}}$ и $\Delta e_{\text{попр}}$ – напряжения разбаланса мостовых схем для измерения силы, продольной и поперечной деформации, соответственно. Знак «−» в выражениях (6) показывает то, что продольная деформация при сжатии образца имеет отрицательный знак.

Относительные погрешности вычисления модуля Юнга E и коэффициента Пуассона μ образца составили 2.4% и 1.4%, соответственно.

Заключение

В результате проведенных в работе комплексных исследований разработаны и научно обоснованы физико-математические, алгоритмические, методические и программно-аппаратные средства информационно-измерительной системы и телекоммуникационной сети для изучения прочностных характеристик композитных пломбировочных материалов при работе в статическом и динамическом режимах, что имеет существенное значение для обеспечения надежного соединения пломбировочного материала с твердыми тканями зубов для создания новых перспективных пломбировочных материалов.

1. Для ускоренного изучения прочностных характеристик ПМ и ТТЗ разработана двухуровневая ИИС, включающая тензометрический, акустический, электрометрический и оптический способы их контроля. Первый уровень ИИС предназначен для ускоренного проведения испытаний образцов и представляет собой силовой блок с имитацией жевательного процесса. Второй уровень служит для обнаружения и контроля дефектов в образцах.

2. Разработана электромеханическая модель процесса нагружения образца в статическом и динамическом режимах работы силового блока информационно-измерительной системы (тензометрический контроль), позволяющая определять оптимальные условия работы силового пьезоэлектрического преобразователя. Установлено, что синусоидальный сигнал является оптимальным законом силового воздействия; теоретический диапазон частот до 410 Гц; максимальная генерируемая сила составила 950 Н

(для образца с модулем Юнга 14,7 ГПа). Данная сила является достаточной для имитации жевательного процесса. Силовой блок должен быть выполнен из материала с высоким модулем Юнга. Теоретически обоснован выбор двух последовательно установленных ПП.

3. При разработке ЭММ составлена математическая модель эффекта упрочнения образца тензодатчиком и клеем. Использование данной модели позволило повысить точность измерения деформации. Данную модель необходимо применять если модуль упругости образца мал или соизмерим с модулем упругости клея или самого тензодатчика.

4. Созданы силовой блок и программно-аппаратные средства для изучения прочностных характеристик пломбировочных материалов и их соединений с твердыми тканями зубов, реализующие тензометрический и акустический контроль. Масса стального силового блока составляет ~ 2 кг, что позволило сделать его компактным с возможностью расположения на рабочем столе исследователя.

5. Разработан алгоритм с цифровым фильтром и реализующее его ПО для проведения прочностных испытаний соединений твердых тканей зубов с пломбировочными материалами, позволяющий выполнять автоматический останов испытаний по основному критерию – сигналу акустической эмиссии и пяти дополнительным критериям при тензометрическом контроле в динамическом режиме: отклонение модуля Юнга и коэффициента Пуассона от номинальных значений; скачкообразное изменение приложенной нагрузки; отклонение допустимого напряжения, подаваемого на ПП; превышение заданного количества циклов, имитирующих жевательный процесс (синусоидальный сигнал). Для выделения и фильтрации информационного сигнала по дискретным данным от тензодатчиков разработан цифровой БИХ-фильтр, позволяющий выделять постоянную составляющую и гармонический сигнал с заданной частотой возвратно-поступательных движений ПП.

6. Предложены методика высокоточных измерений электропроводности ТТЗ и реализующее ее интеллектуальное электрометрическое устройство для диагностики ТТЗ (электрометрический контроль), основанные на изменении полярности электродов и позволяющие исключить эффект поляризации электродов и биотканей как для зубов *in vivo*, так и *in vitro*. Экспериментально установлено, что измерения на переменном токе прямоугольной формы позволяют максимально исключить влияние поляризации электродов.

7. Предложены методика сравнительного анализа эквивалентных напряжений для трехмерной модели образца и реализующее ее программное обеспечение *Convert*, позволяющие оценить изменение напряжений в узлах конечно-элементной сетки на границе двух материалов как внутри объемного тела, так и снаружи. Программа предназначена для постобработки результатов трехмерного моделирования НДС в среде *Ansys Mechanical* и позволяет получить полную информацию (по эквивалентным напряжениям) о НДС трехмерной модели.

8. Анализ общих погрешностей модуля Юнга и коэффициент Пуассона образца позволил получить следующие рекомендации: необходимо выбирать

материал конструкции силового блока с высоким коэффициентом Пуассона; питание мостовых схем тензодатчиков должно быть максимально возможным (с учетом саморазогрева); сопротивление резисторов мостовых схем должно быть больше или равно номинальному сопротивлению тензодатчиков. Относительные погрешности вычисления модуля Юнга E и коэффициента Пуассона μ образца составили 2,4% и 1,4%, соответственно.

9. Создана комплексная методика проведения прочностных испытаний пломбировочных материалов с твердыми тканями зубов, основанная на тензометрическом, акустическом, оптическом и электрометрическом способах контроля и моделировании напряженно-деформированного состояния в трехмерном пространстве в среде *Ansys Mechanical*, позволяющая проводить теоретические и экспериментальные исследования прочности соединения ТТЗ и ПМ с применением ТКС. Применение ТКС позволило ускорить проведение испытаний ПМ с ТТЗ за счет одновременного изучения образцов на нескольких ИИС. При этом возможно применить по одному устройству 2-ого уровня на несколько устройств 1-ого уровня.

10. Проведены экспериментальные исследования пломбировочных материалов с применением разработанных программно-аппаратных средств, которые показали работоспособность последних и возможность внедрения в стоматологические клиники для исследований прочностных характеристик композитных пломбировочных материалов и их соединении с твердыми тканями зубов *in vitro*. При этом (как показал эксперимент) твердые ткани зуба являются анизотропным телом, что требует их дальнейшего изучения с применением разработанной ИИС.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых журналах из перечня ВАК РФ

1. Шелковников Е.Ю., Кириллов А.И., Ефремов С.М. и др. Установка с силовым пьезоэлектрическим преобразователем для исследования прочностных характеристик пломбировочных материалов // Ползуновский вестник. – 2013. – №2. – С.201-205.

2. Шелковников Е.Ю., Кириллов А.И., Ефремов С.М. и др. Трехмерное математическое моделирование напряженно-деформированного состояния зуба и пломбы // Ползуновский вестник. – 2014.– №2. – С.54-58.

3. Кириллов А.И. Исследование пьезоактюаторной информационно-измерительной системы для изучения прочностных характеристик пломбировочных материалов // Интеллектуальные системы в производстве. 2021. Т.19. № 2. С. 4-12.

4. Кириллов, А. И. Интеллектуальное электрометрическое устройство для диагностики кариеса зубов / А. И. Кириллов, Ю. К. Шелковников, М. А. Плетнев // Интеллектуальные системы в производстве. – 2023. – Т. 21, № 2. – С. 130-139. – DOI 10.22213/2410-9304-2023-2-130-139. – EDN JGKODW.

Патенты РФ

5. Наймушин Ю.Н., Рединова Т.Л., Тимофеев А.А., Метелева Т.Ю., Ефремов С.М., Морозов А.В., Шелковников Ю.К., Кириллов А.И. Устройство для прочностных испытаний пломбировочных материалов и пломб дефектных зубов // Патент РФ на полезную модель №114843 МПК А61С19/04; опубл. 20.04.2012, бюл. №11.

6. Шелковников Е.Ю., Кириллов А.И., Рединова Т.Л., Тимофеев А.А., Метелева Т.Ю. Устройство для электродиагностики твердых тканей зуба // Патент на изобретение №2654399 МПК А61С19/04, А61В5/053; опубл. 17.05.2018, бюл. №14.

Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ

7. Шелковников Е.Ю., Кириллов А.И., Ермолин К.С. Программа для управления информационно-измерительной системой, включающей в себя силовой пьезоэлектрический преобразователь, акустический и тензометрические датчики // №2016613807; пост. 16.02.2016, опубл. 06.04.2016.

8. Кириллов А.И., Ермолин К.С., Шелковникова Т.Е. Автоматизированная система управления программно-аппаратным измерительным комплексом, включающим в себя силовой пьезоэлектрический преобразователь, акустический и тензометрический датчики // №2016616163; пост. 12.04.2016, опубл. 07.06.2016.

9. Кириллов А.И. Программа для управления и автоматизированного измерения электрометрическим устройством электропроводности твердых тканей зубов // № 2017618087; пост. 26.05.2017, опубл. 21.07.2017.

В других изданиях

10. Кириллов А.И. Шелковников Е.Ю., Рединова Т.Л., Тимофеев А.А., Метелева Т.Ю. Обеспечение заданного закона изменения силовых нагрузок при прочностных испытаниях пломбировочных материалов // Ползуновский Альманах. – Барнаул: АлтГТУ, 2014, №1 – С. 87-91.

11. Шелковников Е.Ю., Кириллов А.И., Кизнерцев С.Р. Расчет пьезоэлектрического формирователя нагрузки с учетом жесткости его конструкции для исследования композитных материалов // Материалы XVI международной НТК «Измерение, контроль, информатизация». – Барнаул: АлтГТУ, 2015, Т.2. – С.142-145.

12. Кириллов А.И., Шелковников Е.Ю., Кизнерцев С.Р. Выделение и фильтрация полезного сигнала в информационно-измерительной системе для изучения прочностных характеристик композитных материалов // Материалы XVII международной НТК «Измерение, контроль, информатизация». – Барнаул: АлтГТУ, 2016. – С.175-178.

13. Шелковников Е.Ю., Кириллов А.И., Беда Д.А. Постобработка результатов моделирования напряженно-деформированного состояния твердых тканей зуба с пломбой // Ползуновский Альманах. – Барнаул: АлтГТУ, 2016, №2 – С. 21-25.

14. Шелковников Е.Ю., Кириллов А.И., Ермолин К.С., Кизнерцев С.Р. Электромеханическая модель пьезоактюаторной информационно-измерительной системы для изучения композитных материалов // Ползуновский Альманах. – Барнаул: АлтГТУ, 2017, №4, Т.3 – С. 24-27.
15. Шелковников Е.Ю., Кириллов А.И., Осипов Н.И., Куликов В.А. Повышение эффективности изучения прочностных характеристик композитных материалов с применением телекоммуникационной сети // Ползуновский Альманах. – Барнаул: АлтГТУ, 2018, №4 – С. 10-12.
16. Кириллов А.И., Шелковников Е.Ю., Кизнерцев С.Р. Использование имитационного моделирования при выборе способа измерения электропроводности твердых тканей зуба // Ползуновский Альманах. – Барнаул: АлтГТУ, 2019, №4. – С. 66-69.
17. Кириллов А.И., Шелковников Е.Ю., Кизнерцев С.Р. Частотный анализ пьезоактюаторной информационно-измерительной системы для изучения композитных материалов // Материалы XXI международной НТК «Измерение, контроль, информатизация». – Барнаул: АлтГТУ, 2020. – С.44-48.
18. Кириллов А.И. Анализ работы силовой установки пьезоактюаторной информационно-измерительной системы с использованием пакета Micro-cap // Сборник трудов НТК «Информационные технологии в науке, промышленности и образовании». – Ижевск: ИжГТУ, 2021. – С.152-158.
19. Kirillov A., Shelkovnikov E. Improvement of metrological characteristics of the information-measuring system for monitoring elastic characteristics of composite filling materials // AIP Conference Proceedings. – 2023. – Vol. 2605. –P. 020010–1–020010–10.
20. Кириллов А.И., Шелковников Е.Ю. Автоматизированная установка для прочностных испытаний пломбирочных материалов с применением тензометрического и акустического контроля // Материалы XXIV международной НТК «Измерение, контроль, информатизация». – Барнаул: АлтГТУ, 2023. – С.79-85.

Подписано в печать 22.12.2023
Бумага офсетная Формат 60x84/16
Объем 1,5 п.л. Тираж 100 экз.
Отпечатано в УдмФИЦ УрО РАН
426067, г. Ижевск, ул. Т. Барамзиной, 34