

ОТЗЫВ

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

Актуальность темы.

Аддитивные технологии (АТ) являются одним из наиболее бурно развивающихся направлений в настоящее время. Они имеют целый ряд преимуществ по сравнению с традиционными технологиями получения конечных изделий, в частности если речь идет о титановых сплавах. Только стоимость механической обработки изделий из титана составляет около 50% от их общей стоимости, а если учесть высокую цену слитков и полуфабрикатов, то применение аддитивных технологий становится очевидным. Однако для внедрения данной технологии необходимо проведения большого комплекса исследований, чтобы обеспечить высокую стабильность процесса и требуемый комплекс механических и эксплуатационных свойств.

Развитие аддитивного производства идет сразу в нескольких направлениях: совершенствование машин для 3D-печати и их программного обеспечения, повышение качества порошка и удешевление его производства, отработка режимов синтеза и постобработки, обеспечивающих требуемый комплекс свойств.

Если первым двум направлениям уделяется большое внимание, то третьему – значительно меньше.

Поэтому диссертационная работа Камского Г.В., посвященная комплексному изучению влияния параметров селективного электронно-лучевого спекания и режимов последующей обработки на закономерности формирования структуры и фазового состава в образцах из сплава Ti-6Al-4V для обеспечения формирования высокого комплекса механических свойств, несомненно является актуальной.

Общая характеристика работы.

В работе подробно проанализированы основные характеристики аддитивного процесса и оборудования для селективного электронно-лучевого спекания (СЭЛС). Систематизированы данные об особенностях формирования структуры, текстуры, механизме и кинетике фазовых превращений, протекающих в сплаве Ti-6Al-4V в процессе СЭЛС. Проанализировано влияние термообработки и термомеханической обработки на структуру и физико-механические свойства образцов из сплава Ti-6Al-4V, произведенных методом СЭЛС.

Автором проведено математическое моделирование процесса СЭЛС. Рассчитано изменение температуры в зависимости от расстояния от центра образца, а также ее распределение по глубине слоев.

Изучены особенности формирования структуры в образцах из титанового сплава Ti-6Al-4V, полученных методом СЭЛС. Исследовано влияние параметров процесса СЭЛС и состояния порошка на механические свойства и микроструктуру материала. Показана возможность многократного использования порошка при условии соблюдения технологии переработки, однако наблюдается постепенное снижение механических свойств изделий, особенно характеристик пластичности, вследствие увеличения содержания кислорода. Установлено, что содержание кислорода в порошке до 35 циклов СЭЛС, соответствует стандарту ASTM F2924. Проведен фрактографический анализ, позволивший выявить закономерности разрушения образцов, изготовленных из первичного и многократно использованного порошка.

Установлена зависимость шага электронного луча на формирование структуры и определены его оптимальные параметры.

Исследовано влияние горячего изостатического прессования (ГИП) на структуру и плотность образцов, полученных методом СЭЛС. Показано, что ГИП уменьшает количество внутренних дефектов, что приводит к значительному повышению пластических свойств, а именно, относительное удлинение увеличивается в среднем на 41%, а относительное сужение на 48%. Кроме того, применение ГИП в среднем на 80% повышает усталостные свойства изделий СЭЛС, изготовленных как из первичного, так и многократно использованного порошка.

Научная новизна.

В диссертации получен ряд новых научных результатов, имеющих существенное значение для дальнейшего развития исследований по созданию и обработке изделий, полученных по аддитивным технологиям.

Автором на основе метода конечных элементов разработана модель процесса селективного электронно-лучевого спекания, которая позволила оценить распределение температуры по глубине слоев. Показано, что при «наплавлении» нового слоя порошка расплавлению подвергаются 3-4 верхних слоя изделия.

Установлено влияние морфологических дефектов использованного в СЭЛС порошка на структуру и механические свойства образцов из сплава Ti-6Al-4V. Показано, что многократное использовании порошка приводит к его насыщению кислородом. Определено, что превышение допустимого предела его содержания происходит после 35 циклов использования.

Установлена зависимость формирования структуры в сплаве Ti-6Al-4V от шага электронного луча. Показано, что его увеличение от 100 до 400 мкм приводит к формированию более дисперсной структуры, увеличению пористости материала и образованию зон непроплава.

Теоретическая и практическая значимость.

Теоретическая значимость работы заключается в получении новых результатов по влиянию направления синтеза на формирование текстуры. Показано, что текстура α -фазы в образцах из сплава Ti-6Al-4V, полученном методом СЭЛС, наследуется от высокотемпературной β -фазы в соответствии с ориентационными соотношениями Бюргерса.

Разработаны режимы СЭЛС, позволяющие получить образцы из сплава Ti-6Al-4V с минимальной пористостью и микроструктурой, обеспечивающей хорошее сочетание прочностных, пластических и усталостных свойств.

Разработан режим горячего изостатического прессования, приводящий к значительному повышению усталостных свойств изделий за счет устранения остаточной микропористости после СЭЛС.

Достоверность полученных результатов.

Все экспериментальные результаты получены с использованием современных методов исследования. В работе отсутствуют внутренние противоречия в результатах исследований. Нет противоречий и с общепринятыми моделями структурообразования в металлических материалах. Экспериментальные результаты приведены с абсолютной ошибкой опыта и позволяют их правильно трактовать. Поэтому сомнений в достоверности результатов диссертационной работы Камского Григория Владимировича нет.

Замечания.

1. Не понятно, почему автор принял при моделировании процесса СЭЛС (стр. 68), что средний размер частиц порошка 100 мкм? Во-первых, в таблице 2.2.2 показано, что высота слоя порошка 50 мкм, и, во-вторых, из приведенного на рис. 2.1.1 распределения по размерам частиц первичного порошка следует, что его средний размер составляет 75 мкм.

2. Авторы некорректно для описания процесса укрупнения структурных составляющих выбрали термин «коагуляция», который означает слипание, образование комьев. В данном случае для описания процесса необходимо было употребить термин «коалесценция».

3. В диссертации встречаются фразы, противоречащие друг другу. Например, на стр. 76 автор утверждает, что «материал был однородно проплавлен...», а в следующем абзаце говорит, что «...могут наблюдаться не упорядоченные дефекты и поры».

4. В п. 4.2, в котором описывается влияние шага смещения электронного луча, не сказано какое пятно фокуса.

5. В цели работы указано, что исследования проводились «для обеспечения формирования высокого комплекса свойств при производстве персонализированных изделий медицинского назначения». К сожалению, в тексте диссертации приведены всего две фотографии изделий на рис. 4.3.5, да и то в контексте описания поддержек, и больше про медицинские изделия ни слова. Цель работы в свете «обеспечения формирования высокого комплекса механических свойств» достигнута, но зачем сужать область возможного применения полученных результатов.

Сделанные замечания не снижают конечную ценность и практическую значимость работы.

Заключение

Представленная диссертационная работа выполнена на высоком научно-техническом уровне и представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой изложены научно обоснованные технические и технологические решения по комплексному исследованию образцов из сплава Ti-6Al-4V, полученных по аддитивным технологиям, и разработке на этой основе режимов селективного электронно-лучевого спекания и термомеханической обработки, обеспечивающих повышение механических свойств, в том числе пластических и усталостных характеристики.

Результаты диссертационной работы, выносимые на защиту, прошли апробацию на 4 международных научно-технических конференциях, опубликованы в 11 печатных работах, в том числе 3 статьи, включенные в перечень рецензируемых научных изданий, определенных ВАК, и 10 статей в изданиях, индексируемых базами данных Web of Science и Scopus.

Автореферат и опубликованные работы полностью отражают содержание диссертации.

По научному уровню, полученным результатам, содержанию и оформлению представленная диссертационная работа соответствует паспорту специальности 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов и удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, изложенным в п.9 «Положение о присуждении ученых степеней» УрФУ, а ее автор, Камский Григорий Владимирович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

Скворцова Светлана Владимировна,
профессор кафедры «Материаловедение и технология обработки материалов»
федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Московский авиационный институт (национальный
исследовательский университет)»
доктор технических наук, профессор



20 мая 2021г.

Адрес: Волоколамское шоссе, д. 4, г. Москва, 125993

Телефон (рабочий): 8-499-141-9588

Адрес электронной почты: skvorcovasv@matl.ru

Подпись Скворцовой С.В. удостоверяю,
заместитель начальника управления
по работе с персоналом



М.А. Иванов