



**МОСКОВСКИЙ
ПОЛИТЕХ**

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Московский политехнический университет»
(Московский Политех)

Б.Семеновская ул., д.38, Москва, 107023
Тел.+7 495 223 05 23, Факс +7 499 785 62 24
www.mospolytech.ru | E-mail: mospolytech@mospolytech.ru
ОКПО 04350607, ОГРН 1167746817810,
ИНН/КПП 7719455553/771901001

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе

Наливайко А.Ю.

22.11. 2022 г.



№ _____

на _____ от _____

ОТЗЫВ

ведущей организации федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский политехнический университет» на диссертационную работу
Иванова Алексея Евгеньевича «Влияние термической и термоводородной обработок на структуру и механические свойства монолитных изделий и пористых покрытий из титановых сплавов, полученных по аддитивным технологиям», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1.«Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов»

Актуальность темы диссертации

В последнее время аддитивные технологии находят всё более широкое применение в различных отраслях промышленности, в том числе и в медицине, например, для печати компонентов эндопротезов крупных суставов. Вследствие высокой стоимости производства их обычно используют для изготовления индивидуальных изделий. Однако 3D печать может быть использована и для производства серийных изделий в том случае, если они имеют сложную форму и их трудно или невозможно получить традиционными способами механической обработки, т.к. одним из ее преимуществ является отсутствие или минимальная финишная обработка. Однако для изделий, полученных 3D-печатью, требуется последующая термическая обработка для преобразования метастабильной структуры и снятия внутренних напряжений, а рекомендуемые производителями оборудования режимы обработки не всегда позволяют получить требуемый уровень свойств.

Для снижения себестоимости производства по аддитивным технологиям в последнее время стали применять прямое лазерное нанесение металла, т.е. когда на заготовку, полученную традиционными методами обработки, 3D-печатью «достраивается» изделие. В частности, это сейчас применяется в медицине для создания на поверхности компонентов пористых покрытий. Поэтому необходима разработка оптимальной архитектуры пористой поверхности с определённым распределением пор по размерам, а также изучение границы раздела покрытие-основа для повышения прочности их связи, чтобы исключить его отслоение после имплантации в организм человека.

Таким образом, диссертационная работа Иванова А.Е., посвященная изучению влияния режимов термической обработки на формирование структуры в образцах и изделиях из титановых сплавов, полученных селективным лазерным сплавлением или прямым лазерным нанесением, и их влияния на физико-механические и технологические свойства является актуальной.

Общая характеристика работы.

В работе рассмотрено формирование структуры и физико-механических свойств образцов из сплава Ti-6Al-4V, полученных селективным лазерным сплавлением (СЛС) на принтерах разных производителей, после различных видов обработки. Установлено, что независимо от температуры вакуумного отжига α -фаза всегда имеет пластинчатую морфологию, которая наследуется от мартенситной структуры. С повышением температуры наблюдается только укрупнение структурных составляющих.

Рассмотрено влияние термоводородной обработки на формирование структуры в 3D-образцах. Показано, что после наводороживания при 800°C до 0,8 масс.% варьирование температуры вакуумного отжига позволяет изменять морфологию α -фазы от пластинчатой до близкой к глобулярной.

В работе также исследовано влияние температуры нагрева на величину остаточных напряжений в образцах после 3D-печати. Показано, что отжиг при 550°C снижает уровень остаточных напряжений в 5 раз. Это свидетельствует о возможности получения в 3D-заготовках разного уровня прочности и пластичности.

Большое внимание в работе уделено изучению структуры пористых покрытий, полученных лазерным напылением и прямым лазерным нанесением порошка. Разработана методика определения пористости, на основании которой получена требуемая структура поверхности покрытия. Изучена эволюция структуры границы раздела покрытие-основа в зависимости от температуры нагрева в вакууме. На основании проведенных исследований разработаны режимы термической

обработки, обеспечивающие высокий физико-химический контакт основы с покрытием.

Проведенные исследования позволили разработать технологии обработки компонентов эндопротезов крупных суставов, которые были внедрены на предприятиях, занимающихся производством медицинских изделий.

Научная новизна работы Иванова А. Е. заключается в разработке методики расчёта размеров, количества и глубины пор в покрытии, которая позволила сформировать требуемую структуру пористого покрытия при прямом лазерном нанесении порошка; в установлении влияния температуры нагрева на величину остаточных напряжений в образцах, полученных селективным лазерным сплавлением. Установлено, при нагреве растягивающие напряжения начинают интенсивно снижаться, а выше 550°C они снижаются в 5 раз и изменяются на сжимающие.

Практическая значимость диссертационной работы заключается в разработке способа получения пористого покрытия из сплава ВТ1-0 с регламентированным размером пор прямым лазерным нанесением металла и режима термической обработки, позволившего повысить адгезионную прочность покрытия к основе, что было внедрено во ФГУП «ЦИТО» при производстве чаши вертлужного компонента эндопротеза тазобедренного сустава. Разработанная технология термической обработки была также внедрена в АО «Имплант МТ» при производстве чаш с пористым покрытием, полученным методом плазменным напылением.

Разработанная технология термической обработки заготовок из сплава ВТ6, полученных методом селективного лазерного сплавления, была использована АО «Имплант МТ» при изготовлении эпифизарного бедренного компонента коленного сустава.

Достоверность результатов работы обеспечена использованием поверенного и сертифицированного оборудования с использованием лицензионного программного обеспечения; проведением исследований и испытаний в соответствии с требованиями научно-технической документации, действующей на территории Российской Федерации (ГОСТ); хорошим совпадением экспериментальных данных и теоретических расчетов, использованием методов математической статистики при обработке результатов.

Результаты диссертационной работы, выносимые на защиту, прошли апробацию на 14 научно-технических конференциях, опубликованы в 26 печатных работах, в том числе 3 статьях в ведущих рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК, а также 3 статьи, опубликованные в журналах, включенных в международные системы цитирования.

Автореферат и опубликованные работы полностью отражают содержание диссертации.

По диссертационной работе можно сделать следующие замечания:

1. В главе 2 автор дает избыточное описание некоторых методов исследования. Например, математическое определение параметров шероховатости поверхности дано в ГОСТе; описание методики наводороживающего отжига есть в соответствующих литературных источниках. Достаточно было бы дать ссылки на них.
2. В описании направлений и плоскостей в образцах для испытаний имеется некоторая путаница. Так, на рис. 3.2 (стр. 88) и 3.10 (стр. 102) одинаковые аббревиатуры соответствуют плоскостям образцов и направлениям. Это затрудняет, в частности, анализ механических свойств, указанных в таблице 3.6 (стр. 96), а также анализ текстур (рис. 3.12, 3.13 и табл. 17).
3. В разделе 3.4 констатирован факт устранения растягивающих остаточных напряжений, формирующихся в образцах после СЛС, путем отжига при температурах 550° - 850° С. Однако механизм этого явления не раскрыт. Сохранение же высокого уровня остаточных напряжений после термоводородной обработки не подтверждено экспериментальными данными или ссылкой на литературу.
4. Не ясен выбор амплитудного значения напряжений (400 МПа) при усталостных испытаниях образцов, полученных СЛС. Это не позволяет оценить влияние термоводородной (табл. 3.5) и термической (табл. 3.6) обработок на число циклов до разрушения, т.к. при всех режимах этих обработок это число циклов более 10^7 , также, как и в исходном состоянии образцов, изготовленных в 2022 году (табл. 3.4).

Сделанные замечания не снижают общей высокой оценки диссертации.

Диссертационная работа Иванова Алексея Евгеньевича выполнена на высоком научно-техническом уровне и представляет собой самостоятельную законченную научно-квалификационную работу, в которой изложены научно-обоснованные

технические и технологические решения по обработке изделий, полученных селективным лазерным сплавлением или прямым лазерным нанесением, обеспечивающие получение требуемого уровня механических и эксплуатационных свойств.

По научному уровню, полученным результатам, содержанию и оформлению представленная диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям п.п. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденном Постановлением правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, а ее автор, Иванов Алексей Евгеньевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1. «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов»

Отзыв рассмотрен на заседании кафедры «Материаловедение», протокол № 4 от 10 ноября 2022 года. На заседании присутствовало 15 членов. Результаты голосования: «за» – 15, против – нет, воздержавшихся – нет.

Заведующий кафедрой "Материаловедение",
доктор технических наук, профессор

22. 11. 2022

Овчинников Виктор Васильевич

подпись Овчинникова В.В. заверяю

СПЕЦИАЛИСТ ПО
КАДРОВУМУ
ДЕЛОПРОИЗВОДСТВУ
Бирюкова И.

