

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Килиной Полины Николаевны «Формирование периодической структуры армирующего каркаса костной ткани на основе порошкового титанового сплава селективным лазерным плавлением», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.06 – Порошковая металлургия и композиционные материалы

1 Актуальность темы диссертационного исследования.

К важным научно-техническим направлениям, имеющим базовый и системообразующий характер для современного производства, следует отнести цифровое проектирование и моделирование, разработку и создание материалов нового поколения, аддитивное производство. Эти тенденции в полной мере реализуются при использовании одного из наиболее перспективных технологических методов – селективного лазерного плавления (СЛП), который позволяет послойным синтезом на базе 3D модели формировать новые классы материалов, в том числе материалов с высокой макропористостью и периодической макроструктурой.

Изделия, изготовленные селективным лазерным плавлением, успешно используются в машиностроении и многих других сферах науки и производства. Весьма востребованы СЛП-технологии и в медицинской практике, при этом одним из наиболее динамично развивающихся направлений применения 3D печати в медицине является цифровая имплантология.

В последнее время СЛП-технология находит все более широкое применение для восстановления костных дефектов зубочелюстной системы. Титановые имплантаты с высокопористой структурой имеют ряд преимуществ в области биомеханических свойств по сравнению с аналогами из других материалов. Применение высокопористых ячеистых материалов (ВПЯМ) на основе порошковых титановых сплавов для реконструктивно-восстановительной хирургии позволяет снизить эффект «экранирования напряжений», ускорить прорастание и увеличить степени фиксации за счет проникновения костной ткани в ячейки и ее закрепление на развитой поверхности перемычек.

В то же время имеющиеся сведения о влиянии технологических характеристик лазерного излучения и структурных параметров высокопористых ячеистых структур на характеристики биосовместимости, упругие и прочностные свойства изготовленных на их основе имплантатов являются недостаточными для широкого внедрения СЛП-технологии в медицинскую практику.

Таким образом, диссертационная работа П.Н. Килиной, направленная на научное обоснование макрогеометрии ячеистых имплантатов на основе титанового порошкового сплава и оптимизацию технологических параметров

их изготовления селективным лазерным сплавлением, является весьма актуальной.

2 Содержание диссертации.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, состоящего из 126 источников, и 2-х приложений. Работа изложена на 176 страницах, содержит 69 рисунков и 23 таблицы.

Во введении приведено обоснование актуальности научных исследований, представлена степень разработанности темы, указана научная новизна полученных результатов, их теоретическая и практическая ценность, сформулированы положения, выносимые на защиту, отмечен личный вклад автора при получении результатов, приведена информация об апробации работы на международных и всероссийских конференциях.

В первой главе представлен аналитический обзор отечественной и зарубежной литературы по тематике диссертационной работы. Рассмотрены особенности формирования структуры и свойств ячеистых материалов в зависимости от способа их получения и сферы применения. Проанализированы особенности строения и характеристики костной ткани, а также методы ее замещения. Рассмотрены вопросы формирования решетчатых конструкций медицинского назначения. Обозначены основные требования к материалам, используемым для лазерного плавления. Рассмотрены особенности использования технологии селективного лазерного плавления для создания ВПЯМ и формирования структуры каркаса костной ткани на их основе. Проведен анализ существующих подходов к прогнозированию физико-механических свойств ячеистых конструкций с различными элементами макроструктуры. Сформулированы цель и задачи исследования.

Во второй главе приведено описание основных методик определения физических, химических и технологических характеристик исходного порошкового материала, а также методик создания образцов и исследования их макро- и микроструктуры, субструктуры, микропористости, микротопографии, характера разрушения, элементного состава. Изложены методики определения физико-механических свойств расчетных моделей и полученных образцов. Представлено оборудование для проведения экспериментальных работ, соответствующее целям и задачам исследования. Показан план экспериментальных исследований и статистической обработки результатов. Приведены сведения об основных этапах клинических испытаний разработанных имплантатов.

В третьей главе приведены результаты разработки модели макроструктуры с параметрами и конфигурацией ячейки, обеспечивающими сквозной размер пор для беспрепятственного прорастания костной ткани и ее равномерного формирования в ячейках имплантатов.

Выявлено и экспериментально доказано влияние технологических параметров процесса селективного лазерного плавления на показатели

качества единичного трека из порошкового титанового сплава Ti6Al4V (геометрические размеры, микропористость, глубина зоны проплавления, микротвердость, размерная точность) с геометрическими параметрами, идентичными параметрам элементов каркаса костной ткани челюстно-лицевой области. Выявлены диапазоны режимов для формирования бездефектных тонкостенных и ячеистых материалов, а также ячеистых структур Вигнера-Зейтца с размерами ячейки 1–3 мм и перемычки 0,2–0,3 мм, с высокой степенью точности.

Представлены результаты металлографического, элементного и рентгеноструктурного анализов, показаны особенности микроструктуры и микропористости ВПЯМ, приведены данные о субструктуре. Показаны результаты исследования топологии поверхности перемычек и их изломов, проведенного с помощью сканирующей электронной микроскопии

В четвертой главе приведены результаты численного прогнозирования прочностных и упругих свойств металлических высокопористых материалов на основе разработанных критериев и методики, представлены зависимости предела прочности и модуля упругости при сжатии от макропористости каркаса ВПЯМ и геометрических параметров элементов макроструктуры. Экспериментально определены физико-механические характеристики ВПЯМ, показано их соответствие результатам численного моделирования. Проведен анализ фрактограмм перемычек ячеистого каркаса. Определен диапазон макропористостей ВПЯМ в сочетании с размерами поперечного сечения перемычек в ячейках, обеспечивающие прочность решетчатого каркаса и минимизацию эффекта экранирования напряжений в процессе эксплуатации имплантатов.

В пятой главе проведено исследование влияния макроструктуры и микрогеометрии поверхностного слоя ВПЯМ на механизмы прорастания костной ткани в ячейки имплантатов при их вживлении в костные ткани лабораторных животных. Предложены диапазоны рекомендуемых структурных параметров для имплантатов, представлены результаты их влияния на сроки вживления в костные ткани лабораторных животных.

В приложениях представлены акты медицинских испытаний и использования в учебном процессе.

В заключении приведены основные выводы, показывающие достижение поставленной цели.

3 Научная новизна исследования и полученных результатов.

Соискателем в диссертационной работе получен ряд новых научных результатов:

1. Разработана модель макроструктуры для создания порошковых ячеистых имплантатов с размерами ячейки 1–3 мм и макропорами 250–850 мкм, учитывающая архитектонику костной ткани челюстно-лицевой области и обеспечивающая ее максимальное заполнение.

2. Разработана методика прогнозирования упругих и прочностных свойств ячеистых материалов из порошка Ti6Al4V, полученных методом селективного лазерного плавления, обеспечивающая регулируемость структуры и заданные механические свойства.

3. На основе установленного влияния технологических параметров процесса селективного лазерного плавления порошка Ti6Al4V на геометрические размеры, микропористость, глубину зоны проплавления, микротвердость, размерную точность элементов каркаса ВПЯМ теоретически и экспериментально доказана возможность изготовления ячеистых конструкций с диаметрами ячеек 2–3 мм и макропористостью 90–97%, соответствующих физико-механическим свойствам костной ткани челюстно-лицевой области.

4 Практическая и теоретическая значимость результатов работы.

1. Разработан и апробирован технологический процесс изготовления сложнопрофильных имплантатов с ячеистой макроструктурой из титанового сплава Ti6Al4V с использованием установленного на основе проведенного комплекса экспериментальных исследований диапазона режимов селективного лазерного плавления.

2. Разработана конструкция имплантата для замещения неполных дефектов нижней челюсти и альвеолярного отростка и имплантата для замещения дефектов челюстей после удаления околокорневых кист (патенты на изобретение №2581263 и 2612123).

3. Экспериментально подтверждена эффективность применения ячеистых имплантатов на основе титанового сплава, позволяющих обеспечить ускоренное прорастание костной ткани в ячейки имплантата и увеличить степень его фиксации; увеличение макропористости с 50–74% до 90–97% позволяет сократить сроки регенерации костной ткани в 2–2,5 раза (акт внедрения).

Результаты внедрены в учебный процесс на кафедре «Инновационные технологии машиностроения» МТФ ПНИПУ по направлению подготовки магистров 15.04.01 Машиностроение дисциплины «Современные технологии прототипирования», «Технология селективного лазерного плавления», «Новые конструкционные материалы».

5 Обоснование и достоверность основных положений, выносимых на защиту, результатов и выводов подтверждается применением современных методик исследования материалов, использованием современного оборудования, применением статистической обработки полученных результатов, и воспроизводимостью экспериментальных данных, соответствием результатов численных и натуральных экспериментов, согласованностью полученных в работе результатов с ранее полученными данными других исследователей.

По материалам диссертации опубликовано 24 печатные работы, из них 7 статей в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК РФ, 4 статьи в журналах, индексируемых в базе Scopus, получено 2 патента на изобретение.

6 Соответствие содержания автореферата основным положениям диссертации.

Содержание автореферата в полной мере соответствует основному содержанию диссертации. Он содержит все основные научные положения, изложенные в диссертации, и раскрывает с достаточной полнотой ее сущность.

7 Замечания.

1. В диссертационной работе представлен обзор характеристик и свойств большого количества различных типов ячеек, при этом весьма кратко сформулирован ответ на главный вопрос: в чем преимущества регулярной периодической структуры для имплантатов?
2. Какой критерий может служить основанием для оценки полученного значения микротвердости перемычек ВПЯМ после СЛП?
3. В результате проведения гранулометрического анализа автором было установлено что размеры частиц порошка находятся в диапазоне от 13,457 до 57,885 мкм. При этом максимально возможная толщина сплавляемого слоя составляет 50 мкм (стр. 47). Автор не объясняет каким образом наличие частиц размерами большими чем толщина слоя будет влиять на качество формирования изделия.
4. На Стр. 67 автор использует термин «кипящий слой», не приводя объяснения данному явлению.
5. Из рисунка 3.11 видно, что дорожка, формируемая в результате СЛП является неоднородной по ширине. Каким образом происходило ее измерение при проведении исследования по влиянию режимов СЛП на ширину дорожки.
6. В плане эксперимента (стр. 74) в качестве варьируемых параметров автор использует мощность P , время засветки t и расстояние между точками засветки L . При этом важным параметром, влияющим на глубину проплавления z , микротвердость HV и микропористость следует считать толщину сплавляемого слоя.
7. Задача №3 сформулирована так: Разработать методику прогнозирования прочностных и упругих свойств В работе представлены исследования этих характеристик. Однако нет обобщённой методики в виде алгоритма (последовательности пргнозирования), имеющего состав исходных данных, ссылки на модели, формулы, графики и т.п. полученные автором. В заключении по работе нет констатации, что разработана методика, применимая для различных имплантантов.

8. В первой главе проведён анализ проблем, возникающих при использовании титана, однако автор не рассматривает условия возможного наводороживания титана и появления разрушения имплантантов при длительной работе от возникновения "водородной хрупкости".

9. При анализе условий работы имплантантов очень вероятно проявление малоциклового усталости, приводящей к разрушению деталей. Почему автор этот вопрос не рассматривает?

10. На странице 23 автором вводится понятие стратегия спекания, в то время как описывается процесс сплавления, скорее всего, следовало бы одноименно назвать данную стратегию, как один из факторов (параметров), влияющих на свойства синтезируемого материала.

11. В работе не сказано про подогрев платформы и его влиянии на микроструктуру получаемых изделий методом СЛП титановых сплавов.

Сделанные замечания не снижают важности полученных результатов и не влияют на общую положительную оценку работы.

8 Соответствие диссертационной работы паспорту специальности.

Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 05.16.06– Порошковая металлургия и композиционные материалы, а именно следующим пунктам:

- пункт 5 – «Изучение структуры и свойств порошковых, композиционных полуфабрикатов и изделий, покрытий и модифицированных слоев на полуфабрикатах и изделиях, полученных методом порошковой металлургии или другими способами»;
- пункт 6 – «Разработка новых и совершенствование существующих технологических процессов производства, контроля и сертификации полуфабрикатов и изделий различного назначения из порошковых и композиционных материалов, а также материалов и изделий с покрытиями и модифицированными слоями».

9 Заключение.

Диссертационная работа Килиной Полины Николаевны «Формирование периодической структуры армирующего каркаса костной ткани на основе порошкового титанового сплава селективным лазерным плавлением» является завершённой научно-квалификационной работой, которая на основании выполненных автором исследований и полученных результатов вносит значительный вклад в решение задач, имеющих важное научное и практическое значение и предполагающих комплексное решение вопросов разработки и изготовления конструкций ячеистых имплантатов для замещения костных дефектов челюстно-лицевой области методом СЛП, включая научное обоснование рекомендаций по выбору технологических и структурных параметров высокопористых ячеистых материалов (ВПЯМ),

обеспечивающих их соответствие структуре и свойствам костной ткани и требованиям, предъявляемым в имплантологии.

Диссертационная работа соответствует требованиям п.9–11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней» постановления Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842 (ред. от 01.10.2018, с изм. от 26.05.2020), а ее автор, Килина Полина Николаевна, достойна присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.06 – Порошковая металлургия и композиционные материалы.

Профессор кафедры «Технологий
производства двигателей»
Самарского национального
исследовательского университета
им. акад. С.П. Королева
д.т.н., проф.

 Проничев Н.Д.

25 ноября 2020 г.



Проничев Николай Дмитриевич, доктор технических наук, специальность ВАК 05.07.05 – Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов, профессор, профессор кафедры «Технологий производства двигателей» Самарского национального исследовательского университета им. акад. С.П. Королева.

Адрес: 443086, г. Самара, Московское шоссе, д. 34

Телефон: +7(846)267-45-79, +7(846)334-74-91

E-mail: ndp86@mail.ru