

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке и инновациям
Пермского национального
исследовательского

политехнического университета,
доктор технических наук, профессор
Коротаев В.Н.



« 05.16.06 » 2020 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования

«Пермский национальный исследовательский политехнический университет»
Министерства науки и высшего образования Российской Федерации

Диссертация «Формирование периодической структуры армирующего каркаса костной ткани на основе порошкового титанового сплава селективным лазерным плавлением» выполнена на кафедре «Инновационные технологии машиностроения» Пермского национального исследовательского политехнического университета.

В период подготовки диссертации соискатель Килина Полина Николаевна работала в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на должностях ассистента и старшего преподавателя кафедры «Инновационные технологии машиностроения».

В 2010 году окончила Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Пермский государственный технический университет» по направлению «Технология, оборудование и автоматизация машиностроительных производств».

В 2012 году окончила Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» по направлению «Материаловедение и технология новых материалов».

В 2016 году окончила аспирантуру очной формы обучения в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» по специальности 05.16.06 Порошковая металлургия и композиционные материалы (период обучения 01.11.2012 – 31.12.2016).

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор Сиротенко Людмила Дмитриевна, работает профессором кафедры «Инновационные технологии машиностроения» Федерального государственного бюджетного

образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

1. Личное участие автора в получении результатов, изложенных в диссертации, заключается в следующем:

- разработана методика проектирования геометрии и макроструктуры для создания порошковых ячеистых имплантатов, имитирующих строение каркаса костной ткани и обеспечивающей аналогичные физико-механические характеристики;
- установлены закономерности макро- и микроструктурообразования в процессе селективного лазерного плавления ВПЯМ на основе титанового сплава Ti6Al4V, позволяющие целенаправленно регулировать в зависимости от режимов лазерного излучения геометрические, физико-механические и структурные параметры перемычек ВПЯМ, обеспечивающие требуемые прочностные и упругие свойства имплантатов, созданных на его основе;
- предложена методика прогнозирования прочностных и упругих свойств материала имплантатов с ячеистой структурой, основанная на численном моделировании макроструктуры решетчатого каркаса с использованием метода конечных элементов и результатов анализа напряженного состояния ячеистой структуры при сжатии;
- установлен интервал значений макроструктурных характеристик ВПЯМ, обеспечивающих прочность решетчатого каркаса и минимизацию эффекта «экранирования напряжений» в процессе эксплуатации имплантатов.
- выполнено проектирование ячеистых имплантатов сложнопрофильной формы из титанового сплава Ti6Al4V с геометрическими параметрами макроструктуры, идентичными характеристикам костной ткани, для замещения костных дефектов с последующим изготовлением методом СЛП.

2. Научная новизна диссертационного исследования заключается в проведении комплекса теоретических и экспериментальных исследований метода селективного лазерного плавления порошка Ti6Al4V, в результате которого разработаны технологические решения, обеспечивающие получение ВПЯМ, соответствующих структуре и физико-механическим свойствам костной ткани, что представлено совокупностью следующих положений:

- разработана модель макроструктуры для создания порошковых ячеистых имплантатов с размерами ячейки 1–3 мм и макропорами 250–850 мкм, учитывающая архитектуру костной ткани челюстно-лицевой области и обеспечивающая ее максимальное заполнение;
- разработана методика прогнозирования упругих и прочностных свойств ячеистых материалов из порошка Ti6Al4V, полученных методом селективного лазерного плавления, обеспечивающая регулируемость структуры и заданные механические свойства;
- на основе установленного влияния технологических параметров процесса селективного лазерного плавления порошка Ti6Al4V на геометрические

размеры, микропористость, глубину зоны проплавления, микротвердость, шероховатость, 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.

3. Степень достоверности результатов проведенных исследований подтверждается корректностью принимаемых допущений, обоснованностью принятых методов исследований и сходимостью расчетов с экспериментальными данными, полученными на действующем оборудовании, корректным использованием математического аппарата при моделировании, а также актом испытаний Пермского государственного медицинского университета им. Е.А. Вагнера.

4. Практическая значимость исследования состоит в теоретическом и экспериментальном решении вопросов разработки и изготовления конструкций ячеистых имплантатов методом селективного лазерного плавления порошка Ti6Al4V для замещения костных дефектов челюстно-лицевой области:

- 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;
- 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);
- 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» механико-технологического факультета ПНИПУ по направлению подготовки магистров 15.04.01 Машиностроение, дисциплины «Современные технологии прототипирования», «Технология селективного лазерного плавления», «Новые конструкционные материалы».

5. Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем:

По теме диссертационной работы Килиной П.Н. опубликовано 24 научные работы, в том числе 7 в ведущих рецензируемых изданиях, 4 – в изданиях, индексированных в международных базах цитирования Web of Science и/или Scopus. Основные положения и результаты работы отражены в следующих научных публикациях в журналах, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий, и/или в базы цитирования Web of Science, Scopus:

1. Исследование металлического порошка на основе титана для селективного лазерного плавления /Килина П.Н., Морозов Е.А., Порозова С.Е., Солнышков И.В.// Современные проблемы науки и образования. 2015. № 2. ч. 2. С 143. **(из перечня ВАК)**

Приведены результаты исследования металлического порошка на основе титана для последующего селективного лазерного плавления.

2. Килина П.Н., Дроздов А.А., Сиротенко Л.Д. Формирование образцов с ячеистой структурой методом селективного лазерного спекания металлических порошков// Металлообработка. 2015. № 3(87). С 29-31. **(из перечня ВАК)**

3. Килина П.Н., Морозов Е.А., Ханов А.М. Создание имплантатов с ячеистой структурой методом селективного лазерного спекания //Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2015. Т. 17. № 2(4). С 779-781. **(из перечня ВАК)**

4. Килина, П.Н. Использование технологии селективного лазерного спекания для получения имплантатов с ячеистой структурой/ П.Н. Килина, А.М. Ханов, Е.А. Морозов, Л.Д. Сиротенко //Аддитивные технологии: настоящее и будущее: материалы международной научной конференции. ФГУП ВИАМ. Москва, – 2015. – С 9.

5. Килина П.Н. Анализ влияния мощности лазерного излучения на геометрические параметры ячеистых материалов// Новые технологии, материалы и оборудование российской авиакосмической отрасли: тезисы докладов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием (г. Казань, 8-10 августа 2018 г.) Казань: Изд-во КНИТУ-КАИ, 2018. Т 1. С. 472-474.

6. Килина П.Н., Сиротенко Л.Д. Критерии назначения режимов при получении тонкостенных изделий с ячеистой структурой методом селективного лазерного сплавления// Электрофизические методы обработки в современной промышленности: тезисы докладов III-й Международной научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов (г. Пермь, 11-12 декабря 2019 г.). Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2020. С. 102-104.

7. Использование технологии селективного лазерного спекания для получения имплантатов с ячеистой структурой/Килина П.Н., Ханов А.М., Морозов Е.А., Сиротенко Л.Д. // Аддитивные технологии: настоящее и будущее: материалы международной научной конференции. ФГУП ВИАМ. Москва, 2015. С 9.

В данных работах установлены закономерности макро- и микроструктурообразования в процессе селективного лазерного плавления ВПЯМ на основе титанового сплава Ti6Al4V.

8. Исследование режимов селективного лазерного плавления металлических порошков/ Килина П.Н., Морозов Е.А., Сиротенко Л.Д., Ханов А.М.// Современные проблемы науки и образования. 2014. № 6. С.133. **(из перечня ВАК)**

9. Килина П.Н. Исследование влияния различных интенсивностей излучения на процесс селективного лазерного плавления вольфрамового

порошка //Сборник научных трудов SWorld. 2014. Вып. 3(36), т. 4. Технические науки. С. 40- 42.

10. Килина П.Н. Исследование процесса селективного лазерного спекания титанового порошка // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 2(58) С.162. **(из перечня ВАК)**

11. Гилев, В.Г. Лазерная закалка поверхностей пар трения, изготовленных из псевдосплава сталь-медь/ В.Г. Гилев, Е.А. Морозов, П.Н. Килина, Л.Д. Сиротенко//СТИН. – 2015. – № 7. С. 25-28. Переводная версия: Russian Engineering Research. – 2016. – Vol. 36. – Iss. 2. – P. 152-155. **(из базы Scopus)**
В данных работах проведено исследование режимов лазерной обработки и оценено их влияние на геометрические и структурные свойства.

12. Анализ механических свойств ячеистых материалов, полученных методом селективного лазерного сплавления / Килина П.Н., Сиротенко Л.Д., Трапезников Н.В., Морозов Е.А., Абляз Т.Р., Муратов К.Р. // Металлообработка. 2019. № 2(110). С 29-34. **(из перечня ВАК)**

13. Исследование процесса послойного лазерного сплавления порошка титана Ti6Al4V/ Килина П.Н., Морозов Е.А., Матыгуллина Е. В., Абляз Т.Р. // Металлообработка. 2019. № 2(110). С 25-28. **(из перечня ВАК)**

14. Килина П.Н., Сиротенко Л.Д. Исследование физико-механических свойств ячеистой структуры, полученной методом селективного лазерного сплавления// Электрофизические методы обработки в современной промышленности: тезисы докладов II-й Международной научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов (г. Пермь, 19-20 декабря 2018 г.). Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2019. С. 170-172.

15. Биомеханический анализ капы, изготовленной из полиамида, армированного наноразмерным диоксидом титана/ Гридина В.О., Рогожников Г.И., Каракулова Ю.В., Шулятникова О.А., Никитин В.Н., Килина П.Н.// Российский журнал биомеханики. 2019. Т23. № 1. С.79-87. **(из базы Scopus)**
В данных работах проведено исследование физико-механических свойств плотных и ячеистых материалов для устранения дефектов челюстно-лицевой области.

16. Using rapid prototyping technologies for creating implants with cellular structure/ Kilina P.N., Morozov E.A., Khanov A.M., Vasilyuk V.P., Sirotenko L.D.// Biosciences Biotechnology Research Asia (BBRA). 2015. Vol. 12. Iss. 2. P. 1691-1698. **(из базы Scopus)**

17. Development of Cellular Construction for the Jaw Bone Defects Replacement by Selective Laser Melting / P. Kilina, L. Sirotenko, E. Morozov, T. Ablyaz, K. Muratov// Biomaterials in Orthopaedics and Bone Regeneration. Design and Synthesis.2019. – P. 41-53.

18. Using the technology of layer-by-layer synthesis of photopolymer material during the manufacturing of medical prototype implants/ Shumkov A.A., Hanov A.M., Ablyaz T.R., Morozov E.A., Kilina P.N., Pustovalov D.O. // Biosciences Biotechnology Research Asia. 2015. Т. 12. № 2. С. 1777-1785. **(из базы Scopus)**

19. Килина П.Н., Сиротенко Л.Д. Получение имплантатов с регулярной ячеистой структурой для замещения костных дефектов методом селективного

лазерного сплавления// Актуальные проблемы порошкового материаловедения: материалы международной научно-технической конференции, посвященной 85-летию со дня рождения академика В.Н. Анциферова (г. Пермь, 26–28 ноября 2018 г.). Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2018. С. 266-270.

20. Килина П.Н., Морозов Е.А., Сиротенко Л.Д. Получение ячеистой структуры методом селективного лазерного сплавления для замещения дефектов кости// Электрофизические методы обработки в современной промышленности: тезисы докладов Международной научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов (г. Пермь, 12-13 декабря 2017 г.). Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2018. С. 88-90.

21. Килина П.Н., Сиротенко Л.Д., Василюк В.П. Влияние макроструктуры высокопористых ячеистых имплантатов на кинетику формирования костной ткани// Инновационные технологии в материаловедении и машиностроении – ИТММ-2019: тезисы докладов 4-й Международной научно-практической конференции (г. Пермь, 23-27 сентября 2019 г.). Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2019. С. 126-129.

В данных работах разработаны конструкции ячеистых имплантатов для замещения дефектов челюстно-лицевой области, проведен анализ механизмов прорастания костной ткани в ячейки имплантата после вживления.

22. Патент РФ № 2581263 Имплантат для замещения неполных дефектов нижней челюсти и альвеолярного отростка / Василюк В. П., Штраубе Г. И., Четвертных В. А., Якушев Р. М., Харитонов А. В., Абляз Т. Р., Пустовалов Д. О., Килина П. Н.: ГБОУ ВПО ПГМУ. – Оpubл. 20.04.2016 Бюл. № 11.

23. Патент РФ № 2612123 Имплантат для замещения дефектов челюстей после удаления околокорневых кист / Василюк В. П., Штраубе Г. И., Четвертных В. А., Килина П. Н., Кочержук С.А.: ГБОУ ВПО ПГМУ. – Оpubл. 02.03.2017 Бюл. № 7.

6. Соответствие содержания диссертации специальности, по которой она рекомендуется к защите:

В представленной Килиной Полиной Николаевной диссертационной работе в результате проведенных исследований дано решение актуальной научной проблемы обоснования и оптимизации геометрии структуры и технологических параметров изготовления ячеистых имплантатов на основе титанового сплава Ti6Al4V с использованием технологии селективного лазерного плавления для замещения дефектов костных структур, путем экспериментальных исследований и разработки методики теоретического моделирования.

Указанная область исследования соответствует формуле специальности 05.16.06 – Порошковая металлургия и композиционные материалы: слоев на полуфабрикатах и изделиях, полученных методом порошковой металлургии или другими способами» пункту 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», пункту 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».

7. Диссертационная работа соответствует п.14 Положения о присуждении ученых степеней: соискатель в тексте диссертации корректно ссылается на авторов и/или источники заимствования материалов или отдельных результатов; используя результаты научных работ, выполненных лично и/или в соавторстве, соискатель отмечает это обстоятельство в диссертации.

Диссертация **«Формирование периодической структуры армирующего каркаса костной ткани на основе титанового порошкового сплава селективным лазерным плавлением»** Килиной Полины Николаевны рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.06 – Порошковая металлургия и композиционные материалы.

Заключение принято на расширенном заседании кафедры «Инновационные технологии машиностроения»

Присутствовало на заседании 30 чел. Результаты голосования: «за» - 30 чел., «против» - 0 чел., «воздержалось» - 0 протокол № 2 от «5» октября 2020 г.

Заведующий кафедрой
«Инновационные технологии
машиностроения»
д.т.н., профессор

/Карманов Вадим Владимирович/

Секретарь кафедры
«Инновационные технологии
машиностроения»

/Москокова Наталья Николаевна/