

ОТЗЫВ

официального оппонента Завестовской Ирины Николаевны на диссертацию Рябкина Дмитрия Игоревича «Исследование изменений физических характеристик органических нанодисперсных сред под воздействием лазерного излучения при сваривании биологических тканей», представленной на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 (01.04.07) – Физика конденсированного состояния

Актуальность.

Лазерная сварка биологических тканей является перспективным направлением, востребованным в медицине в области хирургии, офтальмологии и др. При этом на первый план выходит задача оптимизации режима лазерной сварки, нацеленная на повышение прочности сварного шва при обеспечении режима нагрева, безопасного с точки зрения предотвращения некроза биологической ткани.

Тема диссертационной работы Рябкина Дмитрия Игоревича является крайне **актуальной** и посвящена исследованию воздействия лазерного излучения на различные компоненты наноразмерных сред, применяемых при лазерной сварке, и изучению изменения их характеристик с целью оптимизации режима лазерной сварки.

Автором предложены и исследованы новые компонентные составы водных нанодисперсных сред на основе белков, углеродных нанотрубок и экзогенного хромофора индоцианина зелёного, обеспечивающие эффективность лазерного сваривания биологических тканей и прочность формируемых сварных соединений.

Анализ содержания диссертации.

Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения, текст изложен на 128 страницах, содержит 56 рисунков, 25 таблиц и список источников из 120 наименований.

Во **Введении** указана актуальность работы, сформулирована цель и поставлены задачи, сформулированы положения, выносимые на защиту, представлены научная новизна, научная и практическая значимость, указан личный вклад автора, даны сведения об апробации работы и публикациях по теме диссертации.

Первая глава посвящена литературному обзору лазерного сваривания биологических тканей. Дан сравнительный анализ лазерной сварки биотканей с

существующими методами: шовный, механический, клеевой и электрический методы соединения рассеченных биотканей. Описано применение CO₂ лазера, твердотельного Ho:YAG лазера, диодного лазера и оптоволоконного лазера с легированием эрбием в для сварки биологически тканей, а также приведены физико-технические характеристики установок. Показано, что повышения прочности на разрыв формируемых при лазерном сваривании соединений и снижения области температурного некроза тканей можно добиться применением обратной температурной связи. Описаны компонентные составы жидких нанодисперсных сред, используемых при лазерном сваривании биологических тканей, с указанием достигаемых при их использовании физических характеристик сварных соединений.

Во **Второй главе** описаны методы приготовления и компонентные составы нанодисперсных сред, использующихся при лазерном сваривании биологических тканей. В качестве дисперсной среды использовалась вода, а дисперсными фазами были: бычий сывороточный альбумин (БСА), хромофор индоцианин зеленый (ИЦЗ), углеродные нанотрубки (УНТ) двух типов – одностенные (ОУНТ) и многостенные (МУНТ). Приведены характеристики и структура экспериментальной установки для лазерного сваривания биологических тканей на основе диодного лазера с длиной волны $\lambda = 810$ нм и обратной температурной связи. Приведено описание методов исследования нанодисперсных сред и представлены их математические алгоритмы: методы оптической спектроскопии (ОС), динамического рассеяния света (ДРС) и дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК). Показано, что метод ДСК позволяет измерить энергию активации и теплоемкость нанодисперсных сред. Метод ДРС применен для определения размеров агрегатов компонентов нанодисперсных сред. Представлена модель формирования сварного шва, при которой сварной шов образуется при фазовом переходе жидких нанодисперсных сред (денатурации БСА) и последующем восстановлении химических связей между различными молекулами альбумина и углеродных нанотрубок.

В **Третьей главе** приведены результаты исследований взаимодействия лазерного излучения с нанодисперсными средами при лазерном сваривании биологических тканей. Использовались методы ОС, ДРС ДСК. Методом ОС были получены спектры поглощения используемых при лазерном сваривании нанодисперсных сред. Были измерены показатели поглощения для водных дисперсий на основе БСА, МУНТ, ОУНТ и ИЦЗ. Прочность лазерных швов связана с размерами мономеров и агрегатов альбумина. Исследование нанодисперсных сред на основе альбумина как с хромофором индоцианином зелёным, так и без него, методом ДРС выявило нелинейный характер

зависимостей гидродинамических радиусов агрегатов альбумина от температуры. Максимальные значения гидродинамических радиусов мономеров и минимальные значения гидродинамических радиусов больших агрегатов, соответствующие наибольшей прочности на разрыв лазерных сварных швов, достигались в одном и том же диапазоне температур от 50 до 55 °С, что свидетельствует о том, что основным фактором формирования лазерного сварного шва биологических тканей является денатурация БСА. Было достигнуто снижение температуры и удельной энергии денатурации.

Представлены результаты исследования денатурации альбумина методом ДСК. Были исследованы образцы водной дисперсии БСА и ОУНТ. Был определен тип реакции процесса формирования лазерного сварного шва из нанодисперсной среды на основе альбумина с добавлением и без добавления углеродных нанотрубок. Найдена энергия активации и предэкспоненциальный множитель уравнения Аррениуса для процесса формирования лазерного сварного шва.

Разработана математическая модель формирования лазерного сварного шва и представлены результаты определения параметров режима лазерной сварки. Было определено время формирования сварного шва. Использован трехстадийный режим лазерного нагрева, включающий между стадиями нагрева и охлаждения режим температурной выдержки, при котором температура нанодисперсной среды достигает оптимального значения и поддерживается за счет обратной температурной связи, регулирующей мощность лазерного излучения. Были рассчитаны значения мощности и длительности воздействия лазерного излучением для формирования сварных швов глубиной 0,2-1 мм при максимальной температуре соединения не более 100 С при лазерной сварке с использованием нанодисперсных сред на основе БСА+ИЦЗ и БСА+ИЦЗ+ОУНТ.

В Четвёртой главе представлены результаты исследований структуры лазерных сварных швов методами рентгеновской микротомографии и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), а также влияние температуры лазерного сваривания и компонентного состава используемых нанодисперсных сред на прочность сварного шва. Данные исследования методом рентгеновской микротомографии показали возможность формирования равномерных по глубине и ширине лазерных сварных швов, полученных с использованием водной нанодисперсной среды на основе бычьего сывороточного альбумина, хромофора индоцианина зелёного и углеродных нанотрубок. При исследовании лазерных сварных швов методом СЭМ обнаружено оборачивание

альбумином однослойных углеродных нанотрубок диаметром от 1 до 1,5 нм, что приводит к возникновению комплексов нанотрубки-альбумин диаметром от 15 до 25 нм. Показано, что прочность на разрыв лазерных сварных швов значительно зависит от компонентного состава нанодисперсных сред. Использование многостенных углеродных нанотрубок в составе нанодисперсной среды совместно с альбумином и индоцианином зелёным при лазерном сваривании биологических тканей позволяет увеличить прочность на разрыв лазерных сварных швов в 1,5 раза по сравнению с прочностью на разрыв лазерных сварных швов, полученных при использовании нанодисперсной среды на основе альбумина и индоцианина зелёного. При этом максимальная прочность на разрыв составляет $0,8 \pm 0,3$ МПа.

В Заключение сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Достоверность научных результатов диссертационной работы Рябкина Д.И. обоснована экспериментальными результатами, полученными на современном оборудовании, и теоретическими моделями, согласованными с опубликованными другими исследователями результатами в области лазерной сварки биологических тканей.

Обоснованность научных положений и выводов, сформулированных в диссертационной работе Рябкина Д.И., подкреплена обсуждением полученных результатов на международных и всероссийских конференциях и семинарах. Результаты диссертационной работы Рябкина Д.И. представлены в 35 научных работах, 20 из которых опубликованы в рецензируемых научных изданиях, индексируемых зарубежными системами цитирования Web of Science и/или Scopus. Получены 1 патент РФ на изобретение и 3 авторских свидетельства на программы ЭВМ.

Научная новизна полученных в диссертационной работе Рябкина Д.И. результатов проанализирована в автореферате. Основными результатами, отражающими научную новизну, следует отметить следующие результаты:

- Впервые представлено комплексное исследование физических процессов сваривания биологических тканей под действием лазерного излучения, включающее исследование компонентного состава нанодисперсных сред и фазовых переходов в них (денатурацию альбумина).
- Предложены новые компонентные составы водных нанодисперсных сред на основе белков, углеродных нанотрубок и экзогенного хромофора индоцианина зелёного

для лазерного сваривания биологических тканей, обеспечивающие оптимальные параметры сварного шва.

- Показано, что присутствие в водных растворах альбумина небольших количеств хромофора индоцианина зелёного (0,1 мас.%) позволяет многократно повысить значение эффективного коэффициента поглощения света на длине волны около 810 нм, что позволяет заметно повысить эффективность лазерного сваривания биологических тканей.
- Установлено, что использование углеродных нанотрубок в составе нанодисперсной среды, используемой при лазерном сваривании биологических тканей, позволяет значительно увеличить прочности на разрыв сварных швов.
- Разработана модифицированная математическая модель формирования лазерного сварного шва для применения в установках с использованием обратной температурной связи, позволившая определить оптимальные значения мощности и длительности воздействия лазерного излучением для формирования сварных швов глубиной 0,2-1 мм при максимальной температуре соединения не более 100 °С.

Практическая значимость.

Практическая значимость подтверждена полученным патентом и авторскими свидетельствами на программы ЭВМ, а также тем, что использование предложенного в диссертации нового состава нанодисперсной среды для лазерного сваривания биологических тканей позволит повысить прочность на разрыв формируемых соединений и снизить область температурного некроза биоткани. Проведён биологический эксперимент с клетками, показывающий биосовместимость предлагаемого материала. Таким образом, внесён существенный вклад в развитие технологий лазерного сваривания биологических тканей.

Полученные в диссертации результаты могут стать основой разработки приборов и технологий лазерного сваривания биологических тканей для медицинских применений.

Замечания по диссертации.

По представлению материала:

1. В диссертации постановка задачи и формулировка решаемых в диссертации задач представлена во Введении до Первой главы, в которой представлен

литературный обзор, на основании анализа данных которого логично представить постановку задачи диссертации.

2. Количество основных результатов, представленных в диссертации (10) и автореферате (6) отличается без анализа и указания причины несоответствия.

По существу:

3. В описываемой математической модели процесса формирования лазерного сварного шва не учтена неоднородность пространственного распределения интенсивности лазерного излучения, а также влияние теплообмена за счёт конвекции на формирование как сварного шва, так и области температурного некроза соединяемых тканей.
4. В работе экспериментально показано изменение энергии активации и предэкспоненциального множителя в уравнении Аррениуса для фазового перехода денатурации альбумина при добавлении в нанодисперсную среду углеродных нанотрубок, но не приводится анализ причин таких изменений.

Заключение

Отмеченные замечания не влияют на общую положительную оценку полученных в диссертации Рябкина Д.И. результатов.

Считаю, что диссертация Рябкина Д.И. «Исследование изменений физических характеристик органических нанодисперсных сред под воздействием лазерного излучения при сваривании биологических тканей» является законченной научно-квалификационной работой, выполненной автором самостоятельно, обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения. Основные научные результаты диссертации опубликованы в рецензируемых научных изданиях. Автореферат и опубликованные работы по теме диссертации в полном объеме отражают её содержание.

Тема и содержание диссертационной работы соответствуют паспорту специальности 1.3.8 (01.04.07) – «Физика конденсированного состояния» согласно п. 2 «Теоретическое и экспериментальное исследование физических свойств неупорядоченных неорганических и органических систем, включая классические и квантовые жидкости, стекла различной природы и дисперсные системы», п. 4 «Теоретическое и экспериментальное исследование воздействия различных видов излучений, высокотемпературной плазмы на природу изменений физических свойств

конденсированных веществ», п. 5 «Разработка математических моделей построения фазовых диаграмм состояния и прогнозирование изменения физических свойств конденсированных веществ в зависимости от внешних условий их нахождения» и п. 6 «Разработка экспериментальных методов изучения физических свойств и создание физических основ промышленной технологии получения материалов с определенными свойствами».

Диссертация соответствует требованиям п. 9 Положения, утвержденного Правительством РФ «О присуждении ученых степеней» от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор Рябкин Дмитрий Игоревич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 (01.04.07) – «Физика конденсированного состояния».

Даю согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета 24.1.078.01 (Д 002.060.01), и их дальнейшую обработку.

Высококвалифицированный ведущий научный сотрудник отдела космических излучений,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН),
д. ф.-м. н.,
старший научный сотрудник РАН

Завестовская Ирина Николаевна

Подпись Завестовской И. Н. заверяю

ПОДПИСЬ ЗАВЕРЯЮ

Ученый секретарь **Колобов А.В.**

