



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
АВТНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИСиС»
(НИТУ «МИСиС»)

Ленинский проспект, 4, Москва, 119049
Тел. (495)955-00-32; Факс: (499)236-21-05

http://www.misis.ru

E-mail: kancela@misis.ru

ОКПО 02066500 ОГРН 1027739439749

ИНН/КПП 7706019535/ 770601001

На № 24.11.2020 № 128/20-17

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по науке и инновациям,
доктор технических наук, профессор

М. Р. Филонов

020 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

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

Актуальность темы выполненного исследования

Внедрение в практику современной имплантологии материалов с регулируемой высокопористой пространственной структурой и прогнозируемыми прочностными и упругими свойствами открывает принципиально новые возможности для решения одной из наиболее сложных задач реконструктивной медицины – замещения костных дефектов челюстно-лицевой системы. Для комплексного решения вопросов разработки и изготовления конструкций имплантатов в работе используется технология селективного лазерного плавления (СЛП), базирующегося на 3D-моделировании.

Использование СЛП для изготовления сложных по форме и макроструктуре имплантатов при наличии ограничений, накладываемых на их прочностные и упругие свойства, предполагает установление взаимосвязи между параметрами лазерного излучения и совокупностью достаточно большого числа характеристик готового изделия, определяющих его качество. Такого рода проблемы должны решаться в сочетании с исследованиями и оценкой биосовместимости материала-основы, используемого для формирования ВПЯМ.

В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований в диссертационной работе Килиной П.Н. решены такие актуальные задачи, как разработка

методики проектирования ВПЯМ на основе 3D-моделирования; выбор оптимальных параметров лазерного излучения в процессе СЛП; установление совокупности критериев, определяющих качество готовых изделий; разработка методов прогнозирования и расчета физико-механических свойств материалов имплантатов, а также проведение клинических испытаний на живых организмах. Результатом проведенных исследований явилась разработка геометрии регулируемой макроструктуры высокопористых ячеистых материалов с прогнозируемыми прочностными и упругими свойствами для создания на их основе имплантатов из титанового порошка методом селективного лазерного плавления (СЛП).

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Автором выполнен литературный обзор и проведен анализ структурообразующих и эксплуатационных характеристик ячеистых материалов, а также технологических методов их создания, включая метод СЛП. Раскрыты вопросы использования ячеистых материалов для изготовления имплантатов, рассмотрены физико-механические свойства ячеистых структур, получаемых методом СЛП.

В диссертации представлены сведения о методах и методологии исследования свойств и структуры используемых для исследований исходных порошковых материалов, а также полученных ВПЯМ. Приведено описание оборудования для проведения экспериментов. Показана методика клинических испытаний ячеистых имплантатов после внедрения лабораторным животным.

В работе выполнено моделирование макроструктуры ВПЯМ с ячейками Вигнера-Зейтца для создания замещающих конструкций участков костей челюстно-лицевой области, учитывающее строение костной ткани. Установлены регрессионные зависимости пористости, глубины проплавления, микротвердости, ширины имитирующих геометрию перемычек ВПЯМ дорожек и ее отклонения от 3D модели от основных технологических параметров СЛП. В результате комплексных исследований определены технологические режимы, обеспечивающие геометрические, структурные и физико-механические показатели качества ячеистых структур и полученных на их основе ВПЯМ (выводы 1 - 3).

Автором представлены результаты численных расчетов и экспериментального исследования физико-механических свойств ВПЯМ, разработана методика и критерий для прогнозирования прочностных и упругих свойств ячеистых материалов, полученных методом селективного лазерного плавления порошка Ti6Al4V. Установлены макроструктурные параметры конструкций с регулярной периодической структурой на

основе ячеек Вигнера-Зейтца, обеспечивающие соответствие их физико-механических характеристик свойствам костной ткани (выводы 4 - 6).

Приведены результаты испытаний ячеистых имплантатов, сформированных методом СЛП, на лабораторных животных. Установлены параметры ячеистой конструкции, позволяющие сократить срок регенерации костей (выводы 7 и 8).

На основании выполненных исследований сформулированы основные выводы, отражающие достижение поставленной цели. Обоснованность и достоверность полученных в диссертационной работе результатов при решении поставленных задач обусловлены использованием современных апробированных и стандартизированных методов и методик анализа материалов, существенным объемом экспериментальных данных, корректностью обработки, согласованностью и воспроизводимостью результатов экспериментальных исследований, соответствием между расчетными и экспериментальными данными, которые не противоречат аналогичным результатам других авторов и известным положениям технических и фундаментальных наук.

Научная новизна

Научная новизна состоит в создании методики 3D моделирования регулярных ячеистых структур из порошковых титановых сплавов, позволяющая методом послойного лазерного синтеза создавать материалы с диапазоном макропористости 50-97% и осуществлять управление параметрами макрогеометрии и физико-механическими свойствами ВПЯМ.

Определено влияние основных параметров селективного лазерного плавления порошкового титанового сплава Ti6Al4V, а именно мощности лазерного излучения, времени засветки и расстояния между точками на совокупность параметров, определяющих качество сплавляемых треков: геометрические размеры, макропористость, глубину зоны проплавления, микротвердость, размерную точность элементов каркаса ВПЯМ.

Теоретически и экспериментально доказана возможность послойного синтеза периодической макроструктуры ВПЯМ на основе порошкового материала Ti6Al4V с ячейками 1–3 мм, размерами сквозных макропор 250–850 мкм, микропорами в перемычках менее 15 мкм.

Получены данные о напряженно-деформированном состоянии в выращенных из порошкового титанового сплава изделиях из высокопористых материалов, разработана методика для прогнозирования упругих и прочностных характеристик и регулирования

параметров макрогеометрии ВПЯМ с учетом физико-механических свойств порошкового сплава Ti6Al4V.

Значимость результатов для науки

Значимость результатов, полученных автором диссертации, заключается в научном обосновании закономерностей формирования структуры и свойств ВПЯМ на основе титанового сплава в процессе СЛП, позволяющих обеспечивать заданные геометрические, физико-механические и структурные параметры элементов ячеистых металлических материалов, требуемые прочностные и упругие свойства изготавливаемых на их основе имплантатов. Важными с научной точки зрения являются также результаты, позволяющие установить и систематизировать критерии качества сплавленных треков и прогнозировать на их основе влияние режимов лазерного излучения на размеры сплавленных элементов ячеистых структур, глубину зоны проплавления, микротвердость, микропористость, отклонение геометрических размеров от 3D-модели. По итогам клинических испытаний автором обосновано влияние макроструктуры ВПЯМ с прочностными и упругими характеристиками, соответствующими свойствам костных структур, на время регенерации костной ткани в процессе её прорастания в ячейки имплантатов. В приложениях диссертации приведены акты апробации результатов диссертационной работы в медицинских условиях.

Практическая значимость

Разработана и апробирована методика изготовления ячеистых имплантатов на основе порошка Ti6Al4V с учетом рекомендованного диапазона режимов селективного лазерного плавления. Разработаны конструкции сложнопрофильных имплантатов для замещения дефектов челюсти (патенты на изобретение №2581263 и №2612123). Экспериментально подтверждена возможность применения имплантатов на основе титана, имеющих ячеистую структуру, позволяющих сократить время регенерации костной ткани, увеличить степень фиксации, обеспечить прорастание костной ткани в ячейки имплантата. Установлена степень влияния макропористости на процессы регенерации костных структур после введения имплантатов; увеличение макропористости с 50–74% до 90–97% позволяет ускорить срок приживления имплантатов в 2–2,5 раза, что подтверждено актом внедрения.

Результаты исследования могут быть использованы в порошковой металлургии при назначении структурных и технологических параметров формирования ячеистых конструкций в процессе селективного лазерного плавления порошков, а также в медицине, в частности в реконструктивно-восстановительной хирургии, при создании и

вживлении челюстно-лицевого армирующего каркаса костной ткани с регулируемыми физико-механическими свойствами.

Оценка содержания диссертации и автореферата

Объем и содержание диссертационной работы по степени научной новизны и практической значимости удовлетворяет требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Диссертация и автореферат диссертации написаны понятным научным языком, изложены грамотно, в логической последовательности. Автореферат диссертации и публикации в полной мере отражают содержание диссертации. Основные результаты по теме диссертационной работы изложены в 24 публикациях, из них 7 статей в журналах, рекомендуемых ВАК, и 4 статьи в журналах, индексируемых в базе Scopus.

Соответствие диссертационной работы паспорту специальности

По своей цели, задачам, содержанию, методам исследования и научной новизне диссертационная работа соответствует формуле паспорта специальности 05.16.06 - Порошковая металлургия и композиционные материалы, пунктам 5, 6 «Изучение структуры и свойств порошковых, композиционных полуфабрикатов и изделий, покрытий и модифицированных слоев на полуфабрикатах и изделиях, полученных методом порошковой металлургии или другими способами»; «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» соответственно.

Замечания

1. Исследование микропористости проводилось металлографическим методом, для уточнения следовало бы провести сравнение с методом гидростатического взвешивания.
2. В работе не показан расчет прочностных характеристик конструкции с элементами крепления.
3. Не указано наличие газовых примесей в составе защитной атмосферы аргона.
4. Зачем вводился параметр «объемная плотность энергии», какую новую информацию он несет? На рис. 3.13. представлены точечные графики зависимости, которые не обработаны, нет разделения по параметрам P , t , L , не показан вклад каждого из параметров.
5. Чем обоснован выбор диапазона значений диаметров перемычек ВПЯМ? Почему не были получены конструкции с пористостью 98% с диаметром перемычек 0,15 мм, которые значатся в таблице 3.2.

6. В разделе 4.2 (с. 130) отсутствует информация о количестве испытанных образцов для каждой точки диаграмм, представляющих на рис.4.11, 4.12, зависимости модуля упругости и предела прочности от параметров ячеек.

7. Не показано, во сколько раз глубина проплавления должна превышать толщину единичного слоя при формировании изделий для взаимного сцепления слоев. Высказано лишь общее предположение о том, что толщина единичного слоя, заданная при плавлении, составляла 30 мкм, а для стабильного послойного формирования изделий глубина проплавления должна превышать данное значение.

8. Чем обоснован выбор критерия качества для пористости материала менее 0,8%?

Однако указанные замечания не влияют на положительную оценку выполненной работы и не ставят под сомнение основные выводы диссертации.

Заключение

Диссертационная работа Килиной П.Н. «Формирование периодической структуры армирующего каркаса костной ткани на основе порошкового титанового сплава селективным лазерным плавлением» является законченной научно-исследовательской работой, выполненной на актуальную тему, содержит новые научно-обоснованные технологические рекомендации и методику формирования ячеистых имплантатов с регулируемой макроструктурой и заданными прочностными и упругими свойствами, обеспечивающими эффективность процесса остеогенеза, сопровождающегося достаточно быстрым вживлением ячеистых конструкций в костную ткань. Результаты могут служить основой для исследований и разработок в области порошковой металлургии при создании ячеистых материалов и конструкций с развитой пространственной геометрией и наличием большого количества каналов методом селективного лазерного плавления и практического использования в медицинской промышленности при изготовлении и вживлении имплантатов для замещения дефектов кости.

Представленная работа по форме и содержанию отвечает требованиям пунктов 9–14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842, предъявляемых к кандидатским диссертациям, и п.8-12 Порядка присуждения ученых степеней в ПНИПУ, утвержденного приказом ректора ПНИПУ №1-О от 09.01.2018 г., а ее автор, Килина Полина Николаевна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.06 – порошковая металлургия и композиционные материалы.

Отзыв на диссертационную работу Килиной П.Н. «Формирование периодической структуры армирующего каркаса костной ткани на основе порошкового титанового сплава селективным лазерным плавлением» составлен на основании анализа и обсуждения диссертации, автореферата и публикаций соискателя на объединённом заседании кафедры порошковой металлургии и функциональных покрытий (ПМиФП) и Научно-учебного центра СВС (НУЦ СВС) Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (протокол № 3 от «24» ноября 2020 г.).

Заведующий кафедрой ПМиФП,
директор НУЦ СВС,
доктор технических наук, профессор

Е.А. Левашов

Ученый секретарь кафедры ПМиФП,
доцент кафедры ПМиФП,
кандидат технических наук

В.Ю. Лопатин

Ученый секретарь НУЦ СВС,
в.н.с., доцент кафедры ПМиФП,
кандидат технических наук

В.В. Курбаткина

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,
119049, г. Москва, Ленинский проспект, 4
Тел.: 7 (495) 638-45-00, Факс: 7 (499) 236-52-98, E-mail: vvkurb@mail.ru

узнцова А.Е.

2020 г.