

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу «Влияние технологических параметров селективного электронно-лучевого спекания и горячего изостатического прессования на формирование структуры и свойств сплава Ti-6Al-4V медицинского назначения», представленную Камским Григорием Владимировичем на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.01 – «металловедение и термическая обработка металлов и сплавов»

Актуальность темы диссертации. Диссертационная работа рассматривает вопросы влияния технологических параметров работы 3Д принтера на формирование структуры, текстуры и механических свойств образцов сплава Ti-6Al-4V медицинского назначения, полученного с помощью одного из методов аддитивных технологий - селективного электронно-лучевого спекания. Получение высококачественных готовых изделий медицинского назначения с помощью цифровых технологий является актуальной инженерной задачей и представляет значительный интерес как с научной, так и практической точек зрения.

Структура и основное содержание работы. Диссертационная работа Камского Г.В., изложенная на 154 страницах машинописного текста, состоит из введения, пяти глав, заключения и библиографического списка литературы, включающего 183 наименования.

Во **введении** кратко обоснована актуальность тематики диссертационной работы, сформулированы ее цели и задачи, представлены научная новизна и практическая значимость, положения, выносимые на защиту, указана достоверность полученных результатов, отражен личный вклад автора, а также сведения об опубликованных материалах.

Первая глава является обзорной. Автором проведен критический обзор имеющихся сегодня научных данных по теме диссертации. Рассмотрены и классифицированы цифровые аддитивные методы получения медицинских имплантатов. Подробно описаны методики получения металлических образцов с помощью селективного электронно-лучевого спекания (СЭЛС) и горячего-изостатического прессования (ГИП). Подробно рассмотрены особенности формирования структуры и свойств сплава Ti-6Al-4V медицинского назначения в процессе традиционных технологий. В завершение главы сформулированы цель работы и поставленные задачи исследования.

Вторая глава содержит описание процедуры получения образцов сплава Ti-6Al-4V методом селективного электронно-лучевого спекания, методов исследования структуры и механических свойств.

Третья, четвертая, пятая главы являются оригинальными, в которых представлены результаты исследований и анализа структуры и механических свойств образцов сплава Ti-6Al-4V, полученных с помощью селективного электронно-лучевого спекания.

В третьей главе приведены результаты математического моделирования процесса селективного электронно-лучевого спекания (СЭЛС), установлены закономерности формирования структуры, фазового состава и физико-механических свойств сплава Ti-6Al-4V при СЭЛС. Получено распределение температурного поля на поверхности первого слоя образца. Результаты автора подтверждают нагрев образца выше температур кипения сплава Ti-6Al-4V в центральной части зоны воздействия электронного пучка. Особенное внимание обращено на то, что при добавлении следующего слоя происходит вторичный переплав только предыдущего слоя. Также в этой главе представлены результаты структурного исследования и механических испытаний на растяжение полученных СЭЛС образцов. Анализируется образование первичной и вторичной бета фазы. Показано, что источниками процесса разрушения являются внутренние поры.

В четвертой главе было изучено влияние технологических параметров процесса СЭЛС на формирование структуры и механические свойства образцов сплава Ti-6Al-4V. В качестве основных технологических параметров рассмотрена степень дефектности используемого металлического порошка, расстояние между проходами электронного луча и скорость его движения. Особенное внимание следует обратить на полученный в работе результат по определению возможности многократного использования металлического порошка. Данный результат имеет важное **практическое значение** для развития цифрового аддитивного производства.

В пятой главе исследовано влияние горячего изостатического прессования (ГИП) на структуру и свойства сплава Ti-6Al-4V, изготовленного методом СЭЛС. Использование этого метода позволило автору работы получить высокие механические свойства СЭЛС образцов за счет снижения внутренней пористости и остроты текстуры в процессе ГИП.

Научная новизна диссертации заключается в следующем:

1. Методом ориентационной микроскопии установлены закономерности формирования текстуры α и β -фаз, как при синтезе изделия методом СЭЛС из сплава Ti-6Al-4V, так и при его дальнейшей обработке методом ГИП.
2. Произведено моделирование процесса СЭЛС на основе метода конечных элементов (МКЭ). С помощью которого была составлена карта

распределения температур в верхнем слое изделия, а также схема термоциклирования кристаллизовавшегося слоя (циклы нагрева/охлаждения) в процессе СЭЛС. 3. Впервые экспериментально установлено влияние морфологических дефектов использованного в СЭЛС порошка на структуру и механические свойства сплава Ti-6Al-4V. 4. Установлены особенности разрушения сплава Ti-6Al-4V после СЭЛС и ГИП как при статическом, так и при многоцикловом нагружении.

Следует отметить широкий спектр современных научных методов исследования, использованных в работе, позволивших получить надежные достоверные сведения об изучаемом объекте. Полученные в диссертационной работе результаты являются новыми и не противоречат существующим представлениям о процессах деформации и разрушения металлических изделий.

Диссертация хорошо структурирована. Основные результаты работы неоднократно апробированы на российских и международных конференциях, защищаемые положения достаточно полно отражены в научных публикациях.

По диссертационной работе имеются следующие вопросы и замечания:

1. При проведении механических испытаний образцов сплава Ti-6Al-4V (grade 5), полученного аддитивной технологией без постобработки, в работе получены высокие пластические ($\delta=18,7\%$) и прочностные характеристики ($\sigma_b=971$ МПа). Это значительно превышает стандартные характеристики промышленного сплава Ti-6Al-4V (grade 5) медицинского назначения, для которого максимальная пластичность $\delta=10\%$ и прочность $\sigma_b=860$ МПа. Чем объясняются причины такого значительного повышения прочностных и пластических характеристик в данной работе? К сожалению, в диссертационной работе не используется для сравнения эталонный промышленный образец сплава Ti-6Al-4V, полученный традиционным способом литья.
2. Таблица 3 (автореферат) перепутаны местами значения относительного удлинения и сужения.
3. Выводы п.4. «Установлено, что ГИП уменьшает количество внутренних дефектов, что, в свою очередь, приводит к значительному повышению пластических свойств, а именно относительное удлинение увеличивается в среднем на 41%, а относительное сужение на 48%, при любом уровне нагрузки, относительно заготовок АП». Согласно Таблицам, приведенным в диссертации, в исходном (СЛЭС) состоянии образцы имели относительное удлинение $\delta=18,7\%$, а сужение $\psi=50,4\%$, после ГИП эти величины составили $\delta=20\%$ и $\psi=45,2\%$. Это составляет

порядка 7% и 10%, а не 41% и 48%. Кроме того, после ГИП величина сужения снижается, а не растет.

Вышеуказанные вопросы и замечания не снижают общий высокий уровень диссертационной работы. Диссертация Камского Г.В. является законченной научно-квалификационной работой, соответствует паспорту специальности 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов, а также отвечает требованиям п.9 «Положения о присуждении ученых степеней» в УрФУ. Автор диссертации Камский Г.В. заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

Главный научный сотрудник лаборатории
Магнитного структурного анализа
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института физики металлов им. М.Н. Михеева
Уральского отделения Российской академии наук,
доктор физ.-мат. наук,
специальность 01.04.07 Физика конденсированного состояния
Наталья Васильевна Казанцева

«20 » авг 2021 г.

Почтовый адрес: 620108, г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт физики металлов им. М.Н. Михеева
Уральского отделения Российской академии наук
Тел.: (343)3783746

E-mail: kazantseva@imp.uran.ru

