



«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе,
доктор техн. наук, проф.

Воротилин Михаил Сергеевич

« 8 » *март* 2026 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«Тульский государственный университет»
на диссертационную работу Лезина Вячеслава Дмитриевича
«Получение пористых материалов из сверхупругих сплавов Ti-Zr-Nb
методом селективного лазерного плавления для изготовления
ортопедических имплантатов», представленную на соискание ученой степени
кандидата технических наук по специальности

2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

Актуальность темы диссертации

Активное развитие ортопедии и травматологии, а также запрос общества на улучшение качества жизни требует создания новых материалов и технологий для изготовления имплантатов. Современные тенденции в медицинском материаловедении направлены на разработку имплантатов, которые обеспечивают остеоинтеграцию (прорастание костной ткани в имплантат), а также минимизируют эффект экранирования напряжений, вызванных несоответствием модулей упругости имплантата и кости.

Применяемые в медицине $\alpha + \beta$ титановые сплавы, такие как Ti-6Al-4V, обладают высокой прочностью и коррозионной стойкостью, однако содержат токсичные элементы (ванадий, алюминий) и имеют модуль упругости (около 110 ГПа), значительно превышающий модуль упругости кортикальной (15–30 ГПа) и губчатой (0,5–5 ГПа) костной ткани. В последнее время большое внимание уделяется разработке метастабильных β -титановых сплавов на основе системы Ti-Zr-Nb, состоящих исключительно из биосовместимых легирующих элементов. Эти сплавы характеризуются низким модулем Юнга (40–60 ГПа) и сверхупругим поведением при температуре человеческого тела, что делает их перспективными материалами для ортопедических имплантатов.

Важной задачей является получение пористых имплантатов из сплава Ti-Zr-Nb с регулируемой архитектурой пор для обеспечения остеоинтеграции и снижения эффекта экранирования напряжений. Синтез на подложке путем лазерного сплавления (также известный как SLM) является одной из наиболее перспективных аддитивных технологий для изготовления изделий сложной геометрии из металлических порошков. Предыдущие исследования сплавов Ti-Zr-Nb, посвящены в основном сплошным полуфабрикатам, полученным методами обработки давлением. Важной практической задачей является получение пористых материалов из сплава Ti-Zr-Nb с высоким комплексом функциональных свойств методом лазерного сплавления. В основе решения этой задачи должны лежать результаты систематического исследования влияния параметров лазерного сплавления на структурообразование, механические и сверхупругие свойства пористых изделий.

Исходя из вышесказанного, кандидатскую диссертацию Лезина Вячеслава Дмитриевича, посвященную изучению закономерностей формирования макро- и микроструктуры при лазерном сплавлении порошка сверхупругого сплава Ti-Zr-Nb и определению их влияния на механические и функциональные свойства пористых материалов для изготовления ортопедических имплантатов, следует признать актуальной.

Структура и основное содержание диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав и выводов. Работа изложена на 136 листах формата А4, содержит 60 рисунков и 24 таблицы. Список использованных источников включает 159 наименования.

Во введении обоснована актуальность, сформулированы цель и задачи, представлены научная новизна, практическая значимость и положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведён аналитический обзор литературы. Рассмотрены требования к материалам для ортопедических имплантатов, преимущества и недостатки традиционных сплавов (Ti-6Al-4V, Ti-Ni) и перспективных безникелевых сплавов на основе Ti-Zr-Nb. Особое внимание уделено фазовым превращениям и сверхупругому поведению метастабильных β -сплавов. Проанализированы современные подходы к проектированию пористых структур, их влияние на биомеханическую совместимость и технологические особенности получения методом лазерного сплавления. На основе выполненного анализа обоснованы цель и задачи исследования.

Во второй главе описаны материалы и методики исследования. Представлены характеристики исходных порошков Ti-Zr-Nb (в том числе с корректировкой состава) и Ti-6Al-4V, процесс синтеза на подложке путем лазерного сплавления на установке TruPrint 1000, а также режимы термической обработки. Приведён комплекс методов исследования, включающий микрокомпьютерную томографию, оптическую микроскопию, РФА, EBSD, статические и усталостные механические испытания. Указаны стандарты и методики обработки данных.

В третьей главе представлены результаты разработки подходов к изготовлению и термической обработке пористых материалов из сплава Ti-Zr-Nb. Показано, что стандартные режимы лазерного сплавления, разработанные для сплошного материала, непригодны для получения пористых материалов из-за дефектов макроструктуры. Разработан альтернативный режим термической обработки в вакуумированной кварцевой капсуле (700 °С, 30 мин, охлаждение в

воде), позволяющий избежать окисления развитой поверхности и сохранить сверхупругое поведение материала. Впервые на диаграммах сжатия пористых материалов из сплава Ti-Zr-Nb выявлены фазовый (σ_{ϕ}) и дислокационный ($\sigma_{д}$) пределы текучести, что свидетельствует о протекании обратимого мартенситного превращения под нагрузкой.

В четвёртой главе проведена оптимизация режимов лазерного сплавления для изготовления пористых материалов. Установлено, что глубина ванны расплава в пористых структурах больше, чем в сплошном материале, и возрастает с уменьшением толщины перемычки (разница до 40 %). Определены оптимальные параметры: скорость сканирования 700–1000 мм/с, мощность лазера 45–75 Вт, шаг сканирования 0,04 мм, обеспечивающие дефектную пористость менее 0,5 % и высокую геометрическую точность. В результате анализа методом EBSD показано, что в пористом материале формируется размытая текстура β -фазы, в отличие от сильной текстуры $\langle 100 \rangle_{\beta}$ в сплошном материале. С использованием разработанных режимов изготовлены пористые материалы трёх типов архитектур (ромбический додекаэдр, листовой гироид, полиэдры Вороного) с пористостью около 75 %.

В пятой главе исследованы механические и функциональные свойства полученных пористых материалов. Показано, что с увеличением пористости от 68 % до 78 % дислокационный предел текучести закономерно снижается с 70 до 35 МПа, а модуль Юнга – с 1,5 до 0,8 ГПа, что соответствует известным закономерностям. Установлено, что пористые материалы из сплава Ti-Zr-Nb при сопоставимой пористости имеют примерно в 2 раза меньший модуль Юнга, чем аналогичные материалы из сплава Ti-6Al-4V, не уступая им в усталостной прочности. Показано, что структура типа «листовой гироид» демонстрирует наилучшее сочетание прочности, жесткости и усталостной долговечности ($\sigma_{уст}/\sigma_{\phi}$ может превышать единицу), что делает её наиболее перспективной для применения в ортопедических имплантатах.

Научная новизна работы

1. Впервые установлены закономерности влияния параметров лазерного сплавления на геометрию ванны расплава в сплошном материале и в пористых материалах из сплава Ti-Zr-Nb с толщиной перемычек 250 и 340 мкм. Показано, что глубина ванны расплава в тонких перемычках может превышать глубину в сплошном материале на 40 %.

2. Впервые определены оптимальные диапазоны режимов лазерного сплавления для пористых материалов из сплава Ti-Zr-Nb ($v = 700\text{--}1000$ мм/с, $P = 45\text{--}75$ Вт, $BR = 3,02\text{--}4,32$ см³/ч, $VED = 50\text{--}72$ Дж/мм³, $LED = 0,06\text{--}0,09$ Дж/мм), обеспечивающие дефектную пористость $< 0,5$ % и высокую геометрическую точность.

3. Впервые методом EBSD изучены особенности формирования структуры и кристаллографической текстуры β -фазы в пористых материалах из сплава Ti-Zr-Nb. Показано, что в перемычках формируется размытая текстура и снижается количество малоугловых границ по сравнению со сплошным материалом, где наблюдается сильная текстура $\langle 100 \rangle \beta$.

4. Впервые определены механические свойства пористых материалов из сплава Ti-Zr-Nb с памятью формы с архитектурами «ромбический додекаэдр», «гиرويد» и «Вороной». Показано, что при сопоставимой пористости модуль Юнга материалов из Ti-Zr-Nb (0,8–1,5 ГПа) примерно в 2 раза ниже, чем у аналогичных материалов из сплава Ti-6Al-4V, при сохранении сопоставимой усталостной прочности.

5. В условиях многоцикловых испытаний на сжатие показано, что образцы из сплава Ti-Zr-Nb проявляют усталостную прочность и долговечность (5×10^6 циклов), не уступающие образцам из сплава Ti-6Al-4V, и обладают преимуществом в меньшем накоплении остаточной деформации за счёт эффекта сверхупругости.

6. Экспериментально показано преимущество пористого материала из сплава Ti-Zr-Nb на основе структуры «листовой гиرويد» в более высокой усталостной

прочности по сравнению с материалами на основе ромбического додекаэдра и полиэдров Вороного при аналогичной конструкционной пористости.

Практическая значимость работы

1. Полученные закономерности в формируемых при лазерном сплавлении ваннах расплава в сплошном и пористом материале и методический подход к их анализу могут быть использованы применительно к другим сочетаниям материала и оборудования для изготовления пористых структур с различной внутренней конструкцией.

2. Разработаны рекомендации по выбору режимов лазерного сплавления и термической обработки для получения индивидуальных сплошных и пористых имплантатов из сверхупругого сплава Ti-Zr-Nb с высоким уровнем функциональных свойств. Получен патент «Способ получения индивидуальных изделий из сплава Ti-Zr-Nb с памятью формы и низким модулем при помощи селективного лазерного плавления» № 2840523 от 26.05.2025. Подана заявка на патент «Пористый материал на основе сплава титан-цирконий-ниобий и способ его получения для изготовления ортопедических имплантатов с повышенной биомеханической совместимостью» № 2025136694 от 18.12.2025.

3. Разработанные режимы лазерного сплавления и термической обработки использованы в ООО «КОНМЕТ» при изготовлении экспериментальных образцов для токсикологических исследований и прототипов кейджей для замены межпозвонковых дисков шейного отдела позвоночника с пористой структурой из сверхупругого сплава Ti-Zr-Nb.

4. По результатам исследований биосовместимости в соответствии с ГОСТ ISO 10993-1-2021 показано, что пористый материал из сплава Ti-Zr-Nb, полученный с применением технологии лазерного сплавления, соответствует требованиям безопасности, предъявляемым к медицинским изделиям.

Достоверность

Достоверность результатов, полученных в диссертации Лезина В.Д., обеспечивается использованием современного аттестованного оборудования (установка 3D-принтер TruPrint 1000, компьютерный томограф NanoVoxel-1000, компьютерный томограф GE v|tome|x L240/180, испытательные машины LFV-25-M), применением взаимодополняющих методов анализа (КТ, SEM, EBSD, РФА, механические испытания), статистической обработкой данных с доверительным интервалом при $\alpha = 0,05$, а также не противоречием полученных результатов с современными теоретическими представлениями и данными независимых исследований. Все научные положения и выводы являются обоснованными.

Рекомендации по использованию результатов диссертации

Научные результаты, полученные в диссертации, и основные положения, выносимые на защиту, могут быть использованы при разработке технологических процессов лазерного сплавления и термической обработки для изготовления пористых имплантатов из сверхупругих сплавов системы Ti-Zr-Nb на предприятиях медицинского профиля, таких как ООО «КОНМЕТ», а также в научно-исследовательских и образовательных учреждениях при подготовке специалистов в области металловедения биосовместимых сплавов и аддитивных технологий.

Замечания по работе

1. В работе показано равномерное распределение основных элементов Ti, Zr и Nb в порошке, но не оценена гомогенность β -фазы, полученной после лазерного сплавления.

2. Механические испытания проведены при комнатной температуре на пористых образцах небольшого размера (диаметр 10 мм, высота 11,3 мм). Влияние масштабного и температурного факторов не проанализированы, в то время как реальный имплантат будет иметь, возможно, большие размеры и эксплуатироваться при температуре человеческого тела.

3. В работе не указано, в какой мере следует относить результаты измерения механических свойств к конструкции имплантата, а в какой – к самому материалу.

4. Механические испытания пористых материалов проведены только при квазистатической деформации. Поведение материалов при динамических (ударных) нагрузках, характерных для реальных клинических ситуаций, не исследовано, что затрудняет прогнозирование поведения имплантатов при экстремальных воздействиях.

5. В работе использованы некорректные термины. Так, в соответствии с ГОСТ 57558-2025 соответствующая технология имеет название «лазерное сплавление», а не «лазерное плавление». Термин «инженерный модуль Юнга» не предусмотрен ни ГОСТ 1497-2023, ни ГОСТ 25.503-97.

Вышеизложенные замечания не влияют на положительную оценку диссертационной работы.

Заключение


Диссертация Лезина Вячеслава Дмитриевича является законченной научно-квалификационной работой в которой на основании выполненных автором исследований получены новые результаты, имеющие существенное значение для развития металловедения биосовместимых сплавов и аддитивных технологий. Работа соответствует паспорту специальности 2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.


Результаты диссертационной работы опубликованы в 5 печатных работах, в том числе 3 в изданиях, рекомендованных ВАК и индексируемых в базах Web of Science и/или Scopus. Зарегистрирован один патент. Автореферат и публикации полностью отражают содержание диссертации.

Представленная работа отвечает всем критериям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, установленным в «Положении о порядке присуждения ученых степеней в НИТУ МИСИС» П 710.05-22 (выпуск 3 от 17.03.22), а её автор, Лезин Вячеслав Дмитриевич, заслуживает присуждения

учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

Настоящий отзыв обсужден и утвержден на заседании кафедры машиностроения и материаловедения ФГБОУ ВО ТулГУ «22» апреля 2026 года. Протокол заседания № 9.

Заведующий кафедрой
машиностроения и материаловедения
Тулльского государственного университета
доктор технических наук
(специальность 05.02.07)  Анцев Александр Витальевич

Профессор кафедры
машиностроения и материаловедения
Тулльского государственного университета
доктор технических наук
(специальность 05.16.01)  Маркова Галина Викторовна

Подписи Анцева А.В., Марковой Г.В. удостоверяю

Ученый секретарь ТулГУ



Л.И. Лосева

Сведения об организации:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тулльский государственный университет».

Адрес: 300012, Тульская область, г. Тула, проспект Ленина, д. 92.

Тел.: +7 (4872) 35-34-44. E-mail: info@tsu.tula.ru