

## **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

### **Актуальность темы.**

Одним из наиболее интересных и перспективных направлений использования технологии селективного лазерного плавления (СЛП) является целенаправленное формирование высокопористых материалов с заданной макроструктурой и регулируемыми прочностными и упругими свойствами. Ячеистые структуры, благодаря развитой пространственной геометрии и наличию большого количества каналов и пор, широко используются в различных отраслях промышленности, при этом особое значение данный класс материалов имеет для медицины, в частности, для имплантологии. Каркасная макроструктура высокопористых ячеистых материалов (ВПЯМ), задаваемая с помощью 3D моделирования и сформированная селективным лазерным плавлением на основе биосовместимых порошковых материалов, позволяет формировать высокопористые каркасные титановые имплантаты для замещения костных дефектов, состоящие из ячеек правильной геометрической формы.

Решение проблемы обеспечения требуемого качества сложных по форме и макроструктуре изделий предполагает выявление комплекса критериев, определяющих значения входных и выходных параметров технологической системы СЛП и установление связи между ними. Обеспечение заданных прочностных и упругих параметров ячеистых структур, предназначенных для создания имплантатов, предполагает необходимость разработки методов прогнозирования физико-механических свойств для данного класса материалов.

В связи с этим, диссертационная работа П.Н. Килиной, посвященная выявлению технологических режимов формирования ячеистых конструкций с прогнозируемыми механическими свойствами, а также установлению макроструктурных характеристик имплантатов, позволяющих замещать костные дефекты челюстно-лицевой области и обеспечивать равномерное их заполнение, является актуальной.

### **Анализ содержания диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы из 126 наименований и 2 приложений. Общий объем работы 176 страниц, включая 69 рисунков и 23 таблицы. Диссертационная работа оформлена в соответствии с требованиями ВАК РФ, основные результаты опубликованы в печати. Текст

автореферата и публикаций достаточно полно отражает содержание диссертации.

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, показана степень ее разработанности, сформулированы научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы и положения, выносимые на защиту, описаны методология и методы исследования, представлена структура диссертации.

**В первой главе** проанализированы методы получения ячеистых материалов, рассмотрены вопросы качества изделий с ячеистой структурой в зависимости от исходных материалов и технологических параметров выбранного способа изготовления. Рассмотрены особенности структуры и свойств костной ткани и методы ее восстановления, обозначены основные требования, предъявляемые к имплантатам. Проведен анализ исследований в области разработки имплантатов на основе ВПЯМ. Рассмотрены технологические проблемы формирования структуры и свойств ячеистых материалов методом селективного лазерного плавления. Исследовано влияние структурно-технологических параметров на физико-механические свойства ячеистых конструкций. На основе анализа литературных данных определены цель и задачи исследования.

**Во второй главе** дана характеристика использованных для экспериментальных исследований материалов, технологического и исследовательского оборудования. Приведены методики исследований, использованные в работе для исследования структуры, микропористости, микротопографии поверхности и изломов структурных элементов: металлографический, рентгеноструктурный, элементный анализы, оптическая и электронная микроскопия; методика экспериментального исследования физико-механических свойств образцов, полученных лазерным плавлением, а также методика прогнозирования механических свойств ячеистых материалов. Представлена методика проведения регрессионного анализа для установления зависимостей физико-механических и структурных параметров ВПЯМ от режимов лазерного излучения. Приведены сведения о методике клинических испытаниях имплантатов.

**Третья глава** посвящена созданию конструкции с ячейками Вигнера-Зейтца, учитывающей строение костной ткани и способствующей ее успешному закреплению и дальнейшему прорастанию. Проведен комплексный анализ исходного порошка, сделано заключение о его соответствии требованиям, предъявляемым к исходным материалам для селективного лазерного плавления и медицинской промышленности. На основе теории планирования эксперимента получены математические зависимости, устанавливающие влияние технологических параметров СЛП на ширину трека, глубину проплавления, микротвердость, микропористость в продольном и поперечном направлении, отклонение геометрических размеров от 3D модели. Установлены режимы, обеспечивающие получение стабильных ВПЯМ с минимальными значениями микропористости и максимальной размерной точностью, заданной микротвердостью и глубиной проплавления.

**В четвертой главе** представлены результаты разработки методики прогнозирования упругих и прочностных свойств ВПЯМ на основе предложенных критериев их оценки и анализа напряженно-деформированного состояния, обеспечивающей создание ячеистых материалов с регулируемой макроструктурой и заданными механическими свойствами методом селективного лазерного плавления порошка Ti6Al4V. Установлен диапазон макроструктурных параметров ВПЯМ, обеспечивающих соответствие физико-механических свойств проектируемых образцов ВПЯМ свойствам костной ткани челюстно-лицевой области.

**В пятой главе** представлены конструкции ячеистых имплантатов для замещения костных дефектов челюстно-лицевой области, полученные методом послойного синтеза порошка Ti6Al4V. Приведены результаты комплексного исследования формирования костной ткани после вживления ячеистых имплантатов, экспериментально подтверждена возможность их использования в качестве армирующего каркаса костной ткани. Установлен интервал значений макроструктурных характеристик ВПЯМ, обеспечивающих наибольшую степень фиксации и ускорение восстановления костной ткани.

**В приложениях** приведены сведения об апробации ячеистых имплантатов, полученных методом СЛП, при вживлении в костные ткани лабораторных животных и акт внедрения в учебный процесс.

**В заключении** сформулированы основные результаты и выводы диссертации. Выводы аргументированы и полностью отражают основные научные достижения автора.

#### **Научная новизна диссертационной работы Килиной П.Н.:**

1. 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.
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.

#### **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).

Материалы диссертации Килиной П.Н. использованы в учебном процесс ПНИПУ в рамках дисциплин «Современные технологии прототипирования», «Технологии селективного лазерного плавления», «Новые конструкционные материалы».

### **Достоверность научных результатов и обоснованность выводов**

В диссертационной работе представлены результаты, полученные в лабораторных условиях с использованием современных технических средств, аналитических приборов и пакетов компьютерных программ. Используются различные методики аналитических, численных и экспериментальных исследований, результаты которых не противоречат друг другу и современным научным представлениям. Достоверность исследований подтверждена методами статистической обработки данных, математические зависимости получены с использованием теории планирования экспериментов. Практические результаты подтверждены патентами на изобретение, анализ работы позволяет отметить наличие научной новизны, достоверности и обоснованности приведенных в работе выводов, положений и рекомендаций.

### **Замечания.**

1. В диссертации ничего не сказано о характере лазерного воздействия - импульсное или непрерывное? Ведь это является важным технологическим параметром, оказывающим значительное влияние на процесс СЛП.
2. Как сказывается анизотропия свойств (послойное изготовление) на прочность ВПЯМ в разных направлениях и как это учитывалось при проектировании имплантата?
3. В диссертации не указано, проводился ли отжиг образцов после СЛП для снятия напряжений? Если нет, то почему?
4. В третьей главе указано, что с увеличением мощности излучения значительно возрастает микротвердость, но нет выводов почему это происходит.

5. На стр. 105 и 108 приведены фотографии шлифов. По ним видно, что шлифы подготовлены плохо и определить по ним распределение микропористости не представляется возможным.
6. На стр. 109 (табл. 3.15) фотографии шлифов 5-20 и 25-60 выбиваются из общей картины. Возможно плоскость шлифования попала в место между слоями? Для полноты картины нужно было сделать шлифы в продольном направлении, в вертикальной плоскости.
7. На стр. 111, на рисунке 3.30 не хватает глубины резкости снимка и не виден масштаб, что затрудняет оценку качества дорожек и их отличие друг от друга. Каким способом измерялась ширина дорожки и как определялось отклонение размеров от 3D модели: с учетом приплавленных частиц или без них?
8. Представленные регрессионные зависимости геометрических и физико-механических параметров дорожек после СЛП от режимов лазерного излучения имеют линейный характер. Составлялись ли планы второго порядка? Исследовалась ли возможность существования нелинейной зависимости между параметрами лазерного излучения и характеристиками дорожки после СЛП?

Указанные замечания не снижают общую положительную оценку работы.

#### **Соответствие диссертационной работы указанной специальности.**

Диссертационная работа Килиной П.Н. по содержанию и полноте изложенного материала соответствует формуле специальности 05.16.06 – Порошковая металлургия и композиционные материалы: 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».

#### **Заключение.**

Диссертация Килиной П.Н. «Формирование периодической структуры армирующего каркаса костной ткани на основе порошкового титанового сплава селективным лазерным плавлением» соответствует паспорту специальности 05.16.06 и является завершенной научно-квалификационной работой, которая на основании выполненных автором исследований и полученных результатов вносит значительный вклад в решение актуальной научной проблемы установления закономерностей макро- и микроструктурообразования в процессе селективного лазерного плавления ВПЯМ на основе титанового сплава Ti6Al4V, разработки и научного обоснования количественных критериев технологического процесса СЛП, обеспечивающих требуемые показатели качества элементов решетчатого

каркаса и сформированных на их основе ВПЯМ, а также значительный вклад в решение практически значимой проблемы создания челюстно-лицевых ячеистых конструкций для замещения костных дефектов с равномерным и максимальным их заполнением, обеспечивающим ускоренное прорастание костной ткани.

Диссертационная работа соответствует требованиям п.9 – 14 «Положения о присуждении ученых степеней» постановления Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842 (в редакциях от 21.04.2016 № 335 и 12.10.18 № 1168), а ее автор, Килина Полина Николаевна, достойна присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.06 – Порошковая металлургия и композиционные материалы.

Официальный оппонент,  
доцент Юргинского технологического  
института (филиала) ФГАОУ ВО  
«Национальный исследовательский  
Томский политехнический университет»,  
к.т.н., доцент

  
Сапрыкин А.А.

Ученый секретарь Ученого совета Ю  
к.т.н., доцент

  
Мальчик А.Г.

Сапрыкин Александр Александрович, кандидат технических наук, доцент, доцент Юргинского технологического института (филиала) Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» <http://tpu.ru>

Адрес: 652050, Россия, Кемеровская область, г. Юрга, ул. Ленинградская, 26  
Телефон: (+738451) 7-77-61 доп. 67-51

E-mail: [sapraa@tpu.ru](mailto:sapraa@tpu.ru)

Наименование научных специальностей, по которым была защищена кандидатская диссертация: 05.03.01 – Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки, 05.16.01– Металловедение и термическая обработка металлов.